



El futuro
es de todos

Minenergía



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

ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

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

ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

**MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO**

AUTORES SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Directora Técnica de Laboratorios SGC (E)

Gloria Prieto Rincón. Química, PhD en Geoquímica

Supervisor del Convenio Interadministrativo 319 de 2018 y Coordinador del Grupo de Trabajo Cali SGC

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

Apoyo a la supervisión del Convenio por parte del Ministerio de Minas y Energía

Fernanda Polanía Escobar

GRUPO DE GEOLOGÍA

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

William Andrés Pulido. Geólogo, MSc en Ciencias en Geología de Minas con Honores

Óscar David Cardona Sánchez. Geólogo

Paulo Duarte Hernández. Geólogo

Alejandro Cándelo Ríos. Pasante de Geología

Julián Vélez Correa. Pasante de Geología

GRUPO DE MINERÍA

Philly Mabel Abueta. Ingeniera de Minas, MSc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

GRUPO DE METALURGÍA

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

Diana Sofía Muñoz. Ingeniera Química

Gabriel Kamilo Pantoja. Ingeniero Químico, MSc. en ciencias, en ingeniería metalúrgica y de Materiales, DSc.

en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales

Fabián Andrés Ramírez Pita. Ingeniero Metalúrgico

Silvia Natalia Fuentes Torres. Ingeniera Metalúrgica

David Parra Peña. Pasante Ingeniería Química

GRUPO DE QUÍMICA

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

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

Annie Alexandra Arango. Tecnóloga Química

Daniel Castañeda Pinzón. Tecnólogo Químico

Giovanni Andrés Alarcón. Asistencial Operativo

Andrés Castrillón Asistencial Operativo

Liseth Irene Franco. Ingeniera Sanitaria y Ambiental

Oscar Fernando González. Químico, MSc en Ciencias Química

Diana Marcela Samboní Loaiza. Pasante en Ingeniería Sanitaria y Ambiental

ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA

Yury Marentes Laverde. Economista

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Juan Sebastián Garzón. Diseñador Industrial

ISBN digital: 978-958-52317-4-0

ISBN impreso: 978-958-52317-3-3

Comité Editorial SGC: ceditorial@sgc.gov.co

Presidente

Teresa Duque

Integrantes

Virgilio Amaris

Viviana Dionicio

Julián Escallón

Armando Espinosa

Guillermo Parrado

Grupo Técnico de la Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias

Profesor Juan Carlos Molano Mendoza

Geólogo. MSc. Geología Económica.

Ariel Oswaldo Cadena Sánchez

Químico. MSc. Ciencias Químicas, PhD en Ciencias Químicas.

Bibiana Paola Rodríguez Ramos

Geóloga. Msc. en Geología

Nathalia Marcela Guerrero Higuera

Geóloga

Martha Patricia Valenzuela

Geóloga

Jorge Enrique Ruiz Urueña. Geólogo. Msc. en Ciencias de la Tierra.

Andrea Milena Mayor Amador. Geóloga

Lorena Esperanza Marroquín Molina. Geóloga

Sergio Esteban Montes Miranda. Geólogo

Angie Catherin Cardona Alarcón. Geóloga

Yael Natalia Méndez Chaparro. Estudiante auxiliar

Valentina Bocanegra Olivera. Estudiante auxiliar

Lorena Valderrama Castillo. Estudiante auxiliar

Orlando Alcides Ardila Traslavina. Estudiante auxiliar

Dubán Esteban Gómez Gómez. Estudiante auxiliar

Julián David Medina Arboleda. Estudiante auxiliar

María Camila López. Estudiante auxiliar

Grupo Técnico de la Facultad de Geología de la Universidad de Caldas, Proyecto Geometalúrgico

Sergio José Castro

Ingeniero de Minas y Metalurgia. Esp. Técnicas Mineras. MSc. Ingeniería de materiales y Procesos

Luz Mary Toro Toro

Ingeniera Geóloga. Esp. Sensores Remotos Aplicados Geología. MSc. Ciencias - Geología. MSc. Educación

Elvira Cristina Ruiz Jiménez

Geóloga. MSc. Ciencias de la Tierra

Mauricio Alvarán Echeverri

MSc. Ciencias - Geología. Especialista en Sismología. Especialista en Docencia Universitaria

Diego Germán Loaiza García

Geólogo. Candidato a Magíster Énfasis Yacimientos Minerales

Distrito Minero de Zaragoza (Antioquia).

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. ZARAGOZA (ANTIOQUIA)



Este documento se ha elaborado en el marco del Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano, cuyo propósito es la elaboración de una guía metodológica mediante la caracterización mineralógica, química, metalúrgica y ambiental de la zona minera de Zaragoza (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.

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

Servicio Geológico Colombiano
Dirección de Laboratorios, Grupo de Trabajo Cali



Fotografía de portada: La imagen de portada muestra al grupo técnico del Servicio Geológico Colombiano camino a la entable de la planta la Primavera en el municipio de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano.

© **Servicio Geológico Colombiano**

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

MARÍA FERNANDA SUÁREZ LONDOÑO

Ministra de Minas

CAROLINA ROJAS HAYES

Viceministra de Minas

PABLO CÁRDENAS REY

Secretario general

JHON LEONARDO OLIVARES RIVERA

Director de Formalización Minera (E)

LAURA VICTORIA BECHARA ARCINIEGAS

Oficina Asesora Jurídica

SANDRA MILENA SÁNCHEZ ZULUAGA

Supervisora del convenio

CAMILO ENRIQUE ÁLVAREZ

Grupo de Gestión 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

GLORIA PRIETO RINCÓN

Directora técnica de laboratorios (E)

DALIA INÉS OLARTE MARTÍNEZ

Secretario general

RUBIELA GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Grupo de Trabajo Contratos y Convenios

JORGE IVÁN LONDOÑO ESCOBAR

Supervisor del convenio

OLGA PATRICIA ROCHA SÁNCHEZ

Grupo de Trabajo 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. ZARAGOZA (ANTIOQUIA)* 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.

Esta 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 esta 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 Zaragoza, los objetivos y el alcance de la guía; Metodología de Trabajo; Aspectos Geológicos, Minero, 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.

Asimismo, agradecen a los mineros de la zona de Zaragoza (Antioquia) por abrir sus puertas y recibir a las instituciones para permitir la investigación, el reconocimiento y el muestreo en las diferentes minas y plantas de beneficio.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1. Descripción de la situación actual	18
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	23

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Revisión bibliográfica	26
2.2. Muestreo	26
2.3. Análisis e interpretación	26
2.4. Pruebas	27
2.5. Propuesta ruta metalúrgica	27

3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Localización de la zona de estudio	30
3.2. Municipio de Zaragoza (Antioquia)	31
3.2. Localización de la zona de estudio	32
3.2.1. Vías de acceso	32
3.3. Ubicación de las minas y plantas de beneficio	32

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1. Fundamentos teóricos: geología y yacimientos minerales	37
4.1.1. Generalidades de yacimientos auríferos	38
4.1.2. Identificación de minerales en el frente de mina	43
4.1.3. Sulfuros asociados a la mena	44
4.2. Geología del distrito minero de Zaragoza (Antioquia)	46
4.2.1. Geología regional	46
4.2.1.1. Geología local	46
4.2.1.2. Geología estructural	47
4.2.1.3. Alteración hidrotermal	50
4.2.1.4. Metalogénesis y mineralización aurífera	50
4.2.1.5. Caracterización mineralógica de las minas estudiadas	52
4.2.1.6. Microtermometría y análisis de inclusiones fluidas	58
4.2.1.7. Secuencia paragenética	58
4.2.2. Ocurrencia de oro en veta	60
4.2.2.1. Mina Primavera	62
4.2.3. Calidad del oro (EPMA)	64
4.2.4. Modelo metalogénico	66
4.3. Análisis petrográficos de material de proceso metalúrgico	67
4.3.1. Sulfuros en la mina La Primavera	68
4.3.2. Sulfuros Mina oro verde	70
4.4. Liberación de oro	72
4.4.1. Liberación de oro en la mina La Ye	72
4.4.2. Liberación de oro mina Oro verde	73
4.4.3. Liberación de oro en la mina El Limón	74
4.4.4. Liberación de oro en la mina La Silva	75
4.4.5. Liberación de oro en la mina Los Pisones	75
4.4.6. Liberación de oro en la mina La Gallineta	76

4.4.7. Liberación de oro en la mina El Cristo	77
4.5. Consideraciones en geología y mineralogía para el beneficio	78
5. ASPECTOS MINEROS	
5.1. Fundamentos técnico-mineros	82
5.1.1. Etapas de un proyecto minero	82
5.1.1.1. Métodos de explotación	83
5.1.2. Métodos de arranque	90
5.1.3. Tipos de sostenimiento	90
5.1.4. Tipos de ventilación	93
5.1.5. Carga y transporte de mineral	94
5.2. Estudio minero de la zona minera	95
5.2.1. Metodología de trabajo	95
5.2.2. Características de Explotaciones mineras visitadas en Zaragoza	96
5.2.2.1. Mina artesanal Oro Verde	97
5.2.2.2. Mina El Cristo	98
5.2.2.3. Mina La Amada	99
5.2.2.4. Mina Pisones	100
5.2.2.5. Mina Limón	101
5.2.2.6. Mina La Ye	102
5.2.2.7. Mina La Primavera	104
5.2.3. Minería Aluvial	105
5.2.3.1. Mina La Valeria	105
5.3. Análisis minero	106
5.3.1. Método de explotación	106
5.3.2. Dilución de la veta	113
5.3.2.1. Análisis de dilución mina la primavera	114
5.3.3. Sostenimiento	119
5.3.3.1. Características de sostenimiento de la mina La Primavera	119
5.3.4. Ventilación	122
5.3.5. Minero-ambientales	123
5.4. Conclusiones en aspectos mineros	125
6. ASPECTOS METALÚRGICOS	
6.1. Fundamentos técnicos del proceso de beneficio metalúrgico	129
6.1.1. Beneficio de minerales en planta	129
6.1.2. Proceso de conminución (trituración y molienda)	130
6.1.2.1. Trituración primaria (gruesa)	130
6.1.2.2. Trituración secundaria (fina)	131
6.1.2.3. Molienda	133
6.1.3. Clasificación granulométrica	136
6.1.4. Clasificación hidráulica	136
6.1.5. Concentración de minerales auríferos por gravimetría	138
6.1.5.1. Concentración gravitacional o gravimétrica	139
6.1.6. Concentración de minerales auríferos por flotación	143
6.1.7. Cianuración	144
6.1.8. Fundición	147
6.1.9. Tratamiento de residuos sólidos en aguas	148
6.2. plantas de beneficio en la zona de zaragoza (antioquia)	149
6.2.1. Planta de beneficio de la mina la Primavera	149
6.2.2. Planta de beneficio de la mina Oro verde	151
6.3. Pruebas metalúrgicas de laboratorio	152
6.3.1. Planta La Primavera	152
6.3.2. Planta Oro Verde	155
6.4. Consideraciones mineralógicas en el proceso metalúrgico	158

7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

7.1. Contribución química a la caracterización, control de procesos metalúrgicos y ambientales	162
7.2. Fundamentos teóricos: métodos y aplicaciones químicas y ambientales	163
7.2.1. Contaminación por mercurio	163
7.2.2. Cianuro en minería	165
7.2.2.1. Dinámica del cianuro en un relave de residuo minero	165
7.2.3. Caracterización química y ambiental	167
7.2.3.1. Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos X	168
7.2.3.2. Aplicación de la espectrofotometría de absorción atómica	168
7.2.3.3. Aplicación de la técnica espectrofotometría de ultravioleta visible	169
7.2.3.4. Aplicación de la potenciometría de ion cianuro	169
7.2.3.5. Tratamientos de descomposición de cianuro	170
7.2.3.6. Ensayo en laboratorio de la descomposición de cianuro libre y complejo a formas estables	171
7.2.3.7. Pruebas ambientales para relaves	172
7.3. Puntos de muestreo visitados y muestras puntuales analizadas	173
7.4. Análisis químicos y ambientales	177
7.4.1. Determinación de pH	177
7.4.2. Análisis elemental mediante fluorescencia de rayos x en materiales de cabeza	180
7.4.3. Caracterización de sedimentos activos	182
7.4.3.1. Análisis de fluorescencia de rayos x en sedimentos activos	182
7.4.3.2. Determinación de mercurio por EAA en sedimentos activos	184
7.4.4. Caracterización de relaves	186
7.4.4.1. Análisis de fluorescencia de rayos X en relaves	186
7.4.4.2. Determinación de metales por EAA en relaves	188
7.4.4.3. Procedimiento de lixiviación característica de toxicidad (TCLP)	189
7.4.4.4. Balance ácido base (Test ABA) para la predicción del DAM	190
7.4.5. Caracterización de vertimientos	192
7.5. Conclusiones químicas y ambientales	198
7.6. Recomendaciones	199

8. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA

8.1. Proceso de beneficio sugerido	202
8.2. Balances de materia de los procesos sugeridos	203
8.3. Montaje de la planta de beneficio sugerida	204
8.4. Diagrama de flujo correspondiente a la planta de beneficio sugerida	205
8.5. Conclusiones metalúrgicas acerca de las operaciones actuales	207
8.6. Conclusiones acerca de la sustitución de la amalgamación	208
8.7. Consideraciones sobre las plantas de beneficio en la zona estudiada	208
8.8. Recomendaciones Metalúrgicas	209

9. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

9.1. Fundamentos teóricos para la evaluación financiera del proyecto	212
9.1.1. Generalidades sobre los proyectos de inversión	212
9.1.1.1. Definición	212
9.1.1.2. Clasificación	212
9.1.1.3. El ciclo de los proyectos	212
9.1.2. Estudio y evaluación financiera de proyectos de inversión	214
9.1.2.1. Propósito del estudio financiero	214
9.1.2.2. Etapas del estudio financiero	214
9.1.2.3. Propósito de la evaluación financiera	215
9.1.2.4. Etapas de la evaluación financiera	215
9.2. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera de Zaragoza	217
9.2.1. Estudio financiero	217
9.2.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial	218
9.2.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción	220
9.2.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio	224
9.2.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación	229
9.2.2. Evaluación financiera	229

9.2.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto	229
9.2.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos	231
9.3. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Zaragoza	232
9.3.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Zaragoza	235
9.4. Estudio financiero de la operación actual vs. la operación futura en la zona minera de Zaragoza	235
9.4.1. Resultados de la operación actual del beneficio de oro en la zona minera de zaragoza	236
9.4.2. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura	238
9.4.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura de la zona minera de Zaragoza	238
9.5. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Zaragoza	239
9.6. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Zaragoza	240

10. GLOSARIO

11. 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, en la que 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 o informalidad en la actividad minera.
- La necesidad de articulación entre los diferentes estamentos del Estado para la eliminación del uso de 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 mejorar las condiciones de vida.

En 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 el artículo 3.º 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 diversas actividades, entre las que se encuentran “generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología y recursos del subsuelo” e “integrar y analizar la información geocientífica del subsuelo”.

El SGC debe procurar el cumplimiento de sus objetivos y contribuir al desarrollo de las actividades contempladas en la Ley 1286 de 2009. Entre dichos objetivos cabe destacar la generación y el uso del conocimiento mediante el desarrollo científico y tecnológico, así como la innovación, como actividades esenciales para dotar de 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 este mismo sentido, le corresponde a la Dirección de Laboratorios del del SGC —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”, dirigir y realizar, entre otras, investigaciones asociadas con la caracterización, el procesamiento y la utilización de materiales geológicos.

Entre las funciones del Grupo de Trabajo de Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones, según la Resolución 128 del 8 de marzo del 2017, se encuentran las siguientes:

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

En el capítulo 7, numeral 7.2 del Plan Estratégico del Conocimiento Geológico del Territorio Colombiano (2014-2023), definido por el SGC, se establece, para la Dirección de Laboratorios, la tarea de realizar

investigaciones especiales, tales como la de beneficio de minerales y transformación de carbones, por lo que el laboratorio se concentra en la generación de estudios y el desarrollo de esquemas técnico-científicos, ambientalmente sostenibles, para el beneficio de minerales, como parte de la cadena de valor de la minería.

El Grupo de Trabajo Cali del SGC cuenta con una infraestructura tecnológica que incluye una planta piloto de beneficio de minerales, donada por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), que ha permitido la realización de estudios asociados al aprovechamiento sostenible de minerales auríferos, lo cual posibilita 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 SGC para la sustitución del mercurio se define experimentalmente en la evaluación de las condiciones de las operaciones y los procesos metalúrgicos que correspondan, según las características mineralógicas de los depósitos.

En este contexto, entre el SGC y el Ministerio de Minas y Energía se suscribió el Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, que tiene por objeto:

Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para identificar y analizar las características de los yacimientos y los procesos de beneficio asociados a esos yacimientos en cinco (5) distritos mineros, correspondientes a los departamentos de Cauca, Bolívar, Córdoba, y Antioquia, con el objetivo de realizar documentos técnicos que permitan orientar a la población minera frente a las operaciones de recuperación del mineral aurífero sin el uso del mercurio, en el marco de la Ley 1658 de 2013.

Para el desarrollo del proyecto se ha contado con la participación de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, mediante la suscripción del Convenio Especial de Cooperación 19 de 2018 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, para la evaluación mineralógica, metalúrgica y ambiental de depósitos minerales en el país. 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, 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 permiten dilucidar la paragénesis del depósito. También se suscribió el Convenio Especial de Cooperación n.º 25 de 2018, con la Universidad de Caldas, con el propósito de contar con información petrográfica requerida para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

La presente guía se realiza con el fin de establecer las características mineralógicas de la zona minera de Zaragoza (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.

“Entre el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía se suscribió el Convenio Interadministrativo GGC n.º 319 de 2018, que tiene por objeto “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para identificar y analizar las características de los yacimientos y los procesos de beneficio asociados a esos yacimientos en cinco (5) distritos mineros, correspondientes a los departamentos de Cauca, Bolívar, Córdoba, y Antioquia, con el objetivo de realizar documentos técnicos que permitan orientar a la población minera frente a las operaciones de recuperación del mineral aurífero sin el uso del mercurio”

1. MARCO DE REFERENCIA

Atardecer en el Río Nechí, municipio de Zaragoza (Antioquia).
Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano





1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El Municipio de Zaragoza fue fundado en 1581 por Gaspar de Rodas conquistador español y según registros históricos desde esa época en las vegas del río Nechí había actividad minera de oro realizada por tribus indígenas en la región, posteriormente por las comunidades afrodescendientes asentadas en la zona.

La Minería de oro y plata en el Municipio son la base de la economía, otras actividades económicas desarrolladas son: la ganadería, cultivos de pancoger como de yuca, maíz y arroz, semi industriales como caucho y madera, la economía de los asentamientos urbanos prima el comercio básicamente alrededor de la minería y la agricultura.

El Municipio de Zaragoza esta regado por los ríos Nechí y Porce, los cuales han sido explotados mediante dragado a lo largo de los años para la consecución del oro por parte de empresas y mineros informales. También se ha desarrollado la minería de barequeo en estos ríos y en pequeños afluentes que se encuentran en el territorio, así como la explotación de oro en terrazas aluviales y explotación de oro de veta en minas subterráneas. En el municipio se encuentran alrededor de 161 explotaciones identificadas por la administración municipal, pero se considera que puede haber más.

Las explotaciones mineras a lo largo del río Nechí y alrededores han dejado grandes acumulaciones de material aluvial (tipo cargueros) en las márgenes de las fuentes hídricas, lo cual conlleva a que se presente alteraciones ambientales; además de la contaminación de las fuentes hídricas con el mercurio que es utilizado principalmente en la recuperación del oro libre tanto en la minera de aluvión como en la minería de veta (o filón). Las empresas mineras más grandes realizan acciones de mitigación de impactos ambientales en las explotaciones y controles en los procesos de beneficio como piscinas para relaves piscinas de sedimentación, pero el problema se presenta en la acumulación a través de los años de mercurio debido a su uso generalizado. Las veredas que presentan actividad minera en el municipio son Porce Medio, El Saltillo, Caná Medio, El Veinte, La Aurora, Bocas de Caná, La Clarita, La Porquera, El Retiro, El Aguacate, Limón afuera, Limón Adentro, Pueblo Nuevo, San Antonio, La arenosa, Playa Evarista, La Raya, El Pato, Naranjal la Tolva, Naranjal Río, Naranjal Lapida, Chilona el Salto, Cordero Icacales, La Ciénega, Caño la 3 Caño la 8, Quinientos Cinco y Tosnovan 2 (Plan Desarrollo, Zaragoza 2012-2015).

En Zaragoza se presentan 87 títulos mineros de los cuales su objetivo principalmente es para para explotación y explotación de minerales metálicos, oro, plata y sus concentrados. Algunas de las empresas que cuentan con títulos mineros en el Municipio de Zaragoza son las siguientes: Mineros S.A., Four Points Mining S.A.S, World Mining Corporation, Minerales Otu SAS, Minas La Candelaria S.A.S, Recursos Aluviales S:A:S., Grupo Bullet S.A.S., Sociedad Minera Grifos S.A. Continental Gold Limites Sucursal Colombia, Cooperativa de Mineros del Nordeste Antioqueño, Sociedad Colombiana de Minas Andinas S.A, Midrae Gold S.A.S, Trident Gold North Easth Antioquia S.A.s, Minas La Candelaria S.A.S, entre otras. También se reportan 43 solicitudes mineras y 14 solicitudes de legalización de minería de hecho. Además, de contar con proyectos mineros, en el territorio se encuentran dos zonas de protección ambiental como son la Reserva Forestal Ley 2 de 1959 Río Magdalena y la Reserva Natural Zona de Amortiguamiento Reserva Natural Bajo Cauca-Nechí. (Secretaría de Minas de Antioquia, 2017. Mapa Minero).

Dentro de la jurisdicción del municipio, se cuenta con una zona minera especial de comunidades afro descendientes por la cual se establece y delimita la Zona Minera Especial del Consejo Comunitario de Porce Medio, en los municipios de Anorí, Zaragoza y Amalfi, departamento de Antioquia. Otorgado mediante Resolución 283 de 2017. (Biblioteca Jurídica, Municipio de Antioquia, 2019).

La producción de oro que aporta el Municipio de Zaragoza es muy importante tanto para el Departamento de Antioquia como para el País, como lo demuestran las siguientes estadísticas, “en promedio, en los últimos cinco años, la participación de Antioquia en la producción de:

- Oro del país fue de 43,52%.
- Plata del país fue de 63,22%.
- Platino del país fue de 1,14%.
- Carbón del país fue de 0,24%.

- Materiales de construcción fue de 3,31%.
- Arcillas del país fue de 5,91%.
- Calizas del país fue de 5,85%.

La producción de oro de Antioquia proviene principalmente de los municipios de El Bagre, Segovia, Caucaasia, Zaragoza y Taraza; producción de plata en los municipios de Segovia, Zaragoza, Zaragoza, El Bagre, Caucaasia y Buriticá en plata; Mutatá, Cañasgordas, Vegachí, Amagá, Frontino y Caucaasia en platino; Amagá, Titiribí, Fredonia y Angeolópolis en Carbón; Sonsón, San Luis, Amalfi, Abejorral, Maceo, Montebello y San Carlos en calizas; Girardota, Bello, Medellín, Sopetrán, Mutatá y El Retiro Materiales de construcción”(ANM,2017, Bullets Antioquia).

“Según el informe de producción de minerales del Ingeominas, en el año 2011 el Departamento de Antioquia se consolidó como el primer productor de plata del país y el segundo productor de oro después del Chocó, el cual produjo 27.915 Kg. En su mayoría, el mineral (oro) provino de los municipios de: Tarazá (4.812 Kg), El Bagre (2.997 Kg), Cañasgordas (1.771 Kg), Nechí (1.619 Kg), Zaragoza (1.329 Kg), Zaragoza (1.143 Kg), Segovia (1.409 Kg), Caucaasia (1.232 Kg) y Angostura (1.214 Kg)”. (UNAL, sede Medellín, 2013)

En la región del bajo Cauca en donde se presenta: una ilegalidad que alcanza el 97% de las pequeñas unidades mineras, lo que implica que las operaciones mineras no tengan: estudios técnicos (96%), no implemente estándares de seguridad industrial y salud minera (90%), ni cuenten con licencia ambiental o con plan de manejo ambiental (97%). (Uniminuto, 2018)

Como es de suponer, estas operaciones ilegales tienen un impacto negativo sobre los ecosistemas, siendo uno de la más perjudiciales el uso generalizado de mercurio para la recuperación del oro, esta práctica genera mayor riesgo para la salud de las personas involucradas directamente en las labores de extracción y/o comercialización debido principalmente a la manipulación del oro amalgamado; también crea un efecto negativo en las personas del entorno debido al efecto residual y acumulativo del mercurio en el medio ambiente (Uniminuto, 2018).

La ilegalidad minera es un tema social relevante debido a que de la actividad minera se deriva el sustento diario de muchas familias, por ende, es posible afirmar que dicha ilegalidad es un problema cultural y del Estado. Una pérdida económica departamental de recursos por la evasión en el pago de las regalías (Villa y Franco, 2013). En cuanto a la poca educación formal, el censo minero muestra que, en el departamento de Antioquia, del total de mineros censados, el 8% son analfabetas, el 68% solo cursaron la primaria, el 19% la secundaria y solo el 5% son técnicos o profesionales (Minminas, 2012).



Fotografía 11. Indicaciones al equipo técnico del SGC sobre las actividades mineras. Fuente: autores.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD



Fotografía 1.2. Mercurio utilizado para amalgamación. Fuente: autores.

El Estado colombiano, atendiendo a un claro compromiso por la preservación de la salud humana y por la mitigación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas que no cumplen plenamente los estándares que rigen en 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”. El alcance y propósito de la norma, entre otros, es la eliminación total del mercurio en el proceso de beneficio del oro, estableciendo 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.

Como complemento a ello, 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 gradual y definitivamente el uso de mercurio en el sector minero e industrial de Colombia. Dicho plan fue adoptado y acordado entre los siguientes ministerios: Ambiente y Desarrollo Sostenible; Minas y Energía; Salud y Protección Social; Trabajo; Comercio, Industria y Turismo; Relaciones Exteriores; Agricultura y Desarrollo Rural; Transporte; y 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 gestión de información. Asimismo, se requiere que la industria minera que opera en todo el territorio nacional conozca dicha política. Se trata de un esfuerzo conjunto entre los distintos niveles de Gobierno: el sector minero, el industrial, el comercial, el ambiental, el de la salud, el del trabajo y la sociedad civil en general, para cumplir con los compromisos nacionales e internacionales 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 SGC, trabajaron de manera coordinada en el diseño y concertación del *Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio de la actividad minera* (MinMinas, 2016). Este se desarrolla con objetivos específicos que contribuyen claramente al cumplimiento de las metas establecidas en los cuatro grandes programas del Plan Único Nacional: 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.

En el marco del eje “Gestión del conocimiento-investigación aplicada” del *Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio* en la actividad minera, cabe resaltar los siguientes objetivos específicos:

- Ampliar, masificar y promover el uso de tecnologías limpias para la pequeña minería.
- Apoyar proyectos de investigación que generen nuevas técnicas para la recuperación de oro sin uso de mercurio.
- Documentar experiencias exitosas en transferencia de tecnología que permitan la eliminación del uso de mercurio en los procesos de beneficio de oro, pues estos se enfocan en la promoción de nuevas alternativas para la producción más limpia del 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 relacionados con las temáticas técnicas. 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 utilizar mercurio. Esto es posible mediante la formulación e implementación de procesos verdes y 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.

En el 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 debilidades en materia de eliminación de uso de mercurio en que incurren los mineros, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Falta de conciencia sobre la problemática ambiental originada en el uso de mercurio, toda vez que realizan sus actividades mineras con limitada asistencia técnica y con poca planificación, lo que no permite mantener índices de productividad y de sostenibilidad adecuados. Esto 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 los vertimientos mezclados con sustancias contaminantes, como el mercurio, son descargados en las corrientes hídricas que surten a los acueductos regionales.

En el marco del plan estratégico se busca que exista una concertación con las comunidades para producir el cambio partiendo de procesos de comprensión profunda, relacionados con las temáticas geocientíficas e ingenieriles. Es por ello, que se propuso 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, partiendo del entendimiento geometalúrgico.



Fotografía 1.3. Bocamina y empleado de mina Pisones. Fuente: autores.

- Desconocimiento de alternativas de tecnologías más limpias para recuperación del metal sin recurrir al mercurio.
- - Desconocimiento científico, en particular acerca de las condiciones geoquímicas de los depósitos auríferos, al igual que de las características geológicas, mineralógicas y metalogenéticas propias de cada una 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 una metodología de beneficio más eficiente y adecuada, lo cual actualmente puede generar menores ingresos a los mineros y causar un mayor impacto ambiental.

Dadas las razones expuestas, el Estado y el Ministerio de Minas y Energía han reconocido la necesidad de fomentar alternativas tecnológicas de producción más limpia para los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso de mercurio en zonas mineras de producción activa. Para ello, se requiere del conocimiento especializado de entidades y grupos de investigación reconocidos, y se estima que el Servicio Geológico Colombiano, junto con algunas universidades, son las instituciones idóneas para dar cumplimiento a los objetivos de este proyecto. Se propone, por tanto, la realización de dicho proyecto para generar conocimiento científico y tecnológico aplicado al mejoramiento productivo del beneficio de oro con tecnologías de producción más limpias, que prescindan del 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 con la comunidad minera para motivar su aplicación e implementación, lo que permitirá que el conocimiento adquirido contribuya 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.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar la guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio en la zona minera de Zaragoza (Antioquia), con el fin de generar conocimiento geometalúrgico que permita el mejoramiento productivo del beneficio de oro en la pequeña minería en Colombia.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el reconocimiento geológico de la zona minera de Zaragoza haciendo énfasis en zonas y estructuras mineralizadas y de extracción activa, para lo cual se recogerá información de dichas estructuras, se medirán datos estructurales y se tomarán muestras de roca.
- Realizar la caracterización química y mineralógica de la mena para identificar su composición, asociaciones minerales, texturas, tamaños de grano, metalogénesis y la existencia de oro en la veta, para establecer un adecuado beneficio del mineral aurífero.
- Llevar a cabo pruebas metalúrgicas para definir la efectividad de los procesos actuales de beneficio y, con base en la información de caracterización del depósito, proponer una ruta metalúrgica adecuada para el procesamiento y recuperación del oro.
- Realizar ensayos ambientales que permitan identificar los riesgos asociados a la toxicidad de relaves y plantear metodologías que permitan el control y la prevención de impactos negativos sobre el medio ambiente.
- Definir la viabilidad financiera y económica de la implementación de la propuesta de uso de tecnologías limpias para sustituir el mercurio en el proceso de beneficio de oro en la zona minera de Zaragoza.

1.4. ALCANCE

Esta guía metodológica propone procesos de producción más limpia, sin uso de mercurio, mediante alternativas tecnológicas que permiten un mejor aprovechamiento del mineral, así como una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de beneficio. Lo anterior, fundamentado en la profundización del conocimiento geológico, metalogenético, mineralógico, metalúrgico y físico-químico de los depósitos minerales aprovechados por las unidades de beneficio de la zona minera de Zaragoza y la aplicación de este conocimiento en los procesos de beneficio del oro, con el objeto de evitar el impacto sobre el medio ambiente. No obstante, se tendrán en cuenta los procesos metalúrgicos y operaciones unitarias utilizados actualmente por los mineros de la región, para finalmente proponer una ruta metalúrgica que permita un mejoramiento de los procesos productivos sin el uso de mercurio.

La guía comprenderá ocho capítulos: 1) Marco de referencia, 2) Metodología de trabajo, 3) Características de la zona, 4) Aspectos geológicos, 5) Aspectos mineros, 6) Aspectos metalúrgicos, 7) Aspectos químico-ambientales, 8) Ruta metalúrgica propuesta para la zona minera y 9) Estudio económico y financiero.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Toma de muestra en cancha de relaves de la zona minera de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano



2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El primer paso en la metodología de trabajo consiste en 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. Este proceso tiene como propósito 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 reconocimiento geológico de la zona, revisión de los procesos de beneficio de oro y toma de muestras.

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

1. Muestras de zonas mineralizadas: muestras de roca en vetas y en zonas de respaldos.
2. Muestras en plantas de beneficios: material de cabeza y material de salidas de las diferentes operaciones unitarias practicadas en el beneficio.
3. Muestras de relaves: mechazos o colas provenientes de los diferentes procesos.
4. Muestras en sedimentos y quebradas: este proceso tiene por objeto identificar los posibles elementos que están pasando al medio ambiente luego de la finalización del 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 practicarían. Con este fin se procedió a preparar las muestras y a iniciar los análisis de petrografía, caracterización mineralógica y composición química. Este proceso condujo a realizar un diagnóstico mineralógico y metalúrgico, ya que es el pilar para desarrollar la propuesta de ruta metalúrgica eficiente y ambientalmente sostenible para aplicar en la zona.

Los procedimientos analíticos aplicados fueron los descritos a continuación:

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 metalográfico.

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 (EAA).
- 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.

Análisis metalúrgicos

- Ensayo de concentración gravimétrica, mesa Wilfley.
- Concentración por flotación.
- Cianuración.

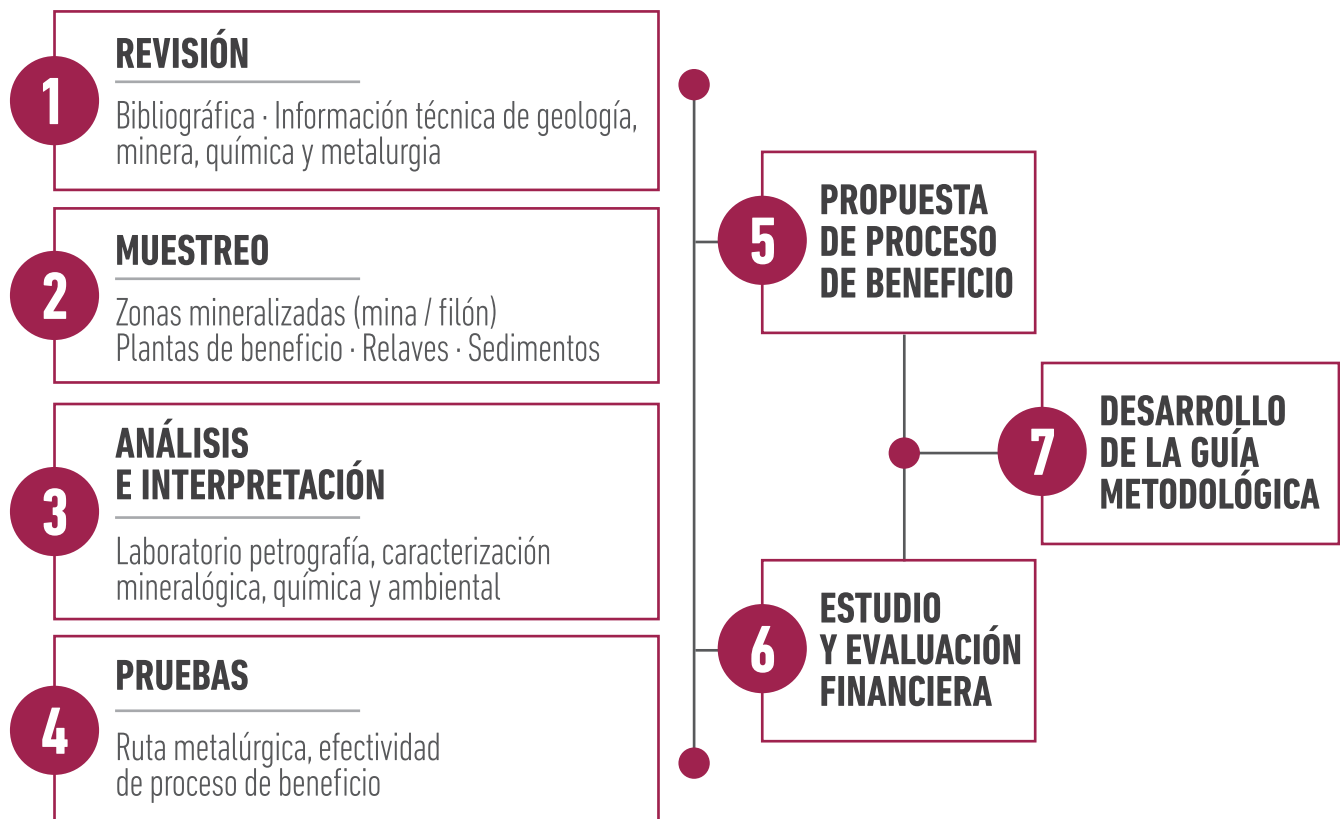
2.4. PRUEBAS

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 aplicaría.

2.5. PROPUESTA RUTA METALÚRGICA

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

Figura 2.1. Diagrama de metodología de trabajo. Fuente: autores.





3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Conocer las generalidades de la zona de estudio 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.

Iglesia del parque central de municipio de Zaragoza (Antioquia).
Fotografía tomada por Jaime Mojica, Servicio Geológico Colombiano

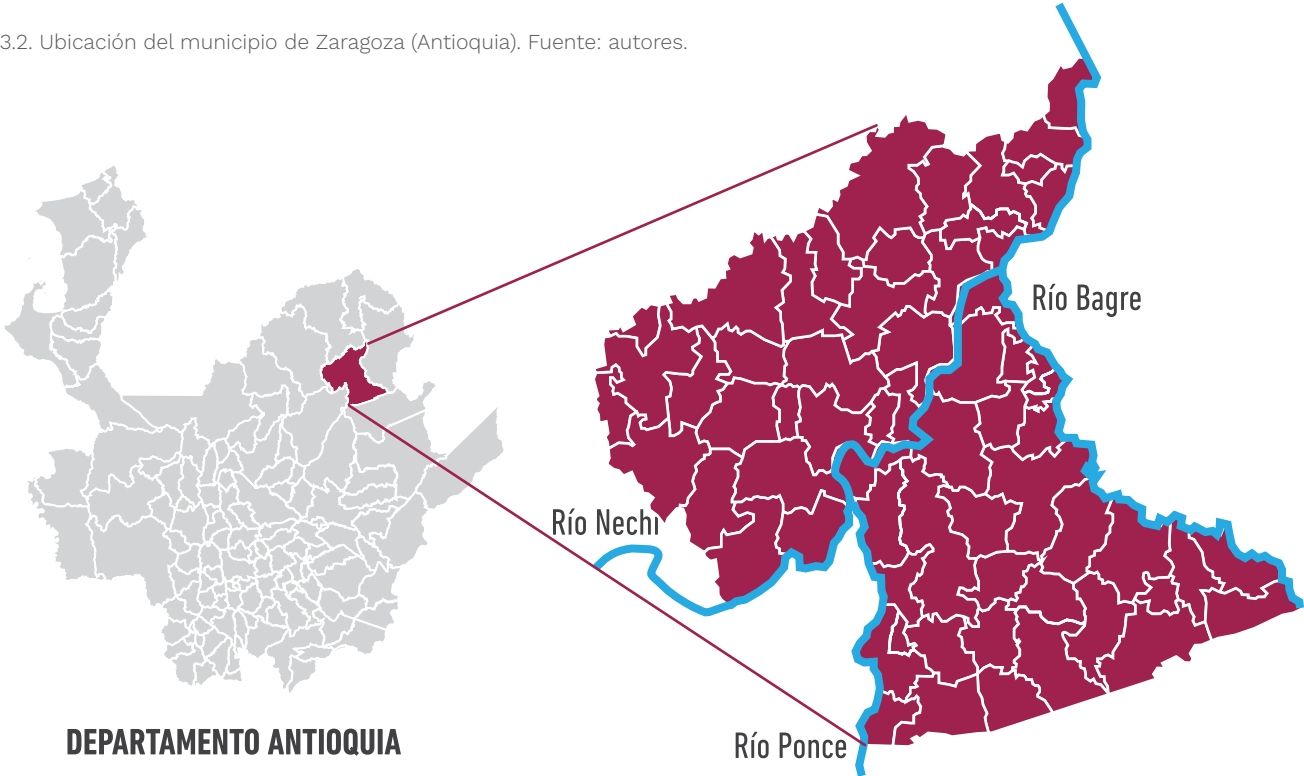


3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Figura 3.1. Ubicación Geográfica del municipio de estudio. Fuente: autores.



Figura 3.2. Ubicación del municipio de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.



3.2. MUNICIPIO DE ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

Economía: En la década del setenta, con el aumento del precio del oro en el mercado internacional por encima de los 100 dólares la onza, enfocó la economía de Zaragoza en la actividad minera, la cual atrajo mineros de diversos lugares del país y relegó las actividades agropecuarias a un segundo plano.

En la actualidad se desarrollan proyectos agrícolas de pequeña y mediana escala, cultivos como arroz, Maíz, Yuca y Plátano son los principales y sirven de abastecimiento a los pobladores de la zona.

La minería ha sido el sector de la economía que ha jalonado, en gran medida, el desarrollo y progreso del municipio de Zaragoza; aunque la producción de oro cobra gran importancia en la generación de empleo y la reactivación de la economía local y regional, no se puede ocultar que esta actividad se viene practicando de manera desmesurada, ocasionando consigo problemas de tipo socioeconómicos y ambientales.

Medio Ambiente: La topografía del municipio de Zaragoza el ligeramente quebrada hacia el occidente y plana hacia el norte y el oriente, se encuentra ubicado entre la serranía de Sacramento y el cerro Blanco; sus principales cuencas hidrográficas son el río Nechí, Porce, Bagre, Pocune, tigüí y Cana, además de recibir las aguas de numerosas quebradas, entre ellas la quebrada Oca, la cual destaca por venir siendo gradualmente afectada por la “fiebre del oro” luego de ser un importante punto de encuentro turístico en la región.

Localización:

7°29'23" de latitud norte
74°52'03" de longitud oeste

Extensión:

1.064 km²

Altitud de la zona urbana:

50 m.s.n.m.

Temperatura promedio:

36 °C

Límites:

Por el norte con Caucasia, por el sur con Segovia y Anorí, por el occidente limita con Cáceres y por el oriente con el municipio de El Bagre.

La subregión del Bajo Cauca es la segunda con mayor cantidad de bosques en el departamento de Antioquia, no se cuenta con la presencia de grandes empresas extractoras de madera, pero sí con parceleros, los cuales enfocan el uso del suelo a actividades agropecuarias.

Población: En las 4 últimas décadas el municipio ha mostrado una evolución importante en su dinámica poblacional, los procesos de poblamiento de la localidad obedecen en gran parte a las fluctuaciones de la explotación del oro y a la variación de los precios de éste en el mercado internacional. Para los dos últimas décadas se presenta un aumento muy importante de población, después de haber sufrido un descenso significativo a comienzos de la década de los setenta. La población del municipio es de 32.265, según las estimaciones de población del DANE para el año 2019, distribuidas en 14.614 en la cabecera y 17.651 para la zona rural.



Fotografía 3.1 Bocamina en la zona minera de Zaragoza. Fuente: autores.

3.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de interés se encuentra localizada en el departamento de Antioquia, en la región Noreste, en jurisdicción del municipio de Zaragoza, en la cuenca alta de los ríos Pocuné (quebrada El Cristo), Caná (quebrada Clarita), Nechí (río Caná, quebradas Juan Vara, La Arenosa y Sardinas) y Tigüi (quebrada San Pedrito) extremo norte de la Cordillera Central, en alturas que van desde los 75 m s. n. m. en la quebrada San Pedrito (mina La Ye), hasta los 500 m s. n. m. al oriente de las minas Los Pisones y La Gallineta. Esta área comprende los depósitos minerales pertenecientes al distrito minero de Zaragoza del Mapa Metalogénico de Colombia y corresponde con las planchas topográficas 94-IV-C, 106-II-A, y 106-II-C a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Adicionalmente por vía aérea se accede desde Medellín al aeropuerto de El Bagre, mediante vuelos de la empresa ADA (Aerolíneas de Antioquia) y desde allí por vía fluvial a través del Río Nechí.

3.2.1. VÍAS DE ACCESO

Al área de estudio se accede desde la ciudad de Medellín, hacia el noreste por vía terrestre pavimentada, Medellín-Barbosa. Se sigue por la ruta nacional 62 hasta la Inspección de Policía de Porcecito, del municipio de Santo Domingo; a partir de este punto se toma la vía departamental hasta el sitio Candelaria, del municipio de Yalí (ruta 62A21). Luego, se avanza hacia el norte, por la vía Yalí-Vegachí (ruta 62AN215) hasta llegar al corregimiento La Cruzada. Después de pasar por Remedios, se toma al occidente por la vía Autopista Conexión Norte (en construcción) hasta el municipio de Zaragoza.

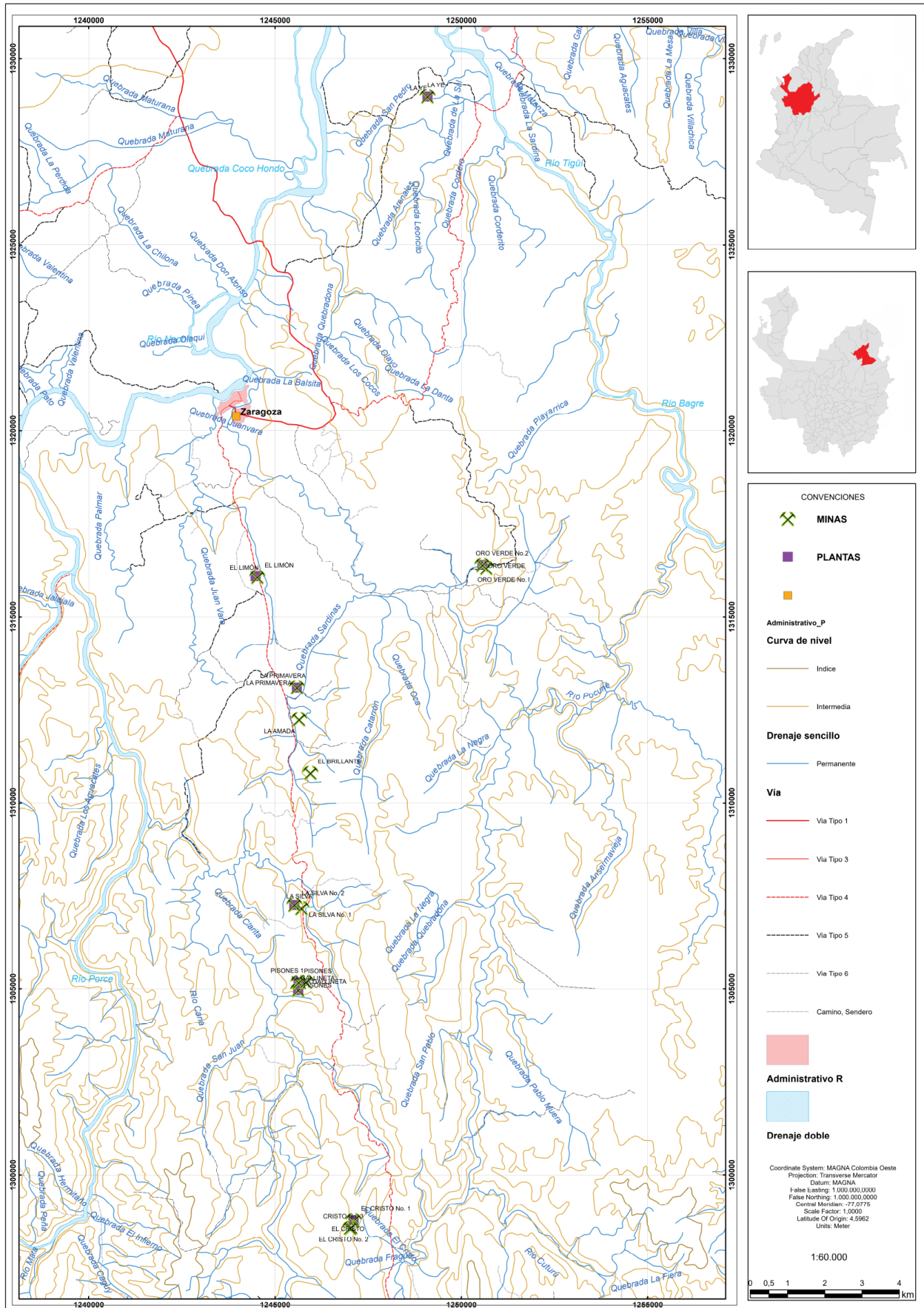
Otro acceso se hace por el municipio de Caucaasia desde el norte por la vía Autopista Conexión Norte (Pavimentada). Adicionalmente, por vía aérea se accede desde Medellín al aeropuerto de El Bagre, mediante vuelos de la empresa ADA (Aerolíneas de Antioquia) y desde allí por vía fluvial a través del río Nechí.

Adicionalmente por vía aérea se accede desde Medellín al aeropuerto de El Bagre, mediante vuelos de la empresa ADA (Aerolíneas de Antioquia) y desde allí por vía fluvial a través del Río Nechí.

3.3. UBICACIÓN DE LAS MINAS Y PLANTAS DE BENEFICIO

Las minas y plantas de beneficio visitadas en el municipio de Zaragoza se localizan en las veredas Naranjal (mina La Ye-Los Mangos), San Antonio (mina Oro Verde), El Limón (mina El Limón), La Porquera (minas La Primavera, La Amada y El Brillante), El Veinte (minas La Silva, Los Pisones y La Gallineta) y Fraguas (mina El Cristo) (figura 3.3.)

Figura 3.4. Localización de minas visitadas en el municipio de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.



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 estos, 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 estudiada. El capítulo pretende describir características mineralógicas obtenidas a partir de análisis petrográficos, de metalografía, análisis por microsonda electrónica (EPMA), espectroscopía infrarroja, 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 facilitarán la selección apropiada de procesos geometalúrgicos.

Detalle de veta de cuarzon y sulfuros incluidos en contraste con la roca caja en la mina El Limón Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Oscar Cardona, Servicio Geológico Colombiano

La zona aurífera de Zaragoza se localiza sobre el basamento de la cordillera Central de los Andes de Colombia, cuya evolución geológica incluye sucesivos procesos de acreción de bloques tectónicos contra el margen continental del Escudo de Guyana, con periodos de metamorfismo, magmatismo y sedimentación, sucesivos, desde el proterozoico. La mineralización se aloja a lo largo del sistema de fallas de Palestina (fallas de Otú y Nus), considerado como una gran sutura paleozoica que actúa como el límite entre rocas metamórficas (grupo Cajamarca-Valdivia) y rocas metamórficas Precámbricas (gneises cuarzo-feldespáticos y anfibolitas), mucho más antiguas y de afinidad continental (Aspen et al., 1987; Cáceres et al., 2003).

4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES

El escenario geológico de la parte más septentrional de Suramérica está enmarcado por una amplia zona de deformación conocida como el bloque Norandino, cuya configuración tectónica se debe a la colisión oblicua, con subducción y acreción de terrenos alóctonos oceánicos en sentido dextral, agrupados como el Reino Tectónico del Oeste (WTR). Allí interactúan los denominados terrenos San Jacinto, Sinú y Cañasgordas, en los cuales se localizan las mineralizaciones visitadas al sur de Puerto Libertador (Cediel et al., 2003; González, 2001).

Los terrenos oceánicos acrecionados del Cretáceo Superior están conformados por basaltos, sedimentitas y, en menor proporción, unidades vulcano-clásticas de la Formación Barroso, así como por turbaditas, chert y calizas de la Formación Penderisco. Discordantemente, afloran rocas sedimentarias cenozoicas consideradas como parte prisma acrecionario y se conocen como el Cinturón Plegado de San Jacinto al norte y Cinturón Plegado del Sinú al oeste.

Los terrenos oceánicos están adosados a la corteza continental, compuesta por rocas metasedimentarias paleozoicas del complejo Cajamarca. La margen de contacto entre ellos es la zona de falla Cauca-Romeral (Cediel y Cáceres 2000; Cediel et al., 2003; González & Londoño, 2002a, 2003; et al. Villagómez y Spikings, 2013). Las rocas de afinidad oceánica son intruidas por dioritas, tonalitas y stocks porfiríticos de composición intermedia y edad del Cretáceo Tardío, las cuales serían la fuente de las mineralizaciones de cobre, oro y plata presentes.

La geología es la ciencia que estudia el origen, la composición y la estructura del planeta Tierra, así como la evolución y los procesos que la han modificado desde su origen (cerca de 4.600 millones de años) hasta el tiempo actual. La parte sólida está compuesta por rocas cuya composición es variada, dependiendo de la profundidad y de los procesos tanto internos como superficiales en los que interviene. El interior de la Tierra se ha diferenciado en tres capas concéntricas principales, según características establecidas especialmente por métodos geofísicos, las cuales se describen en la figura 4.1.

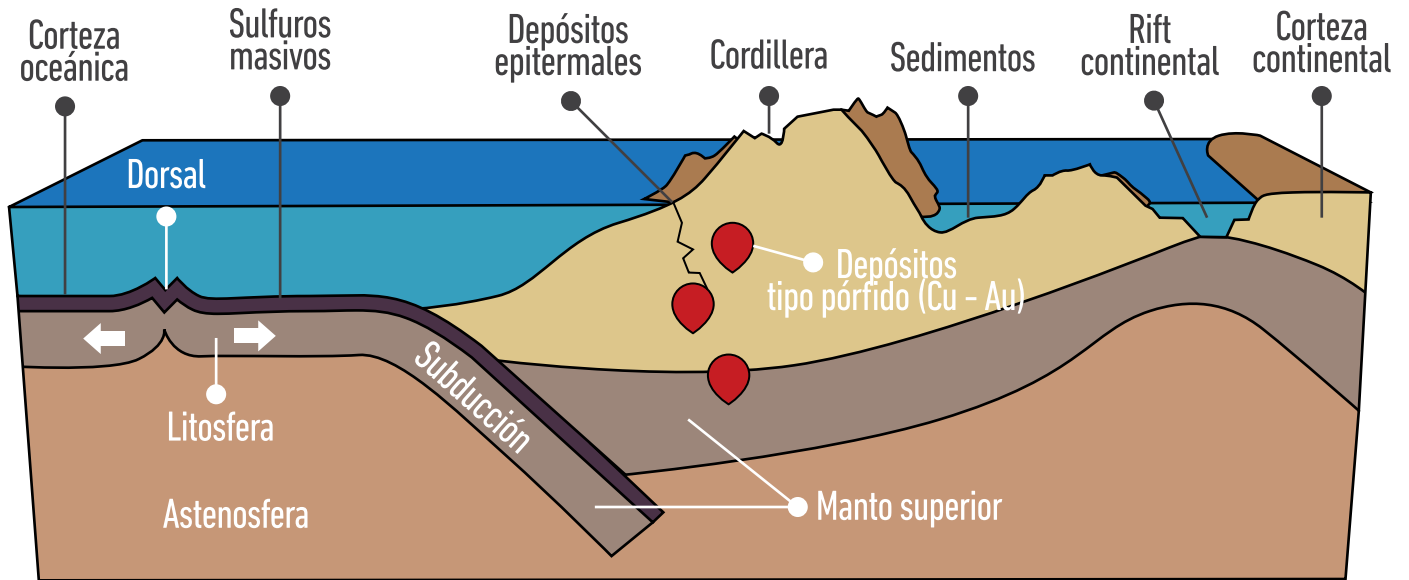
Corteza. Es la capa más externa de la Tierra, y en ella se encuentran concentrados los yacimientos minerales. Tiene una profundidad que oscila entre los 20 y 70 km bajo los continentes (corteza continental), y de 10 km bajo los océanos (corteza oceánica). La corteza oceánica es más densa que la corteza continental, y está compuesta principalmente por rocas básicas y ultrabásicas. La corteza continental 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 manto inferior y manto superior.

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

La dinámica de la Tierra se manifiesta con corrientes de convección formadas desde el interior del manto terrestre hacia la corteza, donde tiene lugar la ruptura de la corteza en fragmentos o retazos, soportados en el manto superior a través de una zona denominada astenosfera.

Figura 4.1. Depósitos auríferos y su relación con la tectónica de placas. Fuente: modificado a partir de Melgarejo J. et al., 1990.



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; además, son responsables de la generación de eventos sísmicos y del emplazamiento y acumulación de yacimientos minerales (sulfuros masivos, 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 (fragmentos de corteza terrestre) (figura 4.1).

4.1.1. GENERALIDADES DE YACIMIENTOS AURÍFEROS

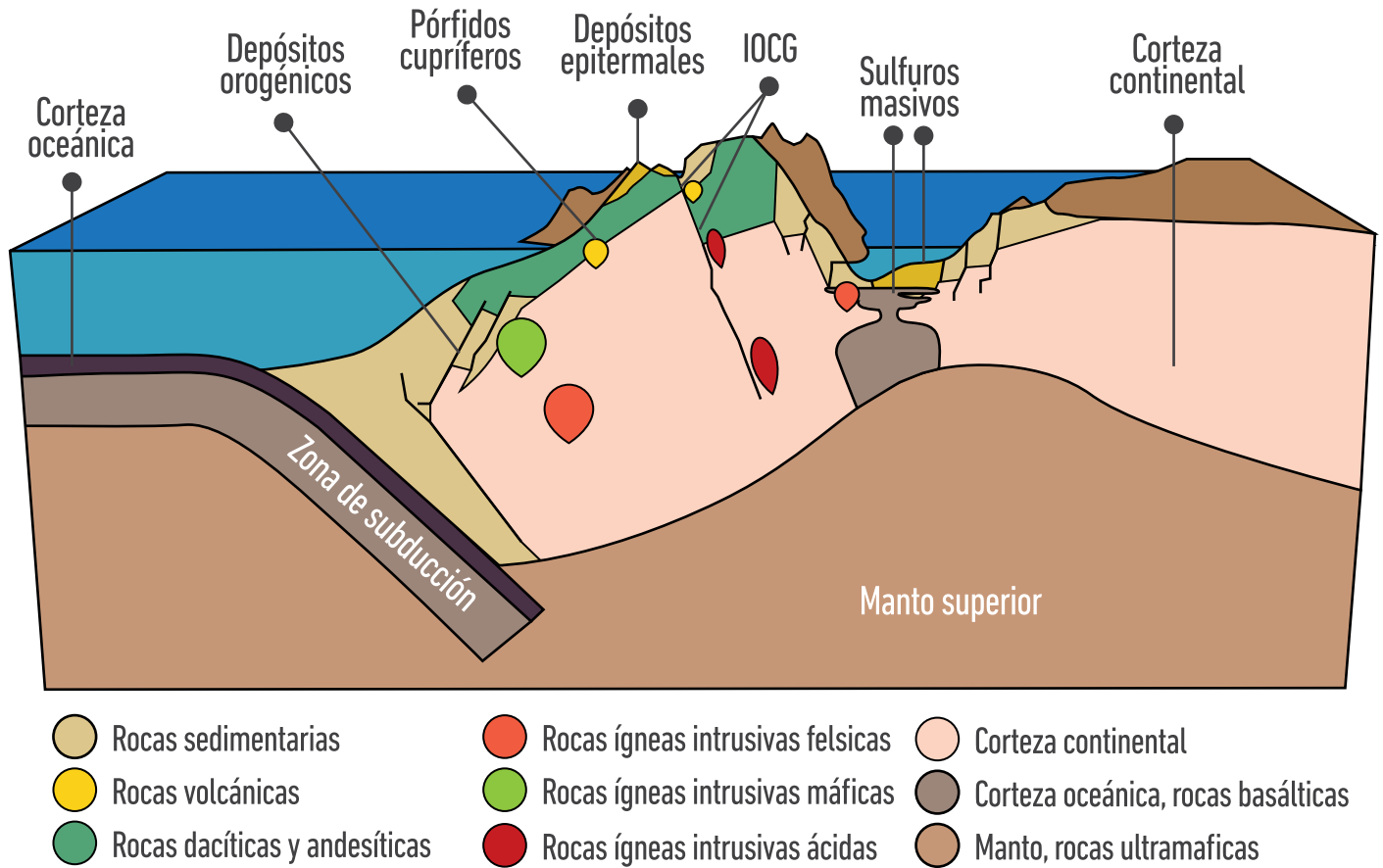
Un yacimiento mineral es la acumulación en superficie, o cerca de ella, de compuestos metálicos o no metálicos que, debido a su extensión, disposición o enriquecimiento, pueden recuperarse con beneficio económico. El oro es un metal precioso de color amarillo, brillo metálico, denso (19,3 g/cc) y blando (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 geoquímico, se considera que el oro es un elemento con movilidad restringida; se transporta en soluciones acuosas a través de complejos clorurados y sulfurados. Los fluidos involucrados en este proceso reaccionan con las rocas circundantes y permiten la removilización del oro en fluidos que viajan 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.

La posición tectónica de Colombia es estratégica y privilegiada porque tiene una gran variedad de ambientes favorables para la formación de depósitos minerales; corresponde con márgenes convergentes o márgenes activos donde tienen lugar la formación de montañas (cordillera de los Andes), actividad volcánica y sísmica y acumulación de minerales metálicos de Au, Cu, Pb, Zn, entre otros (figura 4.2).

Figura 4.2. Depósitos auríferos en ambientes compresivos de márgenes tectónicas activas. Fuente: modificado a partir de Lydon, 2007, en Godfellow, W. D. y Lydon, J. W. (2007).

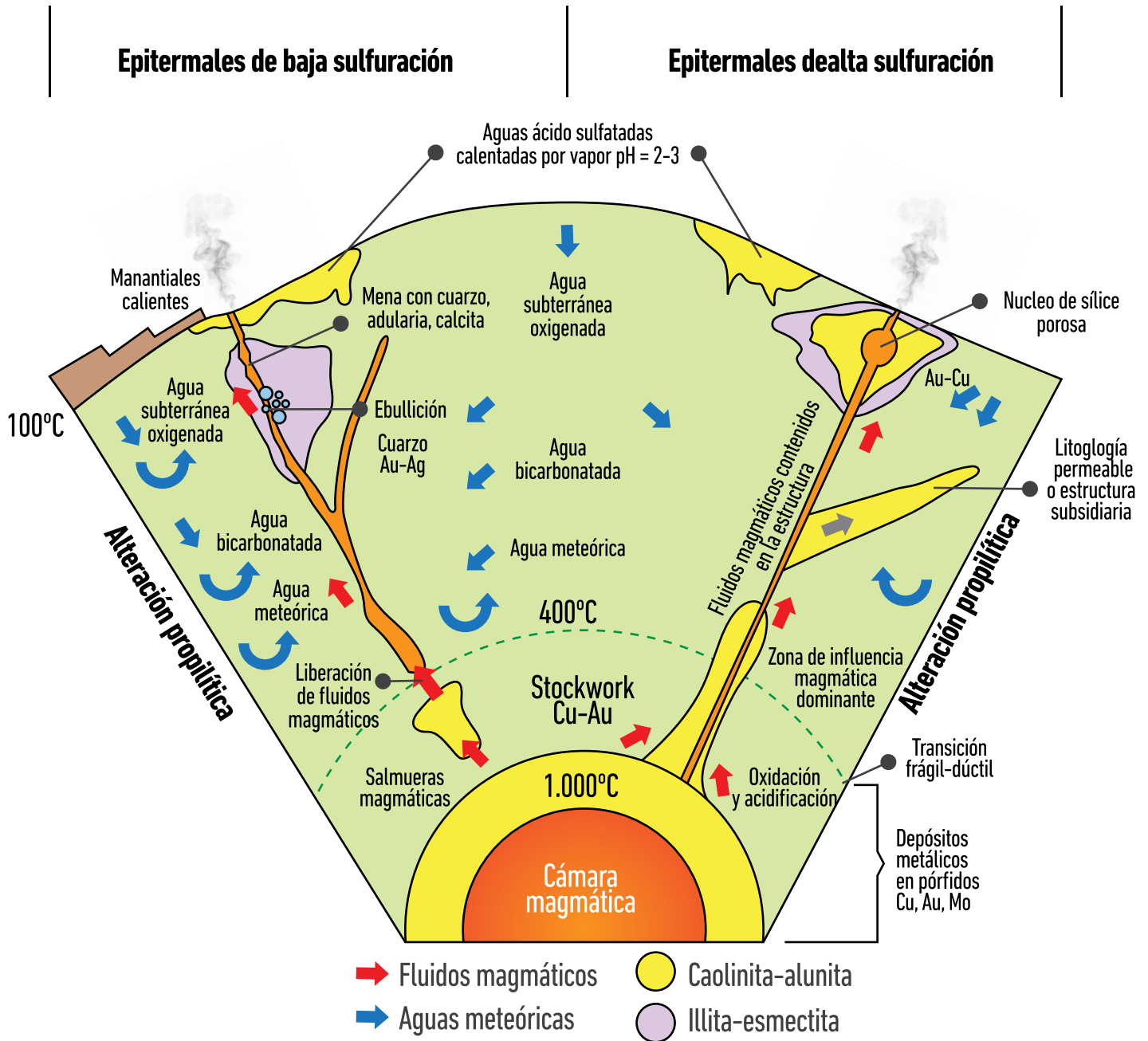


A continuación se mencionan y describen las generalidades de los principales yacimientos auríferos del mundo que han sido descritos, y los que han sido reconocidos en el territorio colombiano, o que tienen potencial en el país, dada la diversidad de ambientes de formación de yacimientos que se presentan:

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 de entre 1 y 2 km 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 H₂S (reducido), mientras que en los de alta sulfuración el azufre se presenta como S⁺⁴, en forma de SO₂ (oxidado). Se pueden destacar a escala mundial, como depósitos epitermales de alta sulfuración, 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, corresponde al tipo epitermal de alta sulfuración (figura 4.3).

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 a 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 diseminacio-

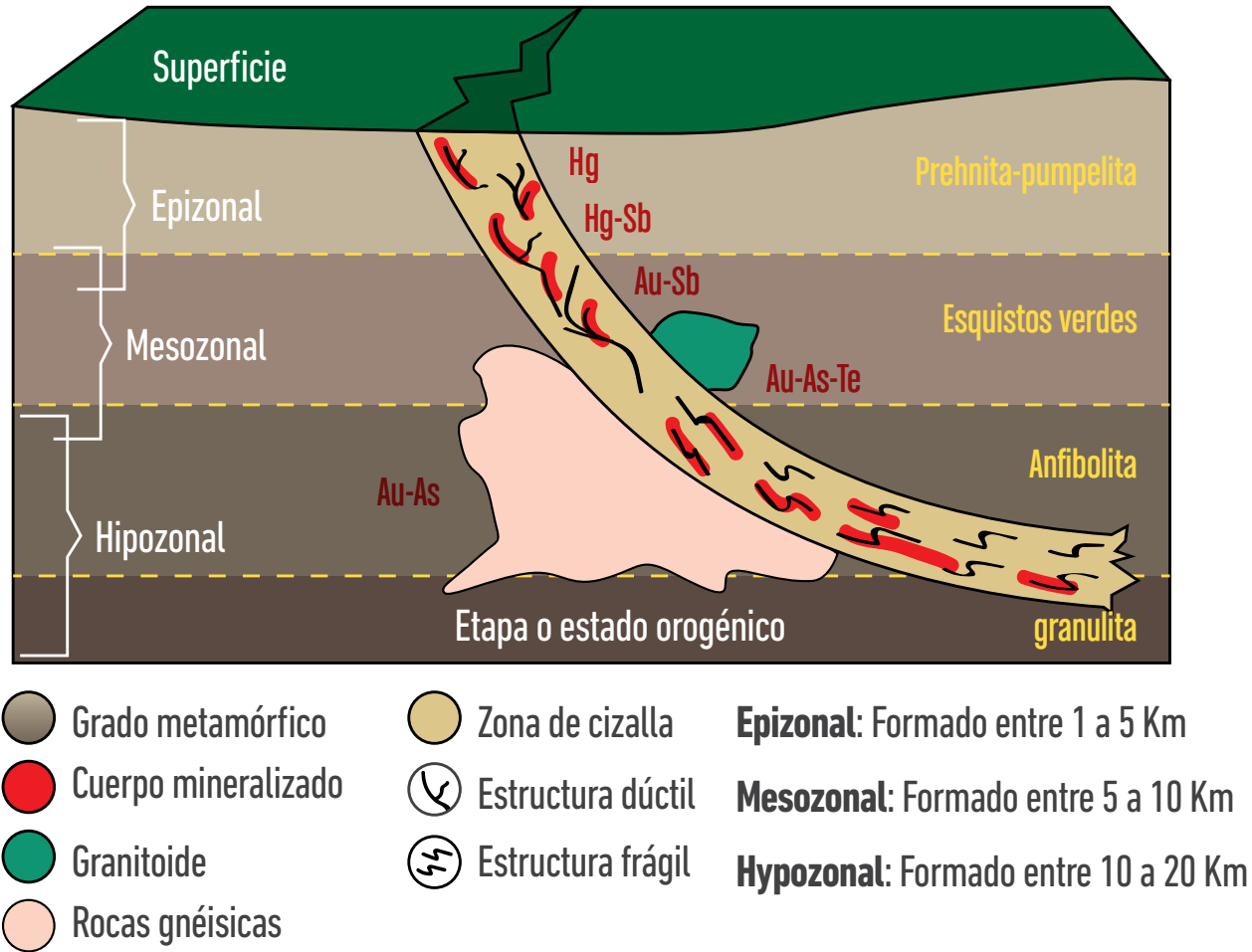
Figura 4.3. Modelo generalizado de formación de depósitos auríferos epitermales. Fuente: tomado de Camprubí et al., 2003.



nes. A escala mundial pueden citarse como ejemplos el depósito de Bajo la Alumbreira (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 ellos, por procesos hidrotermales, las sucesiones estratiformes o lenticulares vulcano-sedimentarias 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 Dovia (Valle del Cauca) y Anzá (Antioquia).

Figura 4.4. Modelo general de depósitos auríferos de tipo orogénico. Fuente: modificado a partir de Goldfarb, Groves y Gardoll (2001).



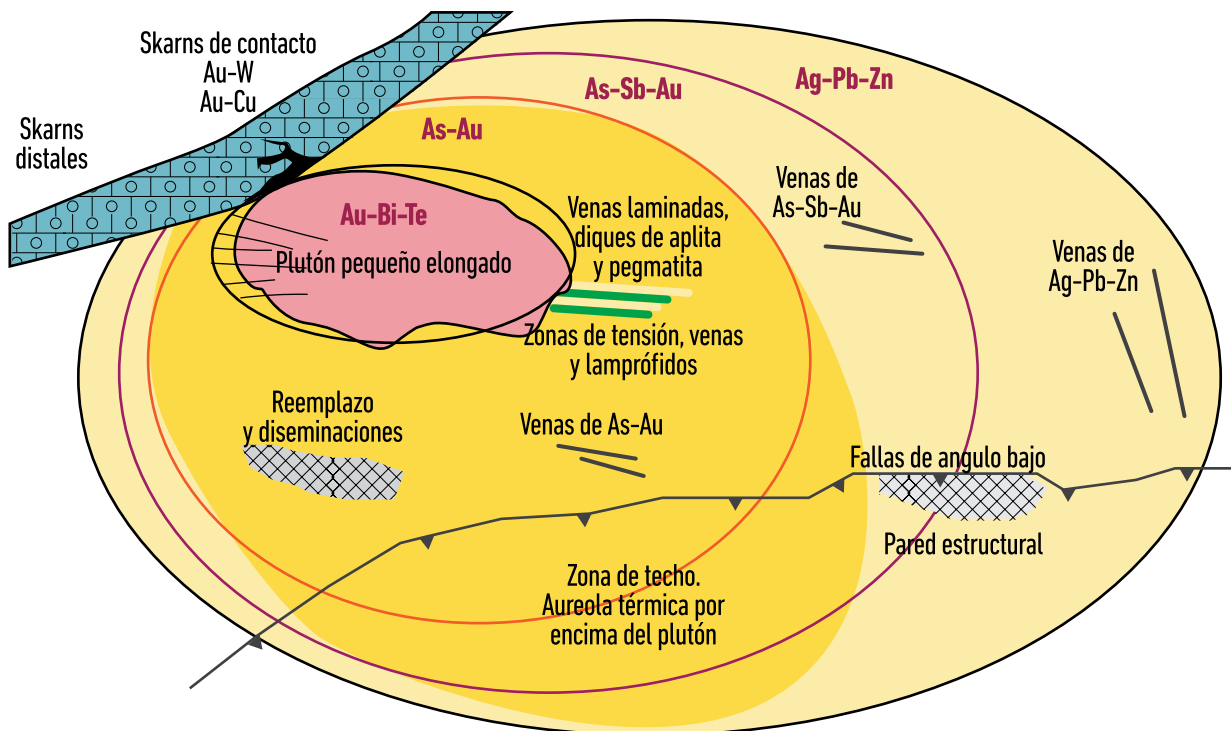
Depósitos orogénicos de oro. Son depósitos auríferos formados en zonas de fractura o de cizalla, que se producen por el transporte de metales en fluidos de origen metamórfico. Las condiciones de formación corresponden a ambientes sometidos a grandes esfuerzos tectónicos, como lo que se dan en cadenas montañosas en crecimiento y deformación. El depósito orogénico consiste en numerosas venas de cuarzo en relleno de fracturas, con contenidos bajos de sulfuros, dispuestos generalmente en bandas, y con contenidos variables de Sb, Bi, Te y Hg. La arsenopirita es el sulfuro dominante, mientras que la pirita o la pirrotina se encuentran subordinados; el oro se encuentra asociado con estos sulfuros. Los filones pueden tener extensiones de varios kilómetros y se distribuyen según la disposición estructural de las rocas hospedantes. En Colombia pueden citarse como ejemplos de depósito tipo oro orogénico, la zona minera de Amalfi (Antioquia), la mina El Vapor (Puerto Berrío, Antioquia) y la zona minera de Segovia (Antioquia), en la cordillera Central; de igual manera, en este trabajo, se reconoce que el yacimiento aurífero de la mina El Canadá, en La Llanada (Nariño), podría corresponder a un depósito mesozonal tipo orogénico (figura 4.4).

Depósitos de óxidos de hierro-cobre-oro (IOCG). Son depósitos auríferos formados en zonas de fractura o de cizalla de gran profundidad, que se producen por circulación de fluidos acuosos hipersalinos (>30% NaCl Eq) de alta temperatura de precipitación (500 °C). Están relacionados con la abundancia de magnetita-hematita y presencia de sulfuros de Fe y Cu y contenidos de carbonato, Ba, P o F. Se encuentran distribuidos a lo largo de la franja metalífera de los Andes chilenos; entre ellos sobresale el depósito de Candelaria.

Depósitos de oro relacionados a intrusivos (intrusion related gold deposits). Son depósitos auríferos que tienen un amplio rango de estilos de mineralización característicos espaciales, definidos a partir de un cuerpo magmático central. Depósitos de este tipo se han reconocido Fort Knox (Alaska) y la provincia de Tintina

(Canadá). En Colombia, varios distritos mineros han sido inicialmente clasificados en este grupo, como el depósito del cerro Gramalote (Antioquia) y el depósito de oro de la serranía de San Lucas (Bolívar) (Leal, Melgarejo y Shaw, 2011) (figura 4.5).

Figura 4.5. Modelo general de depósito aurífero relacionado con intrusivos (provincia de Tintina). Fuente: tomado de Hart et al. (2002).



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, por corrientes marinas, en zonas lacustres o por procesos coluviales de partículas minerales pesadas (densas), que son inertes ante procesos oxidantes minerales y que proceden de fragmentos líticos meteorizados. En Colombia los placeres auríferos recientes son muy importantes en la producción de oro. 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 existencia de paleoplaceres son depósitos de metaconglomerados con oro en la serranía de Naquén y Caranacoa (Guainía) y Taraira (Vaupés).

Otros tipos de depósitos. De acuerdo con 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, donde se produce metamorfismo de contacto, metasomatismo y acumulación de depósitos de metales (sulfuros de cobre, plomo y zinc; magnetita, molibdenita y oro como subproducto). En Colombia se destaca como un área potencial Mina Vieja y El Sapo (Tolima), asociadas con las calizas de la formación Payandé.

4.1.2. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES EN EL FRENTE DE MINA



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 ASOCIADOS A LA MENA



Pirrotita - Po (pirita magnética)

Fórmula: $\text{Fe}(1-x)\text{S}$
Dureza: 3,5-4,5 Mohs
Color: Bronce, marrón oscuro.



Esfalerita - Sp (sulfuro de zinc)

Fórmula: ZnS
Dureza: 3.5-4 Mohs
Color: varía entre amarillento y gris



Arsenopirita - Aspy (sulfuro de arsénico)

Fórmula: FeAsS
Dureza: 5,5-6 Mohs
Color: blanco a gris



Calcopirita - Cp (mena de cobre)

Fórmula: CuFeS_2 .
Dureza: 3,5-4 Mohs
Color: amarillo latón.



Pirita - Py (sulfuro de hierro)

Fórmula: FeS_2
Dureza: 6-6.5 Mohs
Color: amarillo latón.



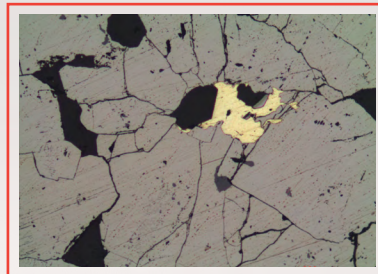
Galena - Gn (mena de plomo)

Fórmula: PbS_2
Dureza: 2,5 Mohs
Color: gris plomo

Sulfuros comunmente encontrados asociados en las menas auríferas. Fotografías tomadas de <https://llorensminerals.com>.

OCURRENCIA DE ORO EN LA MENA

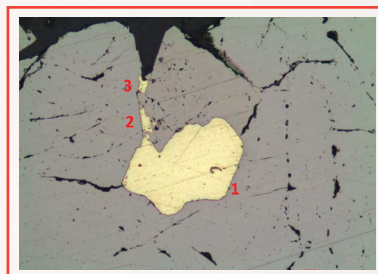
indica la forma, tamaño
y estructura como se
presenta el oro en la
mineralización



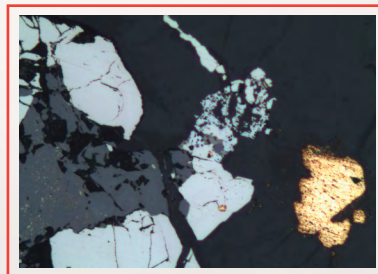
Oro asociado a pirita y cuarzo.



Oro libre.



Oro incluido en pirita y rellenando
fracturas.



Oro incluido en arsenipirita y libre.

4.2. GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

4.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

Para esta parte de la cordillera Central se presentan sucesivos eventos de acreción a la margen continental de rocas formadas por procesos orogénicos con magmatismo pericontinental, que se manifiesta con un magmatismo granitoide como los stocks del Carmen-El Cordero, los cuales están hospedados a lo largo de la falla Otú, en rocas de basamento denominado terreno Cajamarca-Valdivia. En el proceso evolutivo se presenta magmatismo calco-alkalino y vulcanismo asociado debido a una extensión regional ocurrida durante el Jurásico que dio lugar al batolito de Segovia y, posteriormente, a la depositación de sedimentitas marinas durante el Cretácico (Leal-Mejía, 2011; Leal-Mejía et al., 2018; Pindell y Kennan, 2009; Villagómez, 2010 et al.). Finalmente, procesos orogénicos terciarios han dado lugar a formación de rocas sedimentarias neógenas de origen continental, acumuladas al noroeste de Zaragoza (figura 4.6.).

4.2.1.1. GEOLOGÍA LOCAL

Las unidades geológicas predominantes en el área de estudio son esencialmente rocas metamórficas afectadas por segmentos del sistema de fallas de Palestina e influenciadas por rocas ígneas granitoides, cuyas características se describen a continuación.

Stock del Carmen. (Cdc)

El stock del Carmen (denominación informal propuesta por Leal-Mejía, 2011) de aproximadamente 20 km², aflora al sur del municipio de El Bagre y al nororiente del municipio de Zaragoza. Esta unidad se encuentra en contacto fallado con las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca a través de la falla Otú.

Se trata de un cuerpo de carácter félsico, de composición diorítica con textura ligeramente porfirítica y grano fino. La clasificación geoquímica corresponde a granitos tipo I, formados a partir de una fuente mantélica con poca contaminación de la corteza de acuerdo con los resultados de análisis isotópicos Sr-Nd (Leal-Mejía, 2011).

Complejo Cajamarca. (Tmg – Tme)

Compuesto por rocas metasedimentarias como cuarcitas, esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos negros asociados a filitas, esquistos cloríticos y actinolíticos, neises cuarzo-feldespáticos y localmente mármoles (González, 1980).

El Complejo Cajamarca agrupa el Grupo Valdivia (Álvarez et al., 1970; Hall et al., 1972) y el Grupo Ayurá Montebello (Botero et al., 1963), según la denominación propuesta por Maya y González (1995). La edad se puede establecer como pre-Albiano, debido a que se encuentra intruida por batolitos y cuerpos menores con edades de hasta 97 ± 10 Ma (Núñez, 2001). En diferentes localidades se han establecido edades por medio de dataciones radiométricas que abarcan desde 61 ± 10 Ma (Núñez, 2001) hasta 312 ± 15 Ma (Restrepo y Toussaint, 1988), que representarían un metamorfismo del Carbonífero. Las dataciones recientes indican una edad del Triásico para el último evento termal. Sin embargo, considerando que las edades radiométricas representan eventos termales que ha sufrido el Complejo Cajamarca posterior a su formación, la edad de cristalización debe ser anterior al Triásico.

Batolito de Segovia (Jdse)

Corresponde a un cuerpo magmático alargado en dirección N-S, con una longitud de 270 km y con un ancho en su parte central de 50 km. La roca presenta textura fanerítica equigranular de grano medio (Álvarez, 1983). Composicionalmente, está constituido por dioritas con variaciones a cuarzodioritas y cuarzomonzonitas macizas a ligeramente laminadas; cerca de los contactos tectónicos hay presencia de rocas protoclasticas (Ordoñez-Carmona et al., 2005). Se le asigna una edad de 160 ± 7 Ma por el método K/Ar en hornblenda (Feininger et al., 1972).

Basaltos y sedimentitas de Segovia (Kia)

En el centro del área se observa el conjunto volcánico-sedimentario ubicado entre el batolito de Segovia al oeste y el Neis de San Lucas al este. Está compuesto por lutitas carbonosas y calcáreas de color negro, generalmente bien estratificadas y con presencia de lentes de conglomerados y areniscas conglomeráticas, asociadas con rocas volcánicas afáníticas de composición andesita-dacita de color gris verdoso a verde claro, de carácter porfirítico y matriz microcristalina. La edad asignada para este conjunto se ubica entre el Jurásico Tardío y el Cretáceo Temprano.

4.2.1.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El sistema de fallas de Palestina es el elemento tectónico más importante del área, la interacción entre segmentos de este sistema —especialmente las fallas de Otú, el Nus y el Bagre— ha dado lugar a bloques tectónicos limitados por zonas de cizalla que, en conjunto y de acuerdo con sus características litológicas y genéticas, han permitido el emplazamiento de filones auríferos de gran importancia. El sistema de la Palestina es considerado una gran sutura paleozoica, la cual presenta variaciones en la dirección principal de los esfuerzos compresivos. Estudios recientes definen tres fases principales de deformación: una fase temprana asociada al emplazamiento de diques, una etapa de compresión N-S a NNE-SSW y una fase de compresión posterior a la mineralización orientada E-W a WNW-ESE.

Se han diferenciado 3 familias de fracturas: la más importante con dirección N-S, de extensión longitudinal, que abarca hasta decenas de kilómetros; a esta familia pertenecen las fallas de Otú, Nus y el Bagre; a este sistema se asocia la mineralización aurífera. Otro sistema corresponde a un conjunto de lineamientos en dirección noroeste y un tercer grupo a fracturas en dirección $N30^{\circ}$ - 40° E, consideradas como estructuras secundarias derivadas de la interacción entre las estructuras mayores.

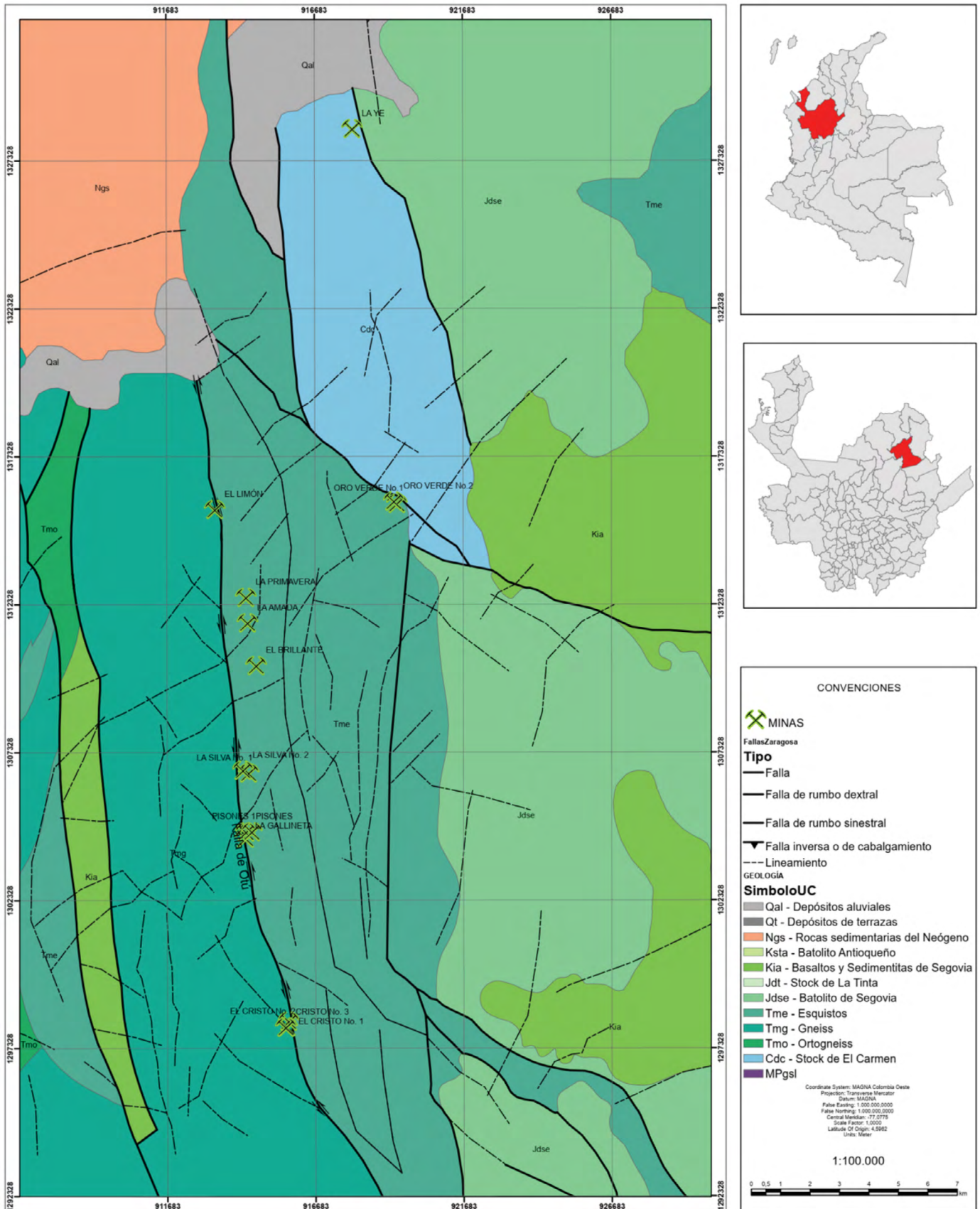
Uno de los principales rasgos geológicos es la falla Otú, de rumbo principal en dirección N-S a $N10^{\circ}$ W; ha sido interpretada como un posible límite de placa (e. g., González, 2001; Toussaint, 1993) que separa dos dominios geológicos: al occidente, gneisses cuarzo-feldespáticos y aluminicos con esquistos verdes (actinolíticos-cloríticos) y esquistos muscovíticos asociados al complejo Cajamarca, en el sentido de Maya y González (1995); y al oriente, gneisses cuarzo-feldespáticos, anfibolitas y mármoles agrupados como el Gneiss de San Lucas. El trazo de la falla Otú, cerca de Zaragoza tiene un rumbo N-S a $N30^{\circ}$ W y, junto a la falla Bagre, presentan una cinemática de carácter sinextral (Londoño et al., 2009).

La falla Nús es una estructura con dirección dominante $N20^{\circ}$ W a $N20^{\circ}$ E y buzamientos de 80° (Ramírez, 1985). Es una de falla de rumbo dextral con componente inverso, con una longitud conocida de 76 km (Feininger, 1972). Atraviesa los municipios de Vegachí, Remedios y Segovia, en dirección N-S.

La falla El Bagre presenta una dirección $N20^{\circ}$ E, con una inflexión hacia el norte en sentido $N10^{\circ}$ E. Presenta un movimiento lateral sinextral y un desplazamiento en rumbo interpretado de más de 50 km. Representa un ramal del Sistema de Fallas de Palestina.

En el presente trabajo, las observaciones estructurales muestran que las diferentes etapas de deformación generan estructuras con relleno de cuarzo sulfuros. La más importante tiene una tendencia N-S a $N10^{\circ}$ W, e inclinación al W variable mayor a 40° , a la que se asocian las minas El Limón —localizada al oeste de la falla Otú— y las minas La amada, El Brillante y La Gallineta —ubicadas al E de la falla—.

Figura 4.7. Mapa geológico estructural. Representación de lineamientos derivados de la interacción de fallas del sistema de Palestina. Fuente: autores.

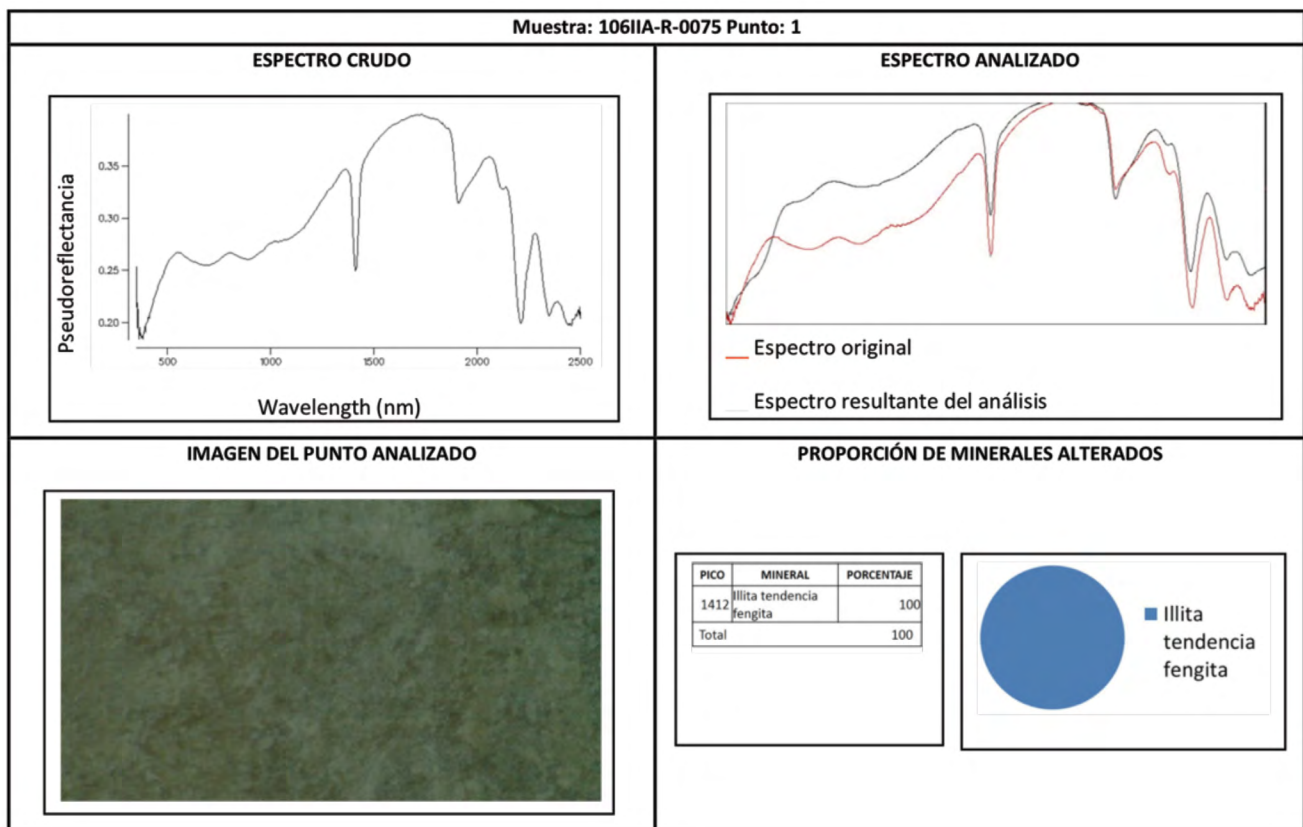


Una segunda familia de estructuras presenta una tendencia general N40-60°E, inclinadas al W, a las que se asocian las minas de La Silva y El Cristo. La tercera tendencia de mineralización hace referencia a estructuras con dirección N40°-60°W con inclinación preferencial al W, a la que se asocian las minas La Ye, Oro Verde y Los Pisones. La interpretación de imágenes digitales de terreno (DEM-30m) permite diferenciar rasgos estructurales con algunos lineamientos que coinciden con las principales tendencias de filones auríferos (figura 4.7.).

4.2.1.3. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

La disposición general de la mineralización aurífera está definida por vetas de cuarzo usualmente en contacto neto con la roca encajante; sin embargo, se ha observado moderada a intensa alteración sericitica en los bordes de los filones y se restringe desde pocos centímetros hasta 1 m de las estructuras mineralizadas, lo cual indica que los fluidos estuvieron en equilibrio relativo con la roca caja. En general, la alteración hidrotermal predominante es una sericitización moderada que afecta principalmente los cristales de plagioclasa y feldespato alcalino, especialmente en roca encajante de composición granitoide como las minas del borde nororiental (mina La Ye y Oro Verde) (figura 4.8.). En ocasiones, la sericitización viene acompañada de cuarzo de recristalización, pirita y carbonatos diseminados o en parches (figura 4.9.). El evento tardío o posmineralización está asociado a carbonatación como relleno de fracturas, diseminado o en parches.

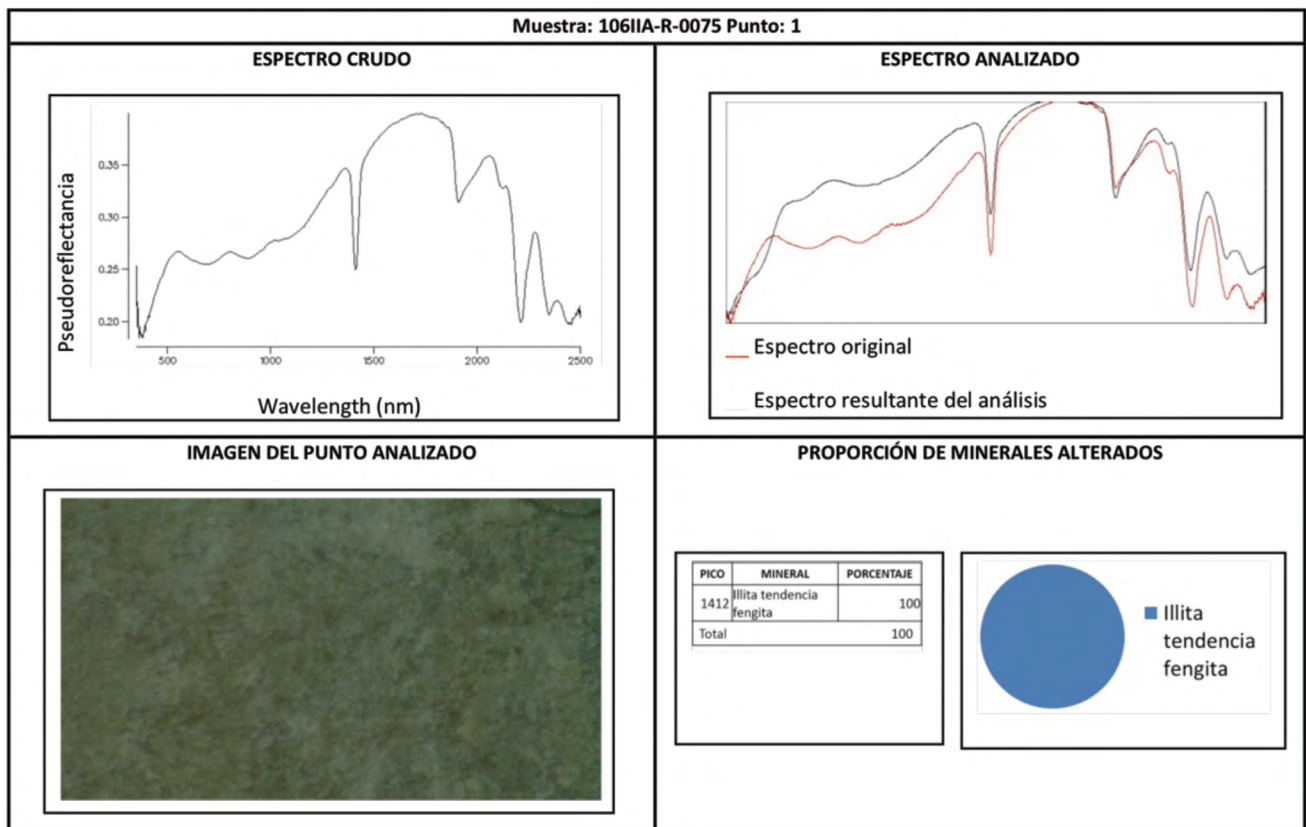
Figura 4.8. Espectro infrarrojo de roca alterada a sericita en la mina La Amada. Fuente: autores.



4.2.1.4. METALOGÉNESIS Y MINERALIZACIÓN AURÍFERA

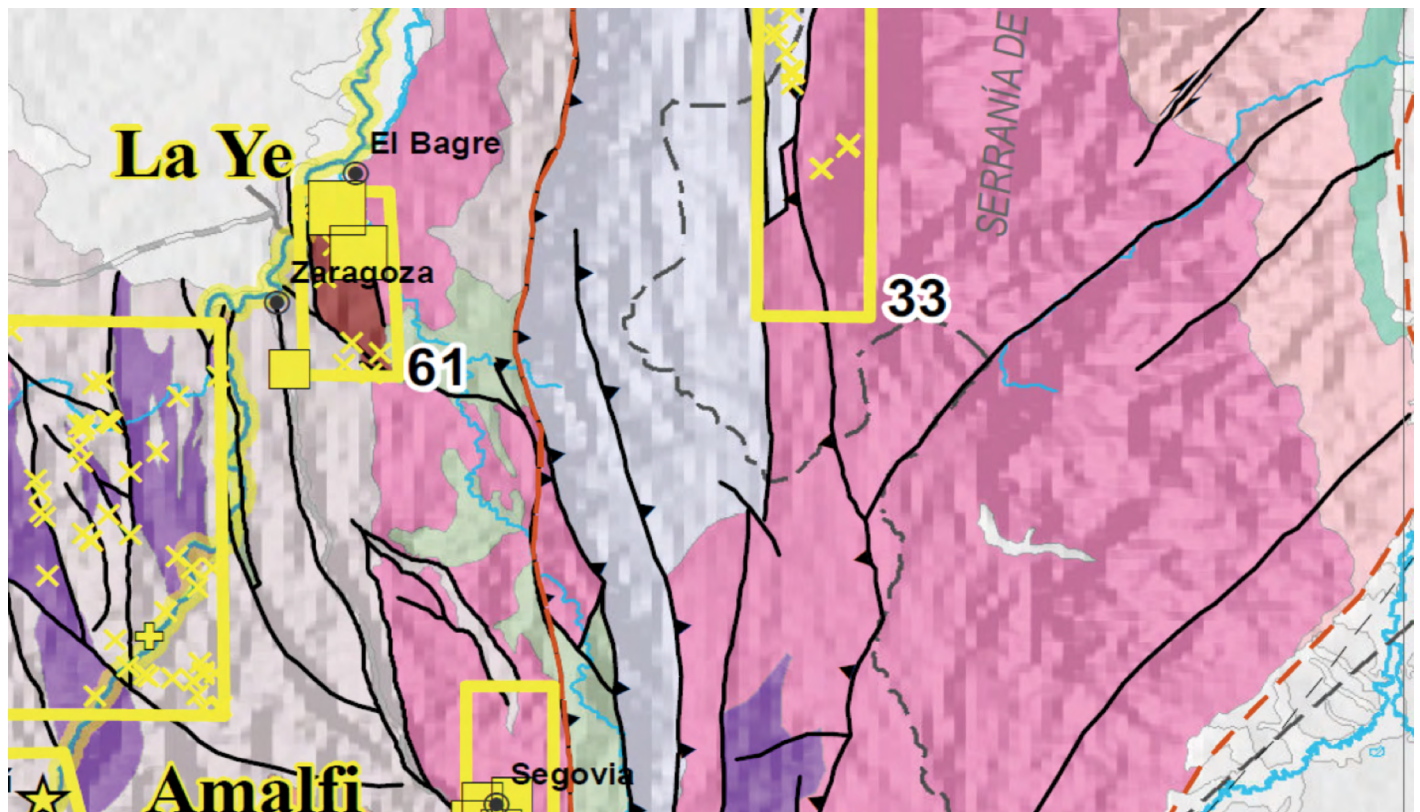
Las explotaciones mineras del área de Zaragoza, localizadas en el flanco oriental de la cordillera Central de los Andes colombianos pertenecen a la Provincia Metalogénica Andina Central, conforman el Distrito Minero

Figura 4.9. Espectro infrarrojo de roca alterada a sericita en la mina El Brillante. Fuente: autores.



de Segovia-Remedios (DMSR), donde algunos se han clasificado como relacionados con intrusivos con mineralización metálica de oro (Ag, As, Cu, Pb Zn-Fe) y otros depósitos auríferos se encuentran aún por clasificar (Celada et al., 2016).

Figura 4.10. Localización del Distrito Minero de Zaragoza. Fuente: Celada et al, 2016.



La geometría general de las áreas mineralizadas consiste en varios sistemas de vetas estructuralmente controlados, encajados en gneises o rocas intrusivas de composiciones diorítica a cuarzo-diorítica, como el stock del Carmen y el del Cordero. Estos sistemas presentan espesores ente 1 m y 3 m, y en algunos sectores están acompañados por diques afaníticos de composición básica a intermedia (Londoño et al., 2009). Las vetas están encajadas en fracturas abiertas o en zonas de cizalla; en algunos sectores se observan zonas con milonitización de la roca encajante, estructuras sigmoidales, boudinage y contactos veta-caja reactivados con presencia de salbanda (gauge), indicadoras de eventos sucesivos de deformación relacionados al proceso de mineralización.

En términos generales, la mineralización aurífera está relacionada con el contenido de sulfuros, esencialmente pirita como el mineral más abundante, con pequeñas cantidades de galena, esfalerita y tetraedrita, embebidos en una matriz de cuarzo lechoso con textura masiva, dispuesto en bandas con sucesivos eventos de mineralización. Por lo general, los sulfuros se producen en bandas subparalelas discontinuas y en parches a lo largo de las vetas.

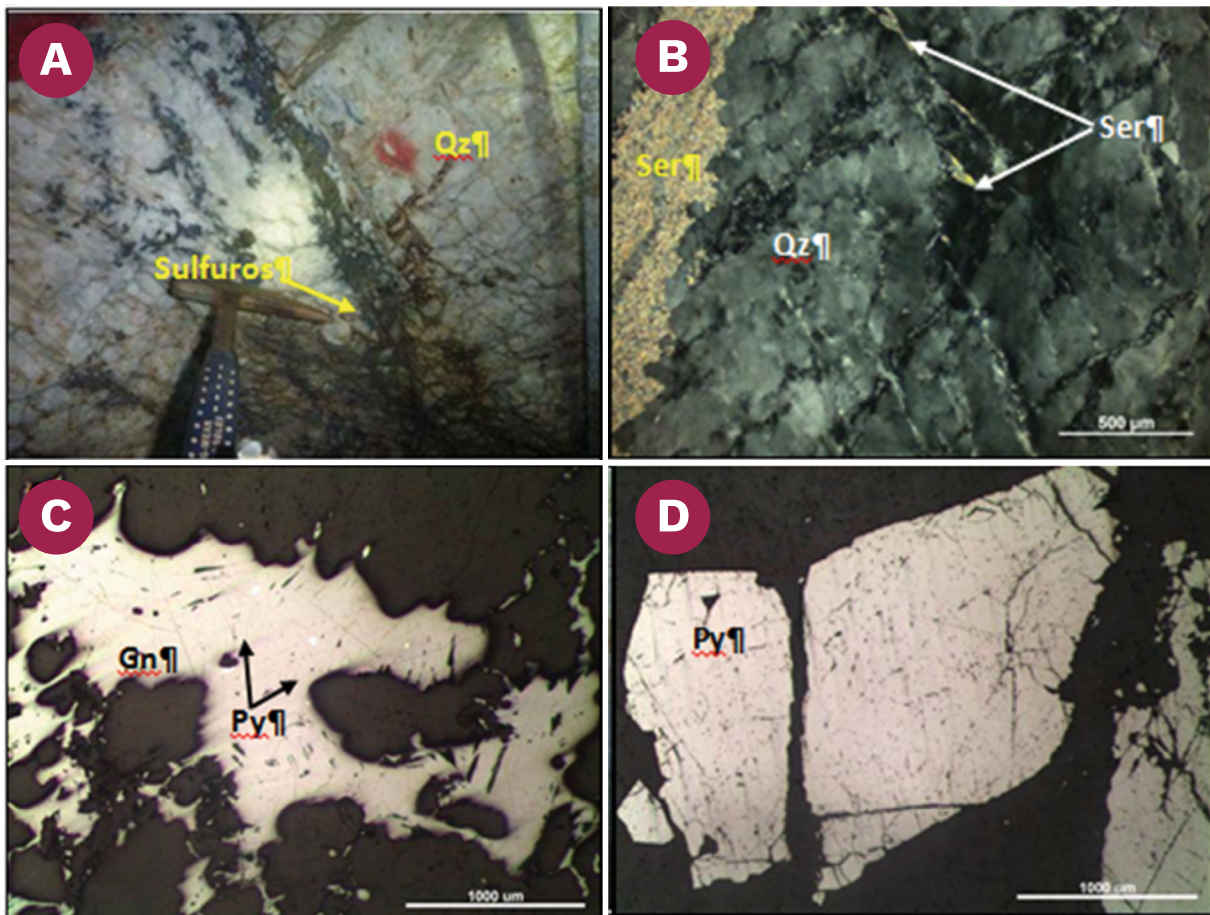
4.2.1.5. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LAS MINAS ESTUDIADAS

Las características individuales de mineralización de las minas se describen a continuación.

Mina la Ye

Mena conformada por cuarzo (70 %) con cristales de tamaño medio a grueso y textura masiva, galena (5 %) y pirita (2 %) subhedral. La pirita es levemente anisotrópica. La galena, por su parte, se observa entre fracturas de cuarzo y pirita, como parte de un segundo evento mineralizante, acompañado de sericita y carbonato como minerales de alteración hidrotermal, en vetillas sinuosas que cortan al evento principal (fotografía 4.1.).

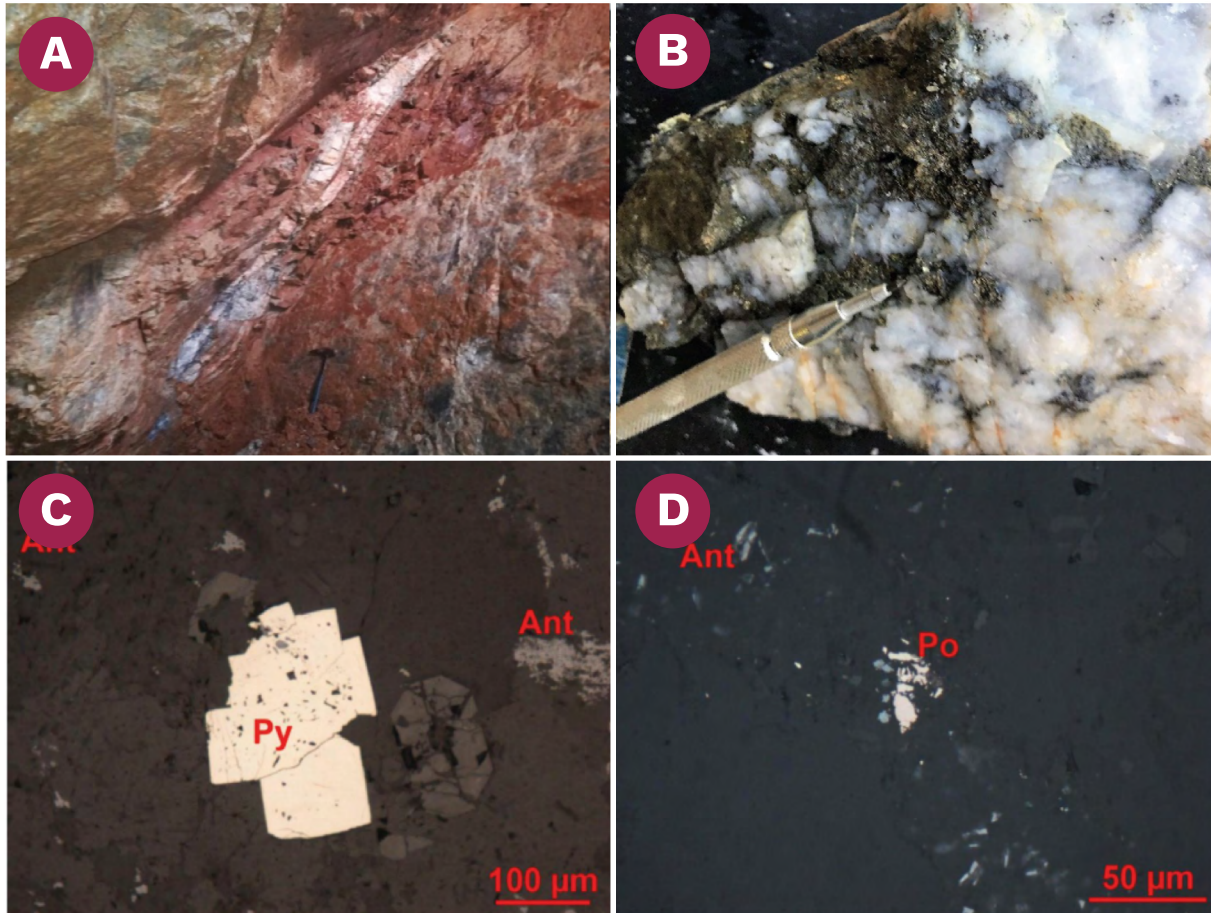
Fotografía 4.1. Vena de cuarzo masivo y sulfuros en menor proporción de la mina La Ye. Fuente: autores.



Mina Oro verde

Vetas de cuarzo y sulfuros en zona de cizalla, encajados en roca ígnea máfica finogranular. Predominio de pirita, pirrotina, calcopirita, esfalerita y galena en agregados masivos granulares. Diseminación de pirita eu-hedral y pirrotina en roca hospedante (fotografía 4.2.).

Fotografía 4.2. Mineralización aurífera en la mina Oro Verde. a) Vetas de cuarzo y sulfuros. b) Agregado de granulas pirita en cuarzo lechoso. c) Pirita eu-hedral diseminada en roca. d) Pirrotina anhedral diseminada en roca. Fuente: autores.



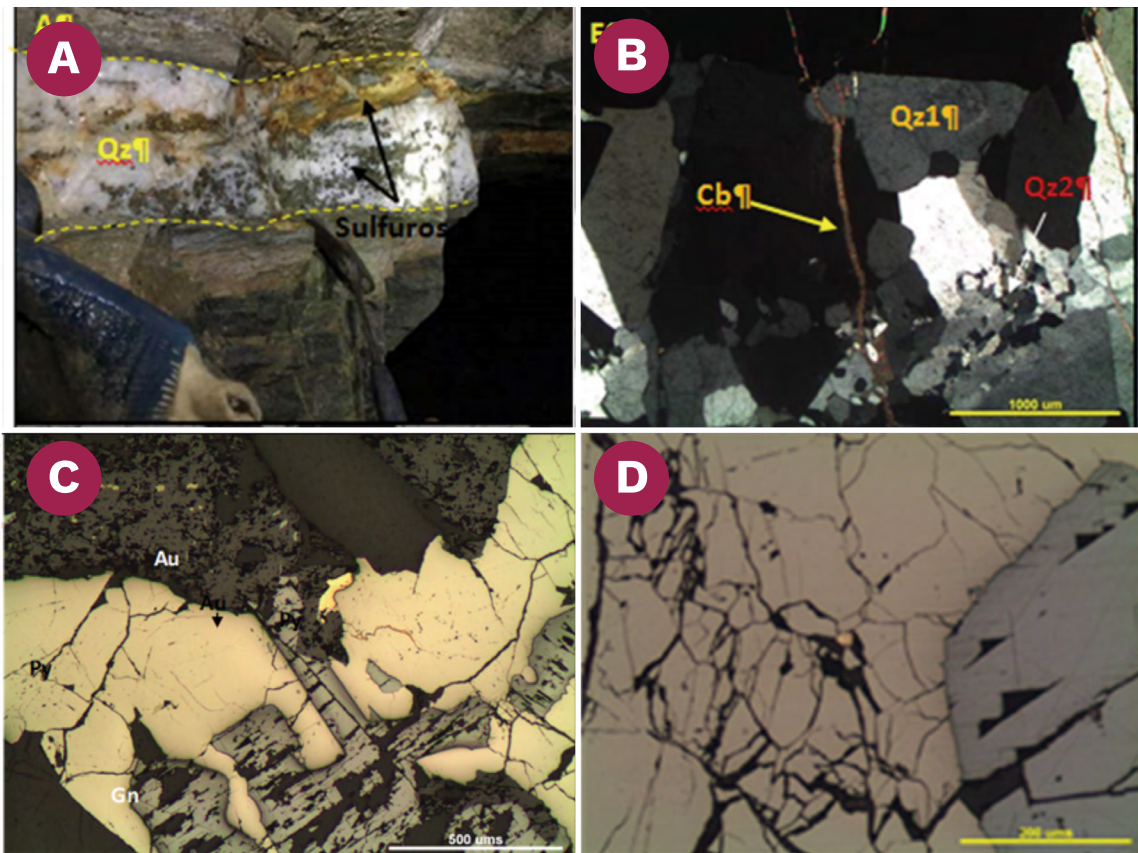
Mina El Limón

Mineralización compuesta por cuerpos vetiformes compuestos de cuarzo (~60 %) con texturas masivas y extinción ondulante, pirita (~27 %) masiva, galena (~2 %), esfalerita (~5 %), calcopirita y oro (<1 %). Galena y esfalerita rellenan fracturas en pirita y cuarzo. De igual forma, se da recristalización del cuarzo microcristalino con textura en mosaico, asociado a minerales arcillosos y sericita, distribuidos en parches y en vetillas. Se observa también clorita y carbonato en forma de vetillas entre fracturas de cuarzo y pirita. (Fotografía 4.3)

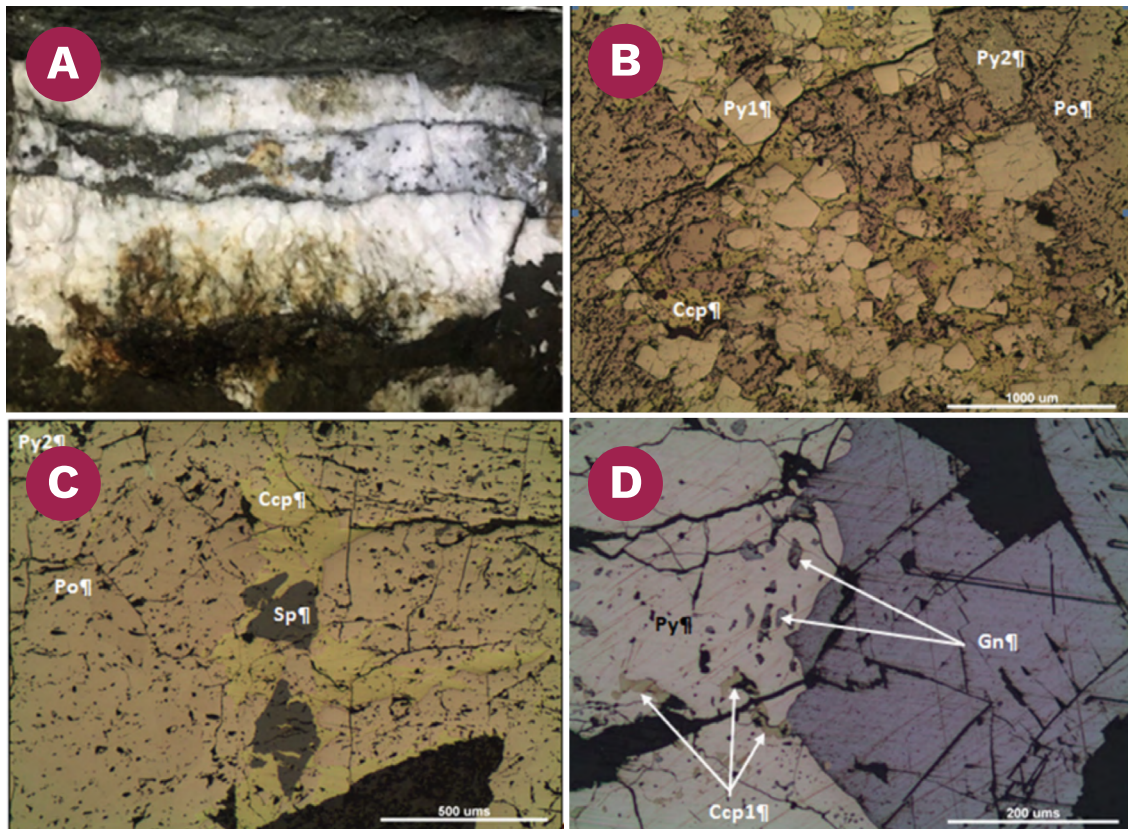
Mina primavera

La mineralización se encuentra confinada a en una banda de cuarzo con sulfuros agregados policristalinos masivos moteados y en bordes de contacto. En sección pulida la mena está compuesta de cuarzo (~45 %) con formas poligonales que configuran texturas en peine, en ocasiones recristalizado, a mineralización corresponde a pirita (12 %) y pirrotina (52%), principalmente. En menor proporción, se encuentra esfalerita (0,6 %), calcopirita (5,4 %), galena (0,3 %), bornita (<1 %), sulfosales (<1 %) y oro asociado (<<1 %) (Fotografía 4.4).

Fotografía 4.3. Mineralización aurífera en la mina El Limón. a) Vetas de cuarzo y sulfuros. b) Recristalización de cuarzo y relleno de fracturas de carbonato. c) Pirita masiva multifracturada y galena esfalerita. d). Pirita multifracturada y galena. Fuente: autores.



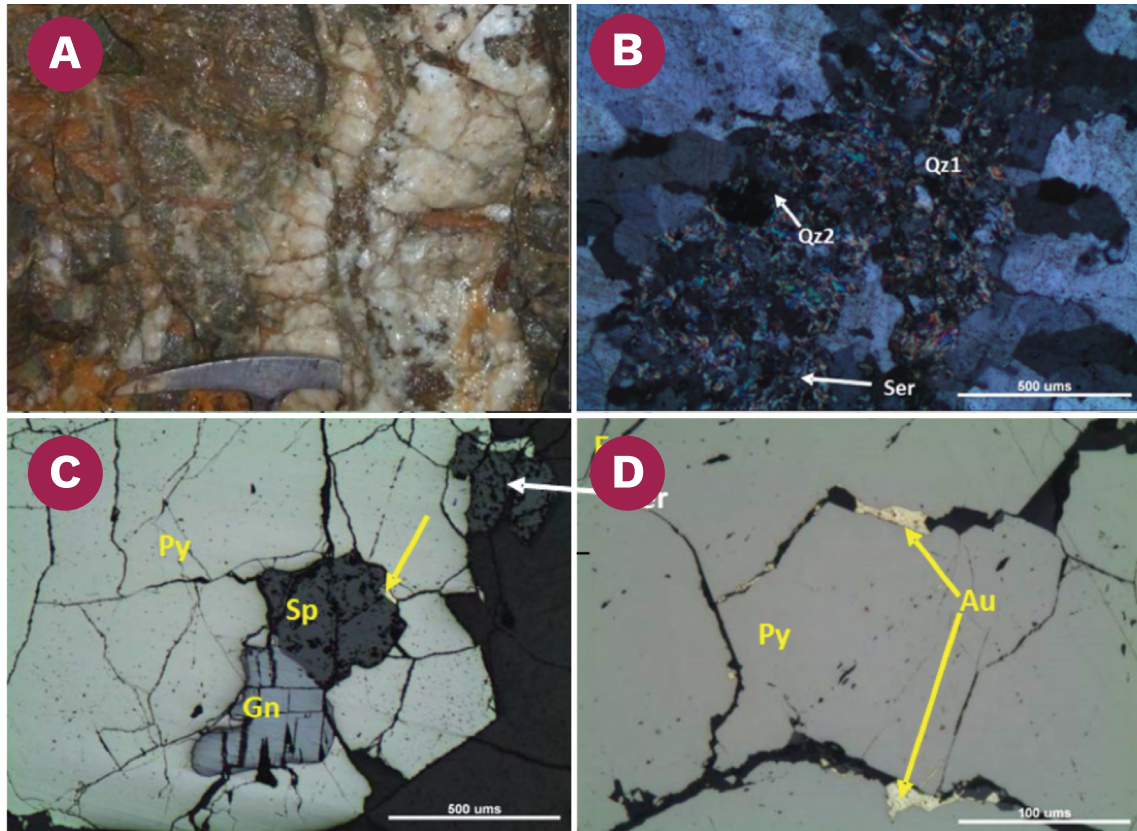
Fotografía 4.4. Mineralización aurífera en la mina Primavera. a) Vetas de cuarzo y sulfuros. b) Recristalización de pirita y pirrotina intercrecidas. c) Calcopirita y esfalerita en pirrotina y pirita. d) Pirita multifracturada con galena y calcopirita. e) Galena y oro en pirita. f) Oro en relleno de fracturas de pirita. Fuente: autores.



Mina la Amada

Esta roca hospeda venas y vetillas rellenas de cuarzo (22-80 %) y carbonato (~3 %) con agregados de sulfuros masivos y diseminados. En orden de abundancia, presenta pirita masiva con texturas esqueléticas (~4 %), esfalerita (~1,7 %), galena (<1 %) y calcopirita (<1 %). Adicionalmente, como relleno en microfracturas se presenta pirrotina (<1 %), calcopirita (<1%) y pirita (<1 %) como producto de un segundo evento mineralizante.

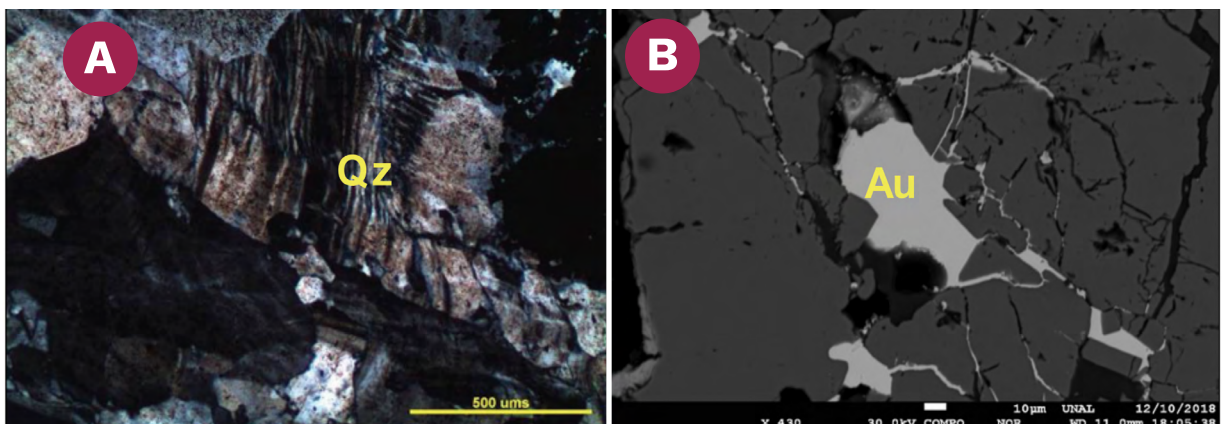
Fotografía 4.5. Mineralización aurífera en la mina La Amada. A) Vetas de cuarzo y sulfuros. b) Recristalización de cuarzo y sericitización. c) Pirita masiva con galena y esfalerita. d) Oro en relleno de fracturas de pirita. Fuente: autores.



Mina el Brillante

Las venas mineralizadas están compuestas por cuarzo (~50 %) con texturas masivas y en peine, pirita (~40 %) masiva y, en menores cantidades, esfalerita (~0,7 %), calcopirita (1,3 %), galena (1 %) y oro (<<0,1%). Adicionalmente se presenta carbonato (~6 %) (fotografía 4.6.)

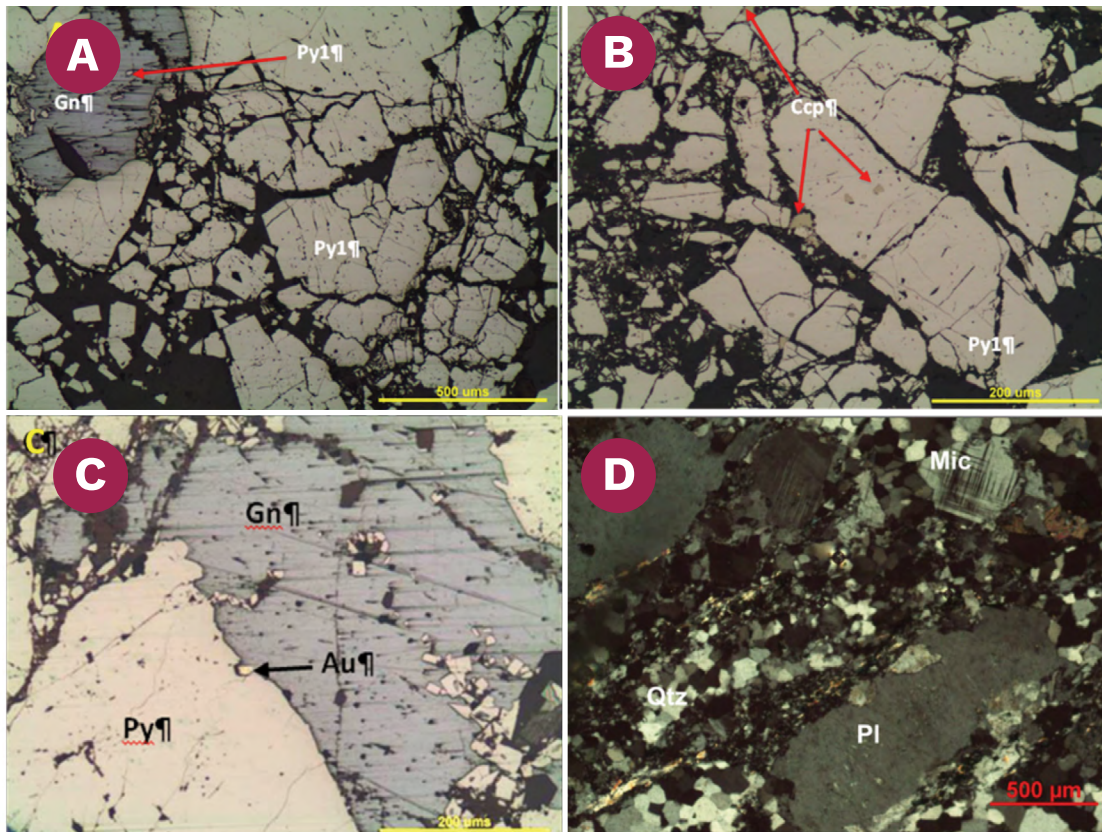
Fotografía 4.6. Microfotografías pertenecientes a venas de la mina El Brillante . Fuente: autores.



Mina la Silva

La mena está compuesta de cuarzo masivo (~60 %) con agregados masivos de sulfuros como pirita (~15 %), galena (~1 %), esfalerita (0,5 %), calcopirita (<1 %) y oro (<<0,1 %), dispuestos de forma diseminada en cuarzo y como inclusiones de galena y esfalerita en pirita. Se diferencia un evento posterior con cuarzo microcristalino con textura en mosaico (20 %) y pirita (<0,1 %). Se presenta carbonato (<1 %) asociado a sericita-muscovita (~5 %), además de clinozoisita (~0,2 %) en forma de parches a través de la vena, los cuales se derivan de la roca ígnea intrusiva, fanerítica de grano medio de composición granodiorítica hospedante de la mineralización (fotografía 4.7.).

Fotografía 4.7. Mineralización aurífera en la mina La Silva. a) Pirita multifracturada y galena. b) Calcopirita en relleno de fracturas de pirita. c) Galena en relleno de espacios de pirita. d) Cuarzo microcristalino recristalizado. Fuente: autores.



Mina pisones

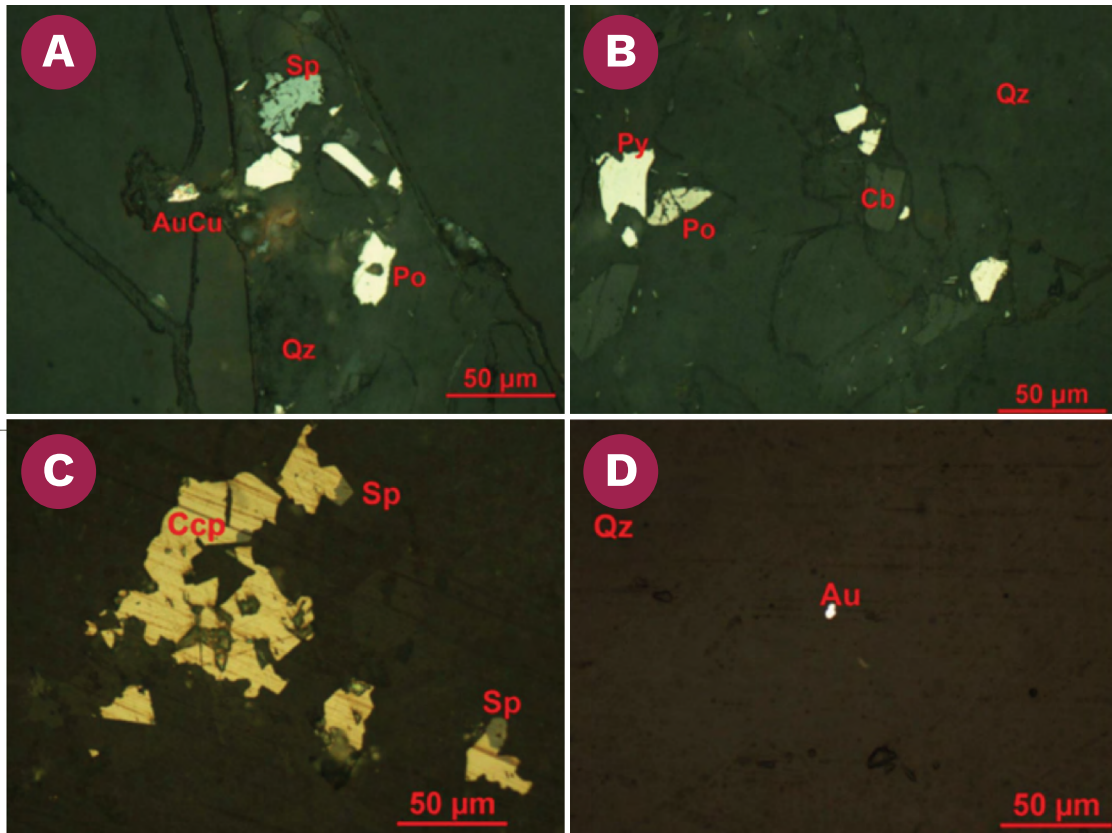
La mena está constituida por cuarzo (~80 %) de tamaño medio, con formas anhedrales o exhibiendo caras cristalinas alargadas con terminaciones en punta, que ajustan una textura en peine hacia los bordes de la vena. La mineralización está representada por pirita (<1 %), esfalerita (<1 %) y escasas cantidades de calcopirita y pirrotina diseminados y relleno de fracturas entre los cristales de cuarzo.

Como parte de un segundo evento mineralizante, ocurren carbonato (<1 %), sericita (~2 %) y cuarzo microcristalino en mosaico (~15 %). Por meteorización, se observa hematita con textura relíctica de pirita. La roca encajante es ígnea intrusiva, moteada, fanerítica de grano fino a medio (Fotografía 4.8).

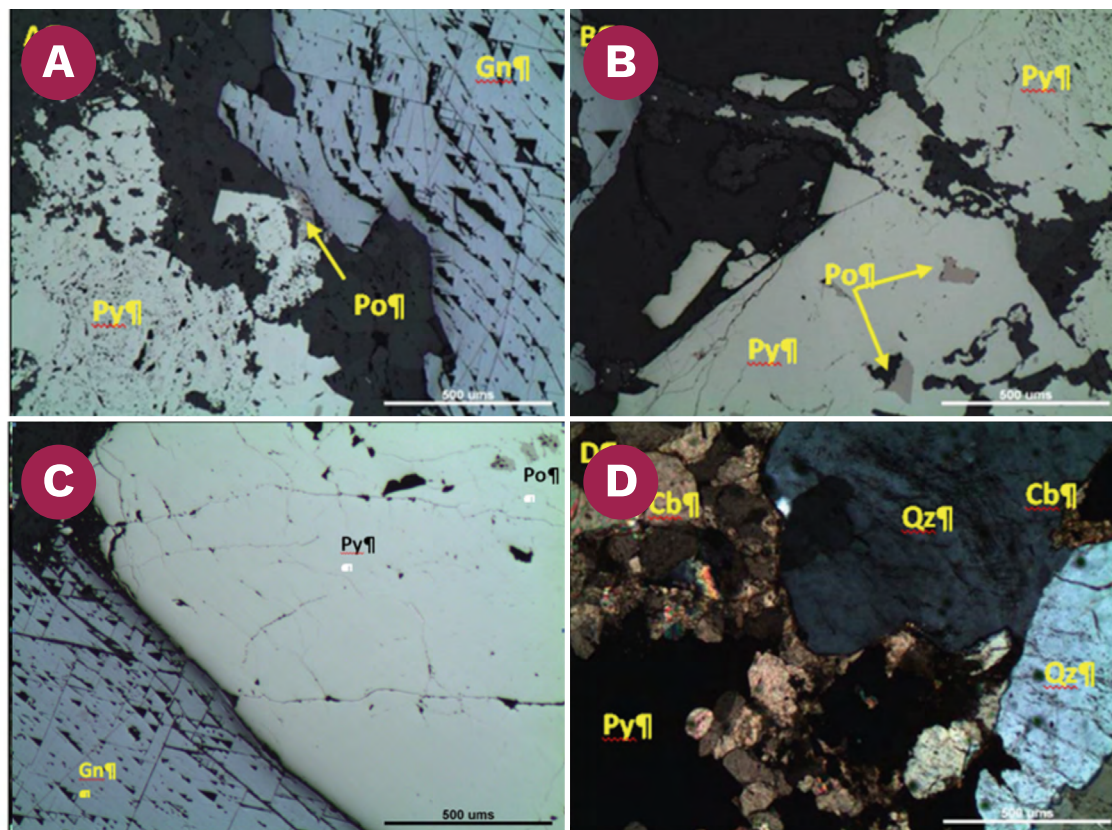
Mina la gallineta

La mena está compuesta por cuarzo masivo (~60-90 %), pirita (~33 %), bajas cantidades de carbonato (5,3 %), galena (3,3 %), pirrotina (~2,3 %), calcopirita (~1 %), esfalerita (~0,7 %) y magnetita (<1 %). Es común observar núcleos de pirrotina en pirita y texturas de remplazamiento de pirrotina en pirita. Presenta recristalización de cuarzo microcristalino con textura en mosaico con clorita de hábitos radial, que rellena intersticios y se encuentra asociada a una recristalización carbonato (Fotografía 4.9).

Fotografía 4.8. Mineralización aurífera en mina Pisones. Veta de cuarzo, sulfuros y oro diseminados y en relleno de fracturas. Fuente: autores.



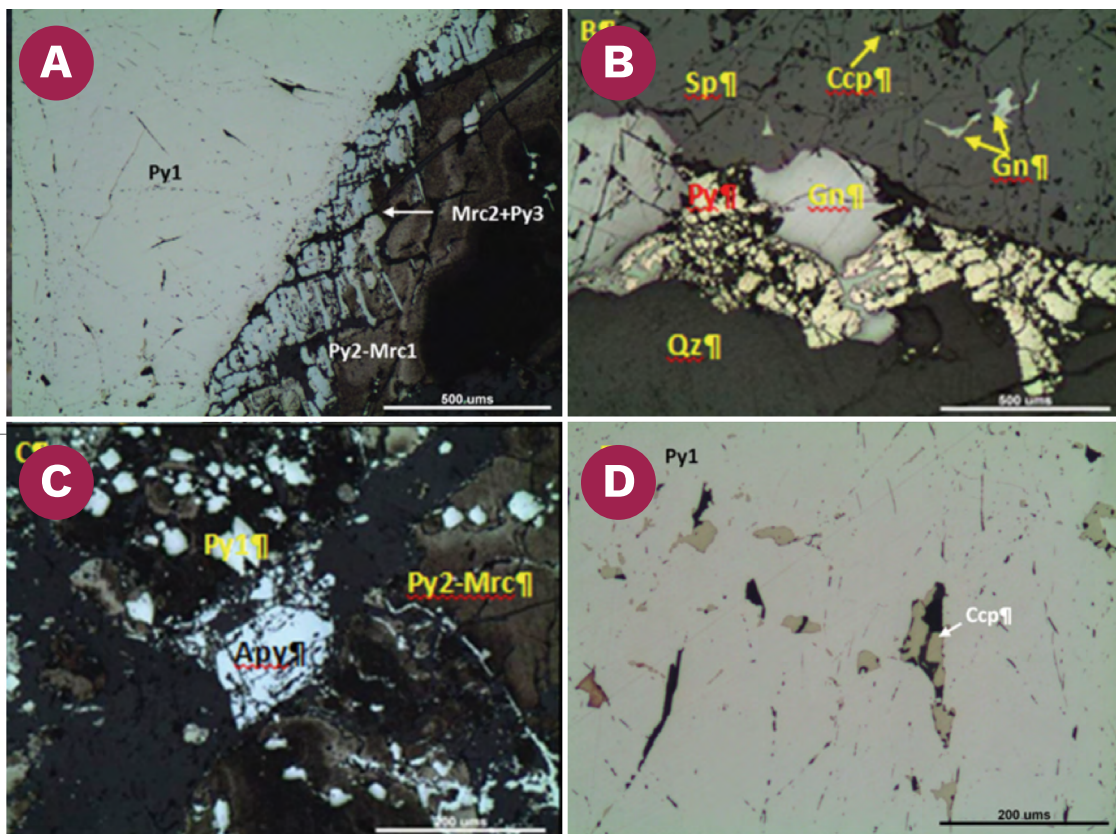
Fotografía 4.9. Mineralización aurífera en la mina La Gallineta. a) Pirita recristalizada y galena. b) Núcleos de pirrotina en pirita. c) Pirita y galena. d) Recristalización de cuarzo y carbonatos. Fuente: autores.



Mina El Cristo

Venas compuestas de agregados de cuarzo grueso y sulfuros masivos, principalmente pirita (10-80 %) de tamaño variado, galena (~15 %) y esfalerita (~10 %), con bajos contenidos de pirrotina, calcopirita y arsenopirita (<1 %). Frecuentemente se observa calcopirita (<1 %), pirrotina (<1 %) y oro (<1 %), en cristales individuales de pirita. Asimismo, se observa remplazamiento de pirrotina por pirita-marcasita (2-30 %), con texturas de ojo de pájaro. Como un segundo evento de mineralización, se observó el desarrollo de vetillas de pirita (fotografía 4.10.).

Fotografía 4.10. Mineralización aurífera en la mina El Cristo. a) Asociación pirita pirrotina. b) Recristianización de galena en pirita y esfalerita. c) Pirita, arsenopirita y pirrotina alterada a marcasita. d) Relleno de calcopirita en pirita. Fuente: autores.



4.2.1.6. MICROTERMOMETRÍA Y ANÁLISIS DE INCLUSIONES FLUIDAS

Se realizaron análisis microtermométricos en inclusiones fluidas a 3 muestras de venas de cuarzo de diferentes vetas mineralizadas. Se hallaron tanto inclusiones primarias como secundarias (figura 4.11.).

4.2.1.7. SECUENCIA PARAGENÉTICA

La secuencia paragenética está relacionada principalmente a 2 eventos sucesivos de mineralización aurífera. Se inicia con una fase premineral con precipitación de cuarzo, y le sigue una fase mineralizante con predominio de pirita con pirrotina y calcopirita con precipitación de oro; en esta fase la arsenopirita puede estar presente. Después de una fase de deformación y de alteración con precipitación de cuarzo, sericitización y formación de carbonatos, se inicia otra fase de mineralización con precipitación de esfalerita, tetraedrita, calcopirita y, primordialmente, galena y oro, seguida de minerales como antimonio y telurio. Finalmente, reprecipita cuarzo y carbonatos en la fase posmineral (figura 4.12.).

Figura 4.11. Diagrama de análisis por termometría de las muestras de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.

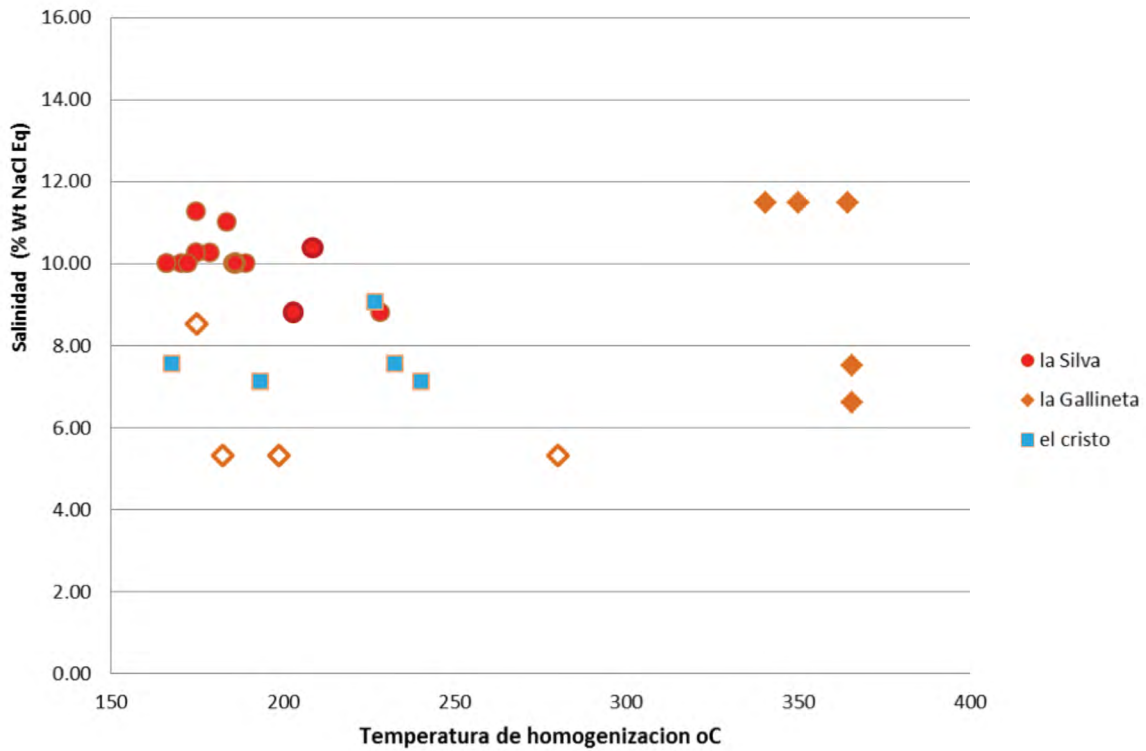
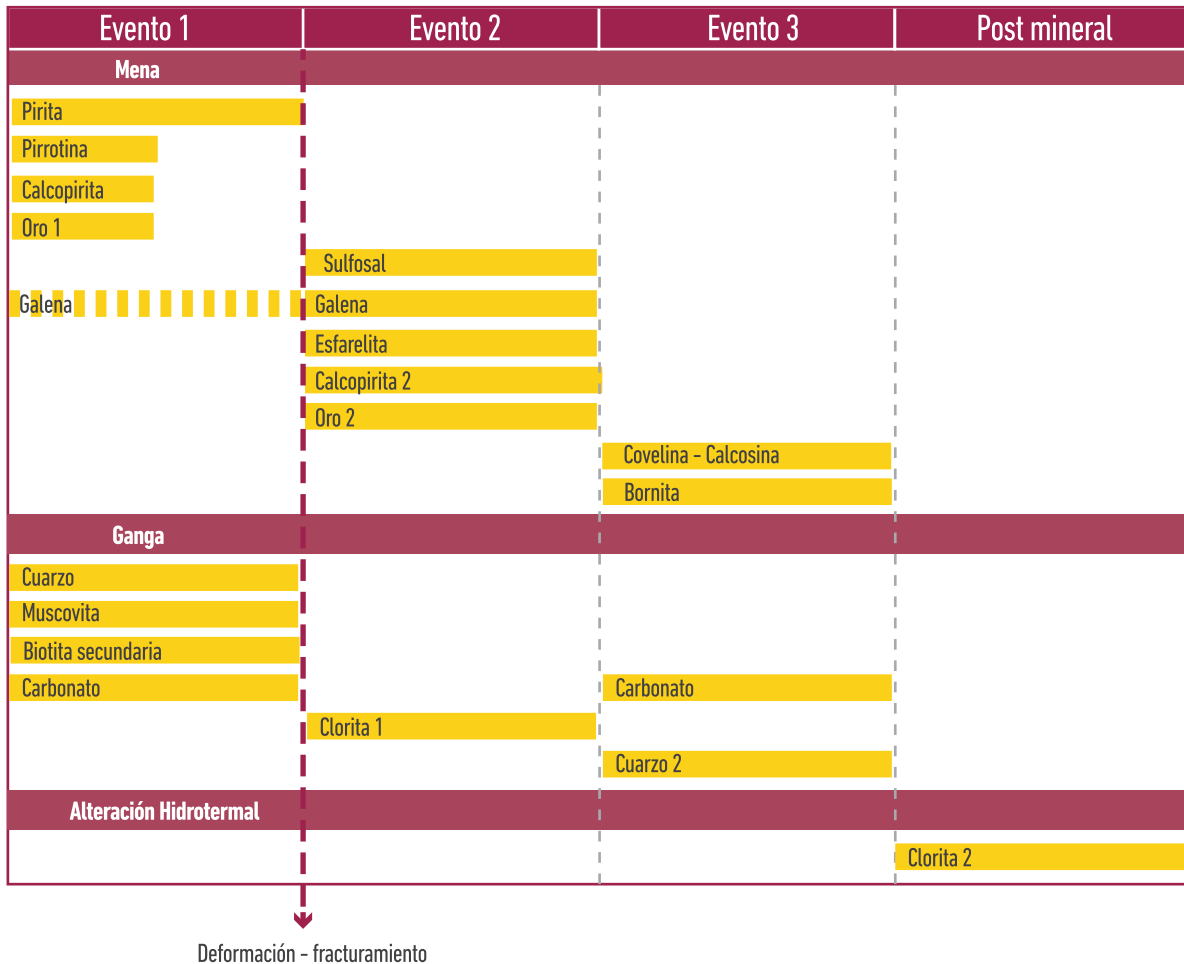


Figura 4.12. Secuencia paragenética generalizada del área de estudio. Fuente: autores.



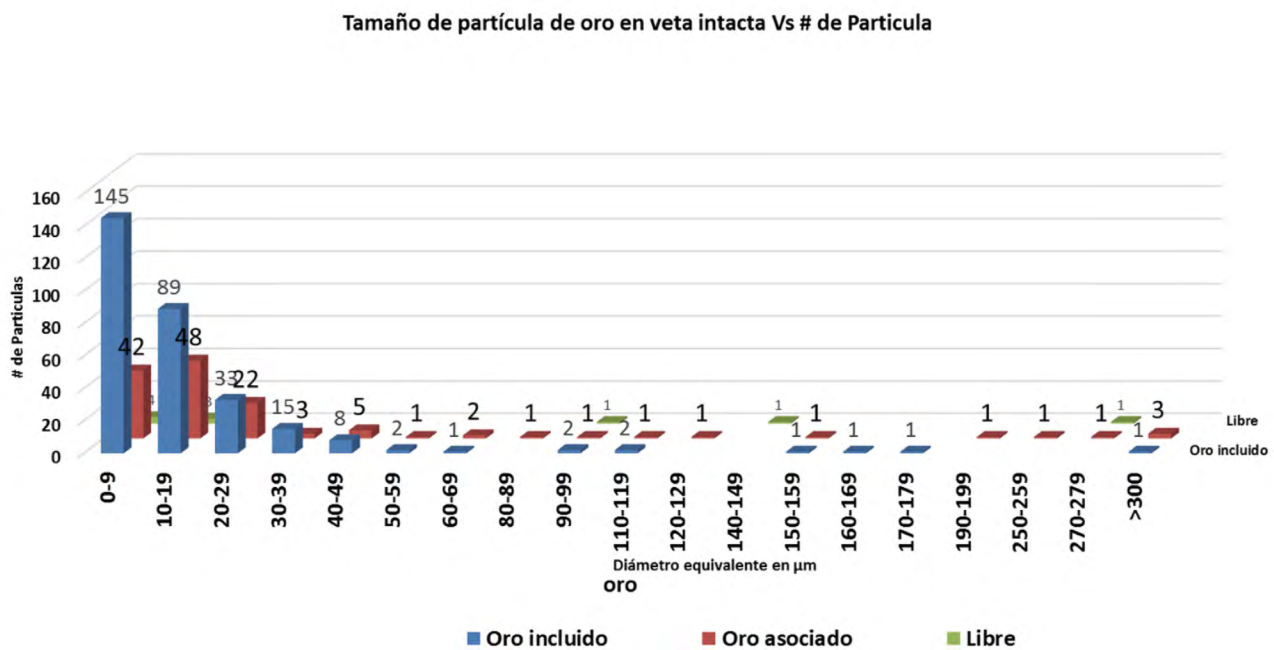
4.2.2. OCURRENCIA DE ORO EN VETA

Para determinar la ocurrencia de oro en veta intacta se consideraron las características geográficas y condiciones de mineralización. Se prepararon 40 secciones delgadas pulidas para análisis petrográfico. Todas las secciones donde se halló se encuentran en la zona central de Zaragoza.

Un total de 445 partículas de oro fueron halladas, en 5 de las 12 minas visitas, todas ellas ubicadas en el sector Central. Para el sector noreste no se observaron granos de oro en las muestras analizadas. Considerando el análisis de 445 partículas reportadas, se distribuyen de la siguiente manera: El Limón, 152 partículas de oro; El Brillante, 143; La Primavera, 61; La Amada, 48; La Silva, 2; y El Cristo, 39.

Se establece que el diámetro equivalente (D2Eq) de las partículas de oro analizadas se encuentran por debajo de 50 micrómetros (μm) y solo algunas son de tamaño entre 100 y 320 μm de longitud; sin embargo, es importante resaltar que las partículas de gran tamaño son muy representativas en peso (figura 4.13.).

Figura 4.13. Distribución de tamaño de partículas de oro (D2Eq) identificadas en el municipio de Zaragoza. Fuente: autores.



La distribución de oro por peso en los mismos rangos de tamaño muestra que el oro está asociado a sulfuros con cerca del 53 %, incluido en sulfuros el 43 % y el 4 % restante se halla libre, relacionado con cuarzo (figura 4.14.). El oro se encuentra asociado, principalmente, a galena y pirita; esporádicamente, está asociado a esfalerita y calcopirita. Unas partículas muy grandes halladas en la mina El Cristo sesgan la distribución.

La distribución general de partículas de oro por rango de tamaño (D2Eq) muestra 3 poblaciones diferenciales: la primera corresponde con partículas menores a 90 μm y representan menos del 1 %; una segunda población entre los rangos de 90 a 250 μm representa cerca del 15 %; mientras que la población más importante corresponde a partículas de tamaño superior a 300 μm y representan el 85 % de la distribución (figura 4.15.). Esta circunstancia se presenta por oro de tamaño muy grande hallado en la mina El Cristo. Para fines de beneficio se considera que las 2 últimas poblaciones descritas, aquellas de mayor tamaño, pueden ser beneficiadas por concentración gravimétrica convencional. Ellas representan cerca del 99 %.

En términos generales, para las minas visitadas en Zaragoza, la distribución por número de partículas de oro clasificadas según diámetro equivalente (D2Eq) indica que una alta proporción (417 de 445 partículas) se encuentra por debajo de 50 μm , en su mayoría asociados con pirita y galena o rellenando fracturas en pirita.

Figura 4.14. Asociación de partículas de oro identificadas en el Municipio de Zaragoza. Fuente: autores.

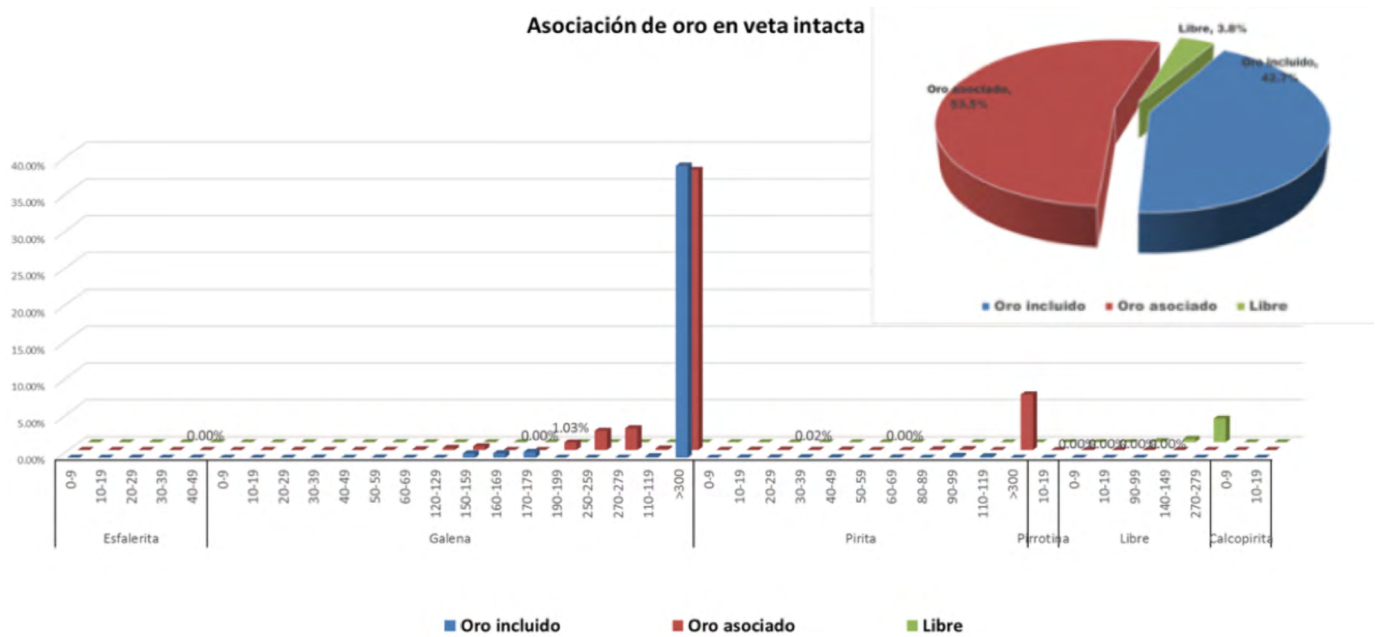
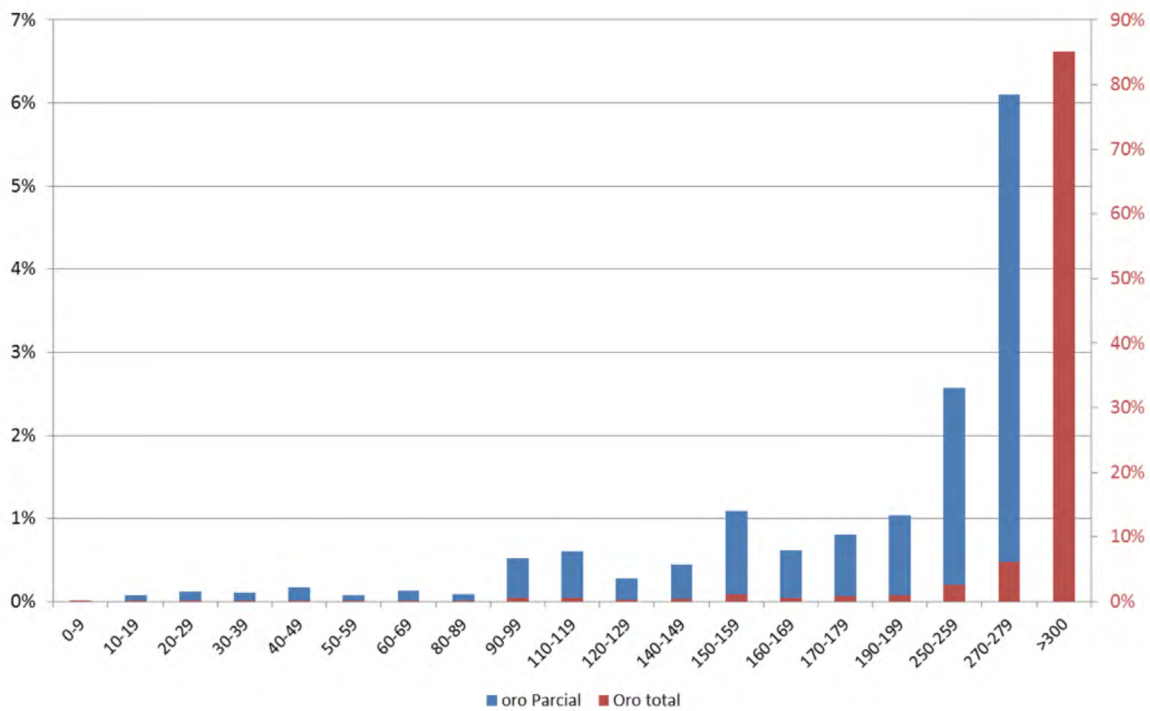


Figura 4.15. Tamaño de partículas de oro identificadas en el municipio de Zaragoza. Fuente: autores.



Sin embargo, en términos de peso, las 28 partículas representan el 99 % de la distribución. Para establecer características particulares de oro para cada mina, se analiza el oro, teniendo en cuenta número de granos, porcentaje en peso de asociación mineralógica y distribución en peso con fines de beneficio.

Para el desarrollo de la guía metodológica el equipo técnico del SGC determinó las minas que cuentan con las características mineralógicas generales de la zona, el detalle de cada una de las minas se puede encontrar en el informe técnico que acompaña la guía.

4.2.2.1. MINA PRIMAVERA

En las muestras petrográficas de la mina La Primavera se hallaron 61 granos de oro, de los cuales 54 son menores a 30 μm (figura 4.16.); estos se encuentran principalmente asociados a sulfuros .

La distribución de oro por peso en los mismos rangos de tamaño muestra que el oro está preferencialmente asociado a pirita (93 %) y el 7% restante incluido en pirita. Existe claramente una estrecha relación con pirita, tanto incluido como asociado con tamaños por debajo de 90 μm . Adicionalmente, existe asociación con otros sulfuros como galena y eventualmente a pirrotina y calcopirita (figuras 4.17 y fotografía 4.11.).

Para el desarrollo de la guía metodológica el equipo técnico del SGC determinó las minas que cuentan con las características mineralógicas generales de la zona, el detalle de cada una de las minas se puede encontrar en el informe técnico que acompaña la guía.

Figura 4.16. Distribución de tamaño de partículas de oro (D2Eq) identificadas en la mina La Primavera. Fuente: autores.

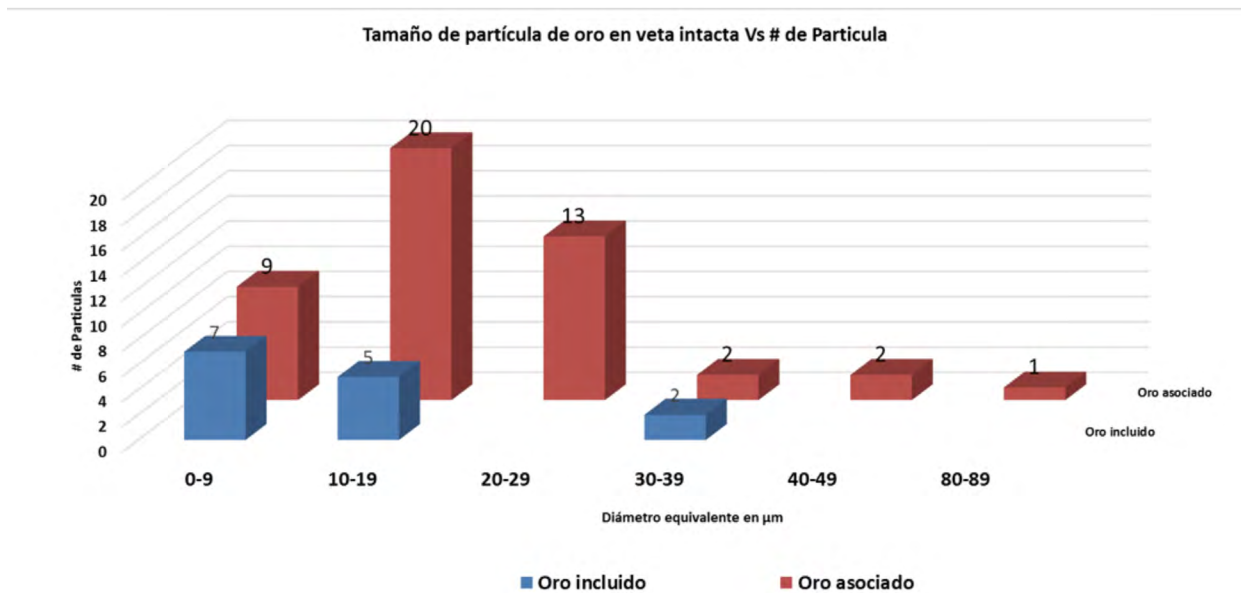
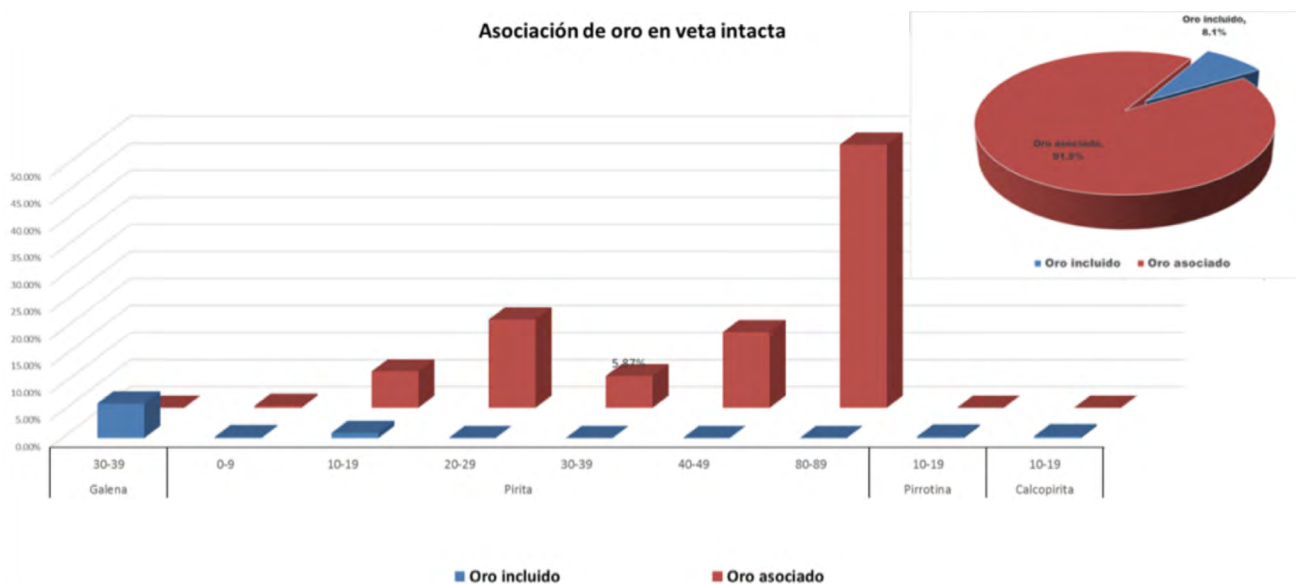
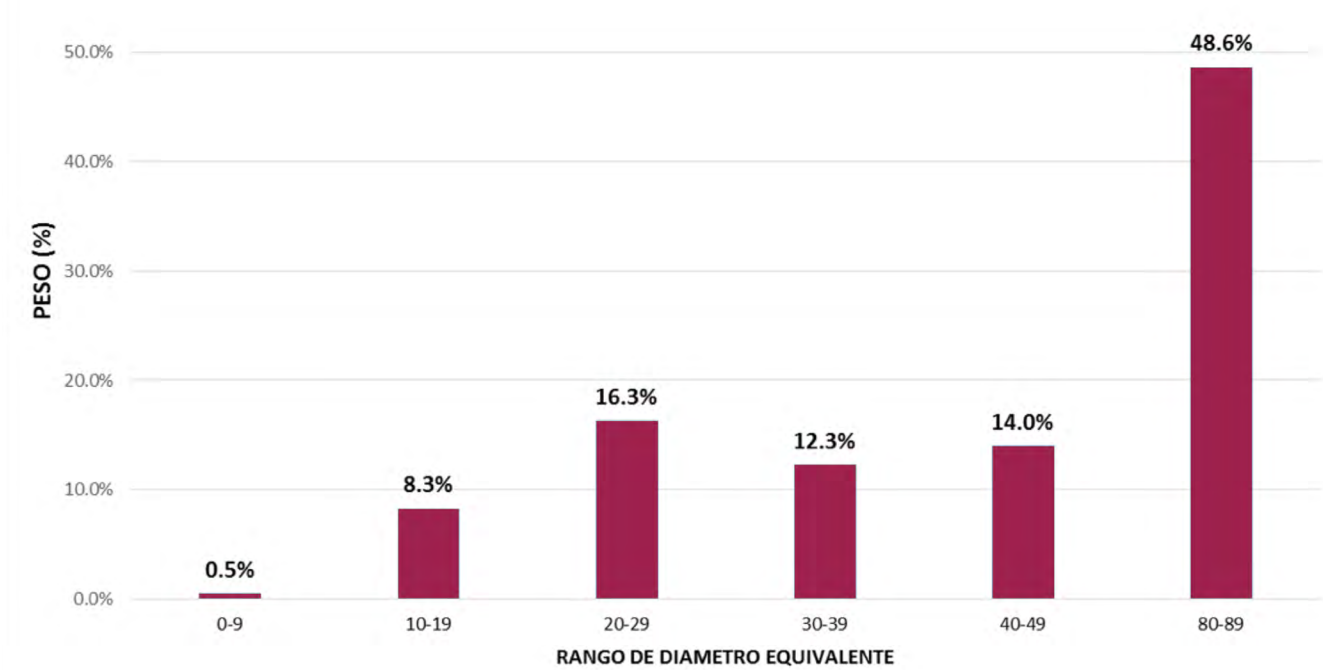


Figura 4.17. Asociación de partículas de oro en mina La Primavera. Fuente: autores.

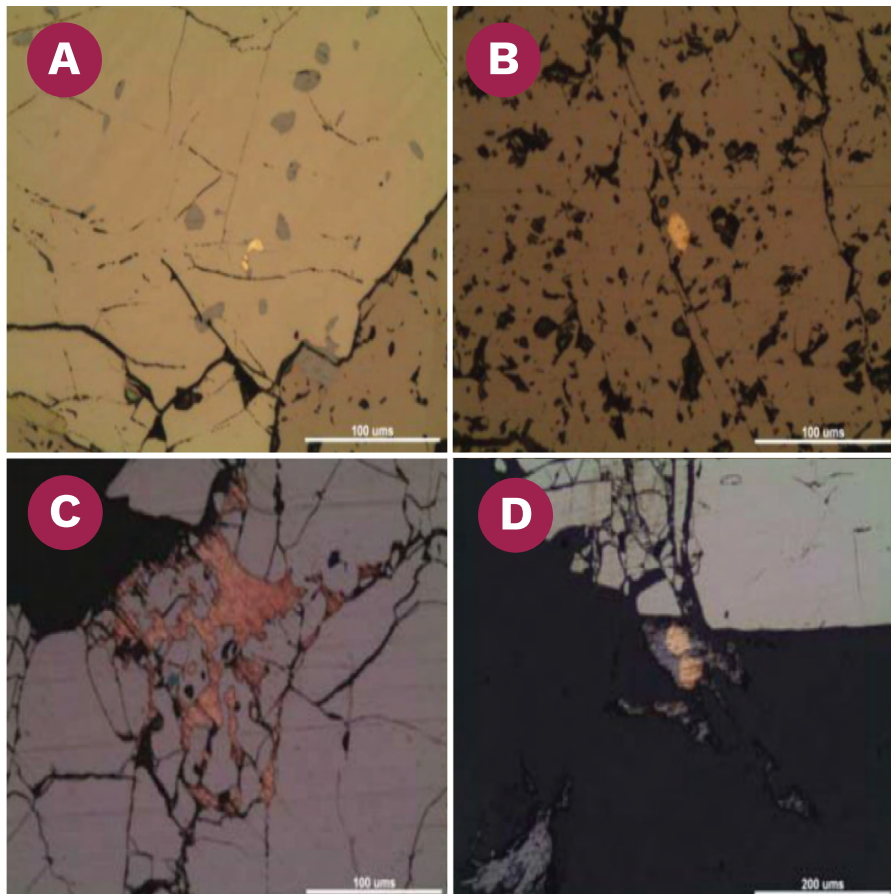


La distribución en peso del oro de veta muestra que el único grano mayor a 90 μm representa el 49 %, mientras que la totalidad de las partículas por debajo de 60 μm representa el 51 % restante, fracción característica que requiere de métodos selectivos de concentración (figura 4.18.).

Figura 4.18. Tamaño de partículas de oro por peso en la mina La Primavera. Fuente: autores.



Fotografía 4.11. a) Oro incluido en pirita. b) Oro incluido en pirrotina. c) Oro asociado a pirita en fracturas. d) Oro incluido en galena. Mina Primavera. Fuente: autores.

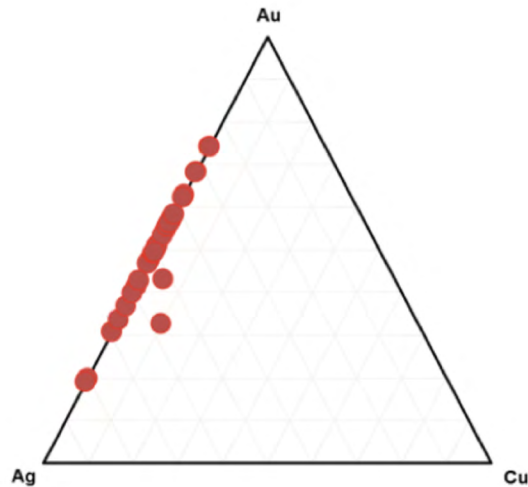


4.2.3. CALIDAD DEL ORO (EPMA)

Para determinar la composición elemental de las partículas de oro, se analizaron por microsonda electrónica (EPMA) 40 partículas provenientes de las minas El Limón, La Primavera, El Brillante y El Cristo. Se identificaron los porcentajes elementales de oro y plata, así como elementos presentes en menores proporciones (arsénico, selenio, cobre, mercurio, paladio, antimonio, telurio, y bismuto).

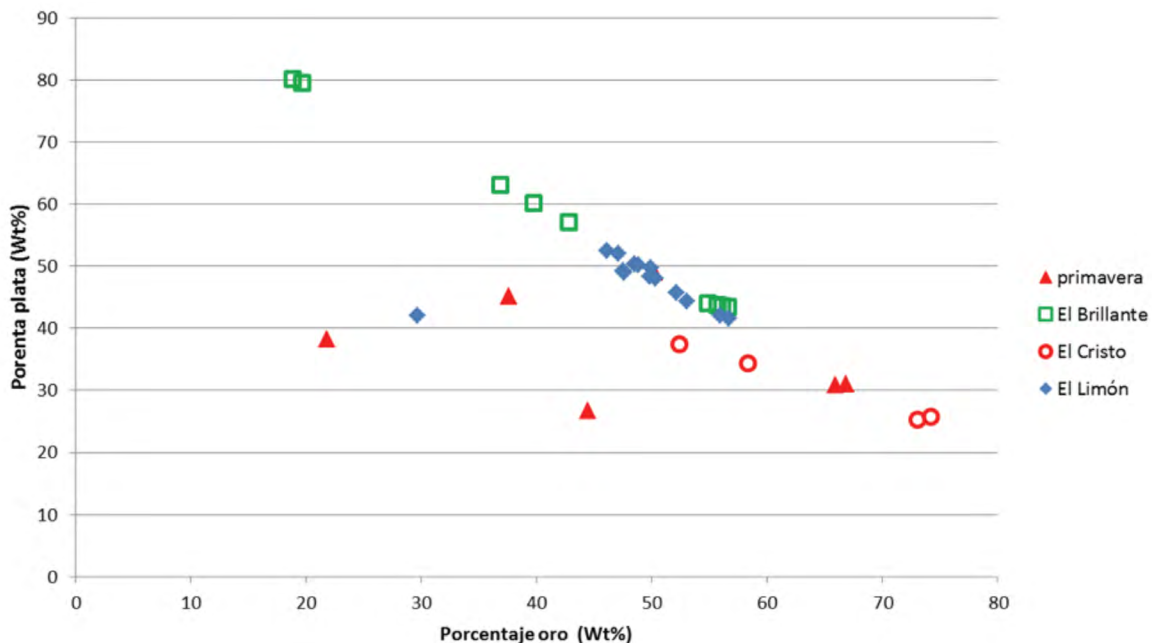
La calidad del oro determinada mediante análisis microelementales por microscopía electrónica (EPMA), con respecto a la relación Au-Ag-Cu, indica altos contenidos de plata y muy bajo contenidos de cobre (0,1 %). La proporción de plata es muy alta en las menas con valores que oscilan entre 20 Agwt% y 80 Agwt% (figura 4.19.).

Figura 4.19. Diagrama triangular Au-Ag-Cu, para las partículas de oro analizadas con microsonda electrónica. Fuente: autores.



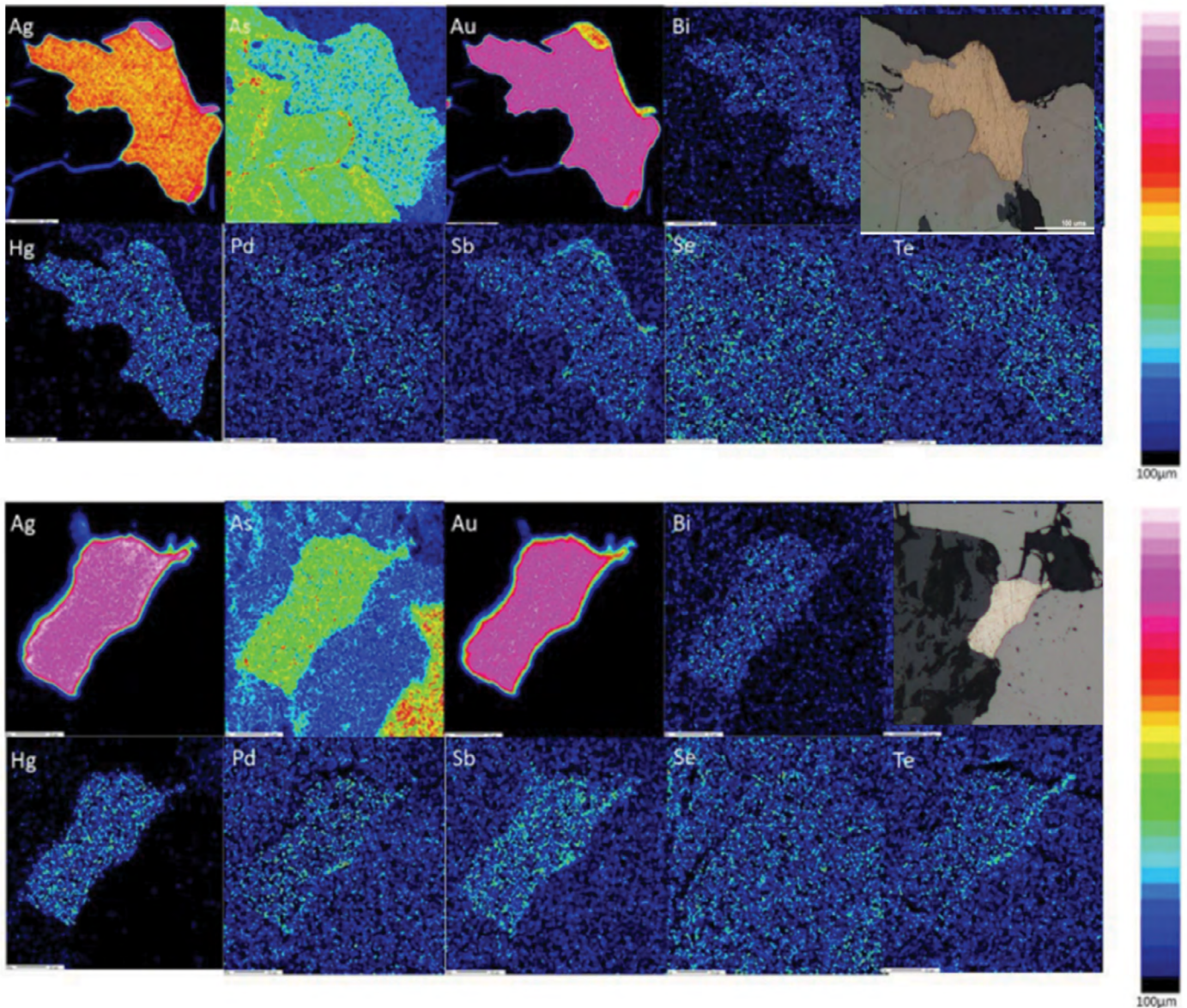
El análisis de algunas partículas de oro seleccionadas aleatoriamente muestran que la variación de los contenidos de oro oscila entre 20 wt% y 75 wt%, con lo cual se considera tipo electrum e implica una amplia variabilidad que requiere descripción para cada una de las minas analizadas. Es importante tener en cuenta que se trata únicamente de análisis puntuales y en ningún caso puede considerarse como tendencia general, dada la falta de representatividad estadística (figura 4.20.).

Figura 4.20. Relación Au/Ag de partículas de oro analizadas con microsonda electrónica. Fuente: autores.



El oro de la mina El Limón contiene concentraciones de oro en un rango estrecho entre 46 wt% y 56 wt%, y concentraciones de oro que varían en un rango entre 42 wt% y 52 wt%. Este oro contiene cantidades pequeñas y variables de As, Hg, Sb, Te y Bi (figura 4.21.).

Figura 4.21. Mapas composicionales para oro electrum perteneciente a la mina El Limón. Fuente: autores.



Para la mina La Primavera, el oro tiene 2 comportamientos: el primero, oro entre 66 wt% y 68 wt% y plata 31 wt%, así como contenidos variables de telurio y ausencia de As y Hg. El segundo grupo de partículas de oro tiene composición de oro con valores entre 20 wt% y 45 wt%, valores de plata entre 27 wt% y 45 wt%, valores que en conjunto no superan el 70 % de elemental; ello significa que, además de telurio, debe contener otros metales que no fueron reportados (figura 4.22.).

En la mina El Brillante se identificaron 3 tipos de partículas de oro con concentración de oro diferenciada, una con valores de oro cercanos al 60 wt%. Otra muy rica en plata con más de 50 wt%, con valores de oro entre 36 wt% y 43 wt%. Y una última población con predominio de plata, mayor al 80 wt%, y oro entre 19 wt% y 20 wt%. Adicionalmente, contiene muy bajas cantidades de As y Hg, similares a la mina El Limón (figura 4.23.).

Las partículas de oro de la mina El Cristo ostentan los valores más altos de oro de toda el área, cuyo rango varía entre 54 wt% y 75 wt%. Se diferencia en 2 poblaciones: una entre 52 wt% y 54 wt%, y otra de 73 wt% a 75 wt%. Adicionalmente, contiene muy bajas cantidades de As y Hg, similares a la mina El Limón (figura 4.24.).

Figura 4.22. Mapas composicionales para oro electrum perteneciente a la mina Primavera. Fuente: autores.

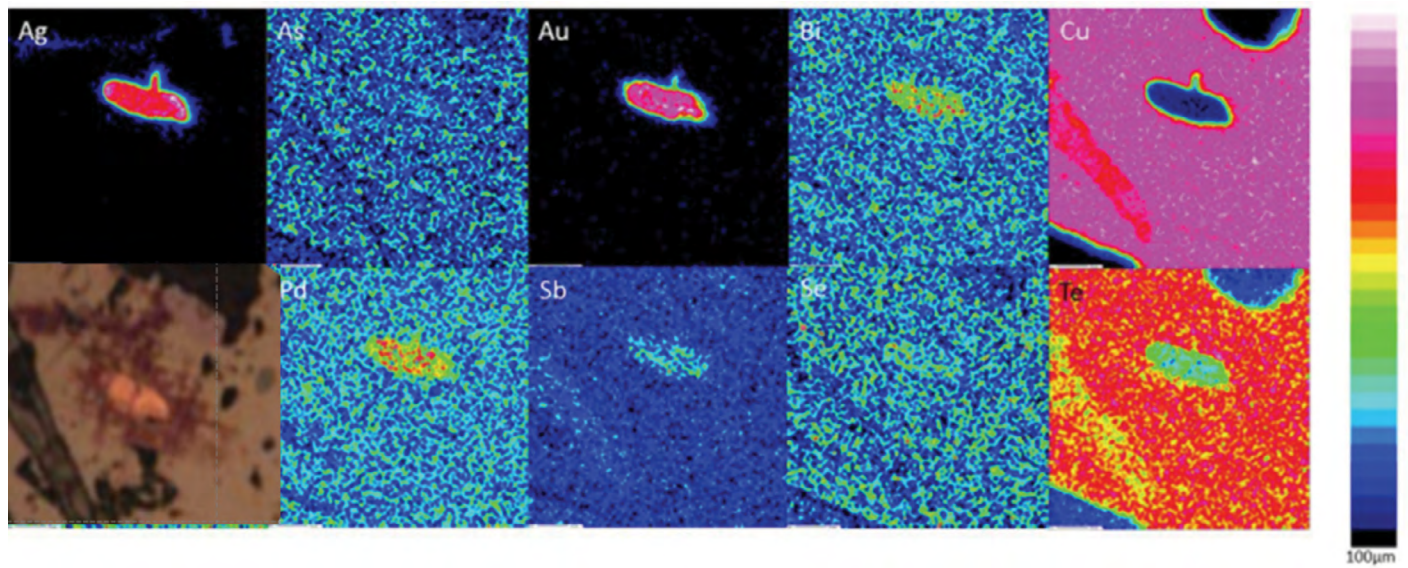
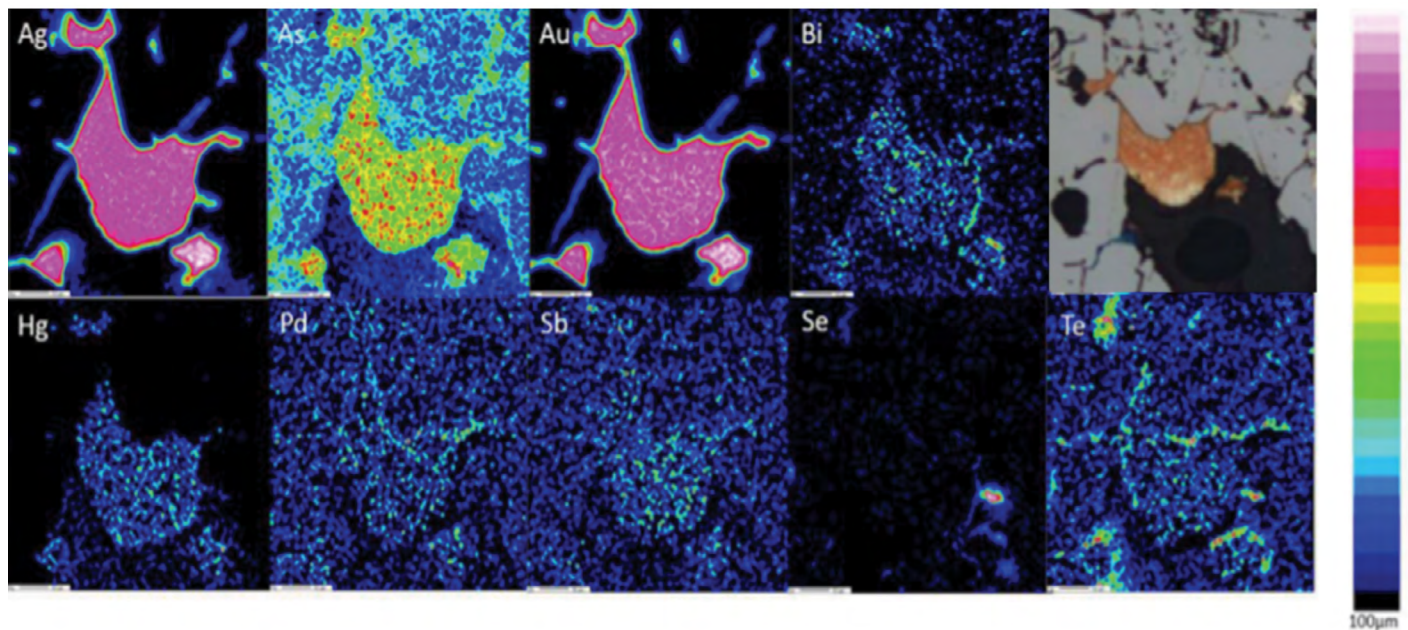


Figura 4.23. Mapas composicionales para oro electrum perteneciente a la mina El Brillante. Fuente: autores.

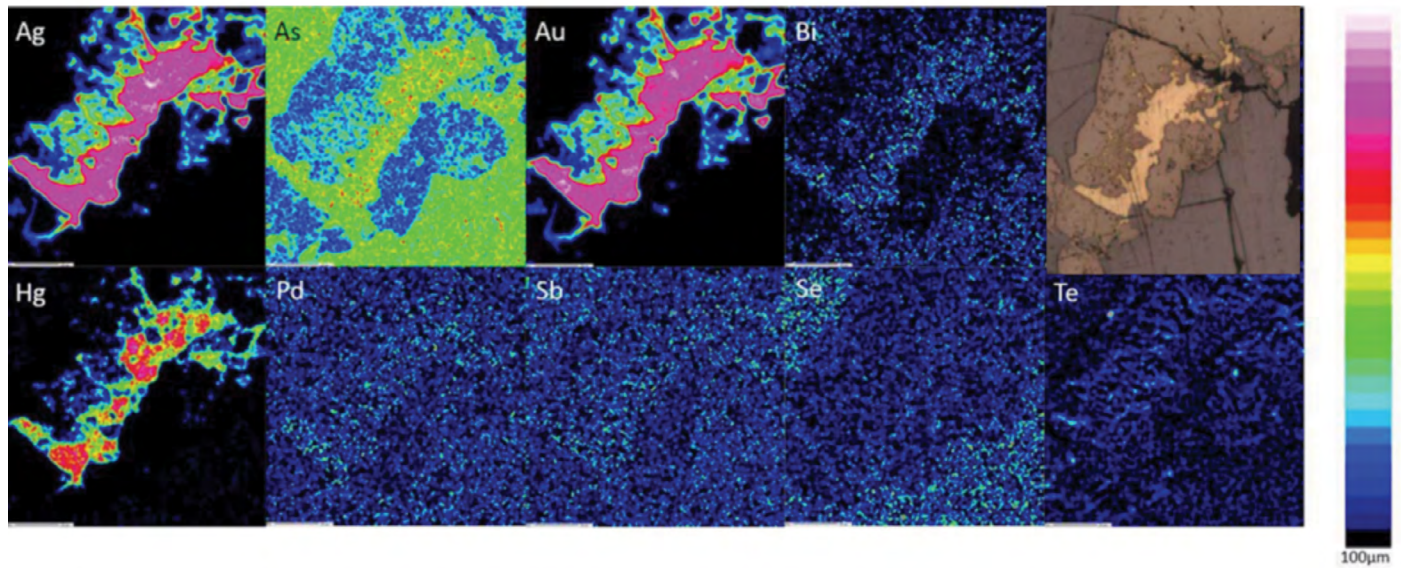


Llama la atención el contenido de Hg, As, Bi y Te en las partículas auríferas, que pone en evidencia la estrecha relación de procesos hidrotermales con soluciones ricas en As y Te, a la par que denotan un origen magmático. El mercurio contenido en los granos de oro pone de manifiesto el origen primario del mismo. Al parecer el contenido de Au en el oro de las minas de El Cristo y La Primavera es mayor que el oro de las minas El Limón, mientras que el oro de la mina El Brillante tiene los más altos contenidos de plata.

4.2.4. MODELO METALOGÉNICO

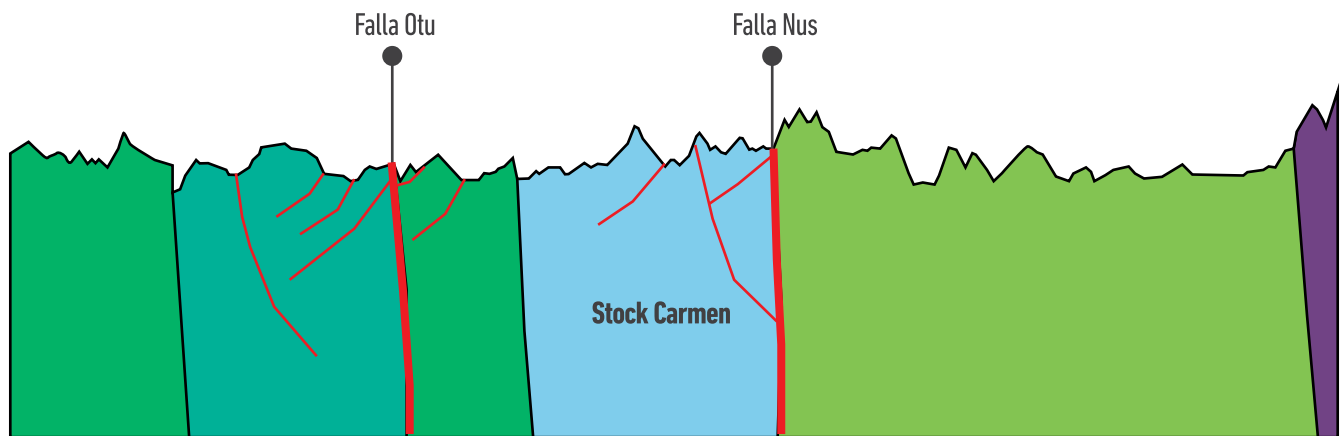
Las características estructurales exhibidas por las vetas son compatibles con un régimen de deformación dúctil-frágil, lo cual es característico de los depósitos de oro orogénico, tipo mesozonal/epizonal, con alta presión de fluidos (Ordóñez et al., 2005). Se observaron eventos mineralizantes consecutivos, algunos de ellos con precipitación de sulfuros y oro en vetas de cuarzo ya deformadas; otros relacionados con diques máficos emplazados en zonas de cizalla, con desarrollo de atracción sericítica adyacente a las zonas proximales mineralizadas.

Figura 4.24. Mapas composicionales para oro electrum perteneciente a la mina El Cristo. Fuente: autores.



Teniendo en cuenta la información bibliográfica disponible, las relaciones de campo observadas y los resultados de análisis petrográficos, y considerando la fuente de los fluidos mineralizantes de las mineralizaciones estudiadas, podrían ser de origen magmático o metamórfico, compatibles con depósitos de tipo oro orogénico o relacionado con intrusivos (IRGD) (figura 4.25.).

Figura 4.25. Modelo metalogénico del área de Zaragoza. Fuente: autores.



4.3. ANÁLISIS PETROGRÁFICOS DE MATERIAL DE PROCESO METALÚRGICO

Teniendo en cuenta que el distrito minero es muy extenso y que existe gran cantidad de explotaciones mineras, desde minería artesanal hasta mediana minería, se seleccionaron explotaciones mineras que han eliminado el mercurio en sus procesos y que quieren mejorar su recuperación. Las operaciones mineras tecnificadas que cuentan con plantas de beneficio de uso continuo y que tienen personal técnico calificado solo se documentan como referencia, ya que sus procesos extractivos y sus procesos metalúrgicos no fueron evaluados.

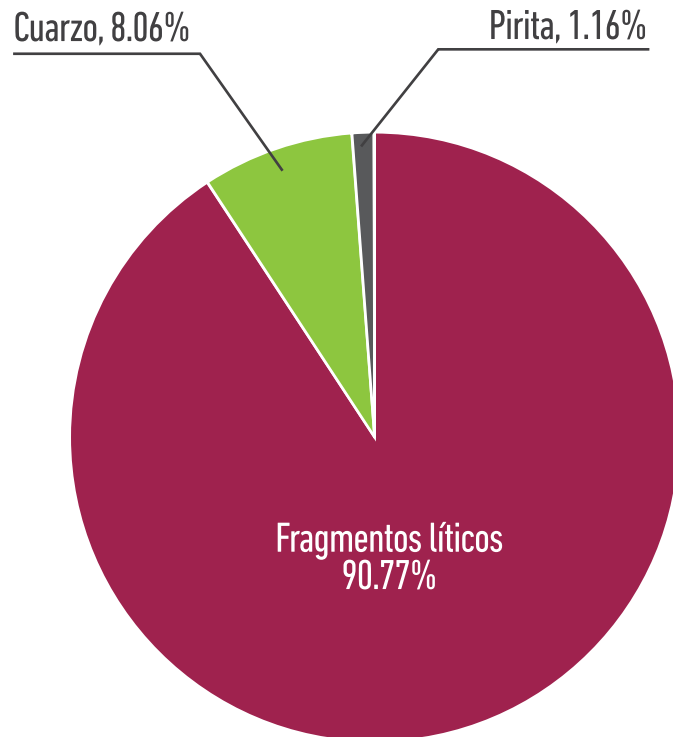
El material de cabeza se analiza considerando el tamaño de grano, el grado de liberación, la asociación de minerales y el tamaño de oro encontrado mediante análisis petrográficos para cada una de las plantas de

beneficio instaladas y analizadas, en los municipios de la zona minera. Se seleccionaron las operaciones mineras de las minas Mineros, Oro Verde, El Limón, Los Pisones, La Primavera y El Cristo, descritas a continuación.

4.3.1. SULFUROS EN LA MINA LA PRIMAVERA

Los análisis mineralógicos realizados a la muestra de cabeza de proceso colectada en la mina La Primavera indican que la distribución mineralógica en porcentaje en peso de la mena está representada por fragmentos líticos derivados de la roca encajante (90,7 %), ganga de cuarzo (8,1 %) y pirita (1,2 %) y cantidades menores de arseopirita, calcopirita y carbonatos (figura 4.26.).

Figura 4.26. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina La Primavera. Fuente: autores.



La liberación de partículas ocurre en las primeras etapas de molienda. Considerando un sistema binario de ganga-sulfuros, se observa que en su mayoría los sulfuros se hallan libres. Sin embargo, una pequeña porción de sulfuros asociados a ganga en proporciones menores al 40 % se halla en las fracciones gruesas por debajo de 425 micrones, mientras que menos del 5 % de los sulfuros se halla libre en la fracción de 45 a 75 μm (figura 4.27.).

La distribución de granos con sulfuros ponderados al 100 % por fracción muestra que, en las fracciones menores a 300 μm , se encuentran sulfuros asociados a ganga en proporciones variables entre el 18 % y el 40 %, mientras que una pequeña fracción se halla incluida en ganga entre 45 y 74 μm (figura 4.28.).

Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso está triturado a 1,4 mm, la distribución de tamaño general de sulfuros indica que inicialmente se halla libre el 86 % de pirita y, por debajo de 75 μm , se presenta un alto grado de liberación (figura 4.29.).

Figura 4.27. Distribución binaria por fracción de tamaño y por % de asociación de ganga (izquierda) y sulfuros (derecha) en la mina La Primavera. Fuente: autores.

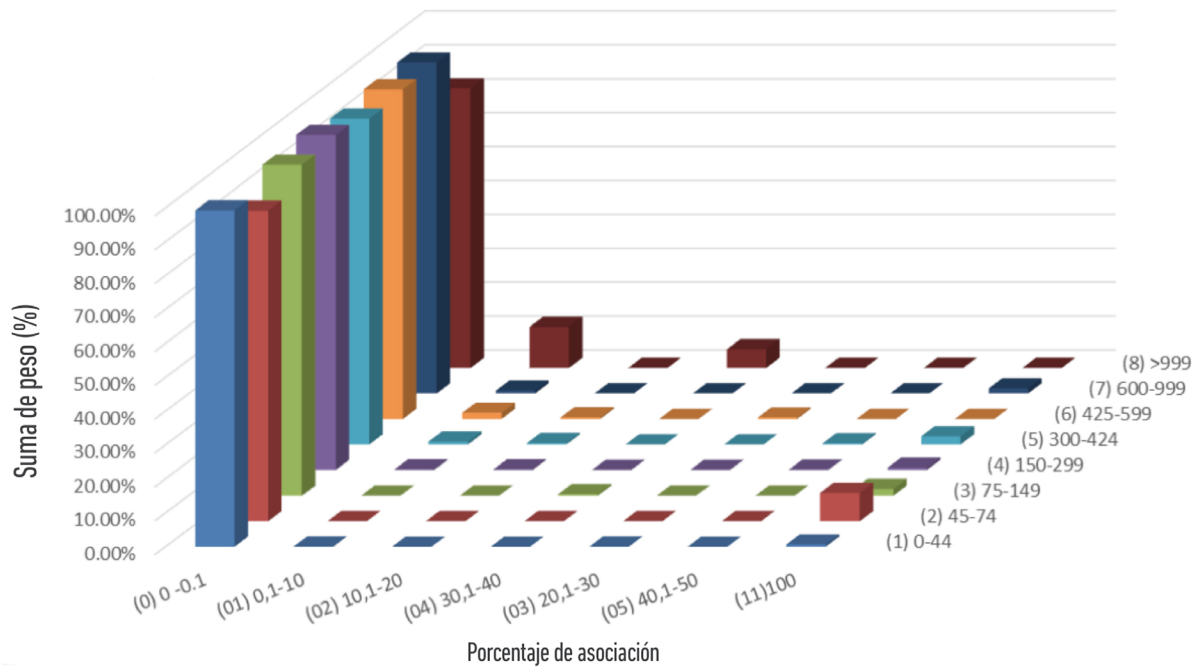


Figura 4.28. Asociación de minerales metálicos por cada fracción de tamaño en la mina La Primavera. Fuente: autores.

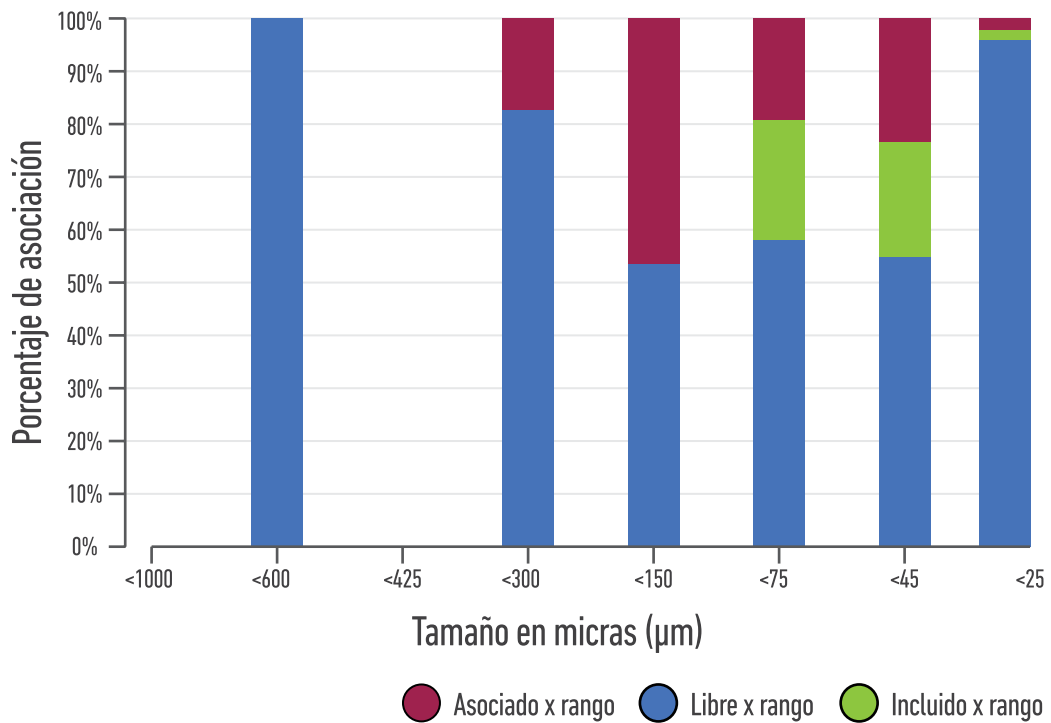
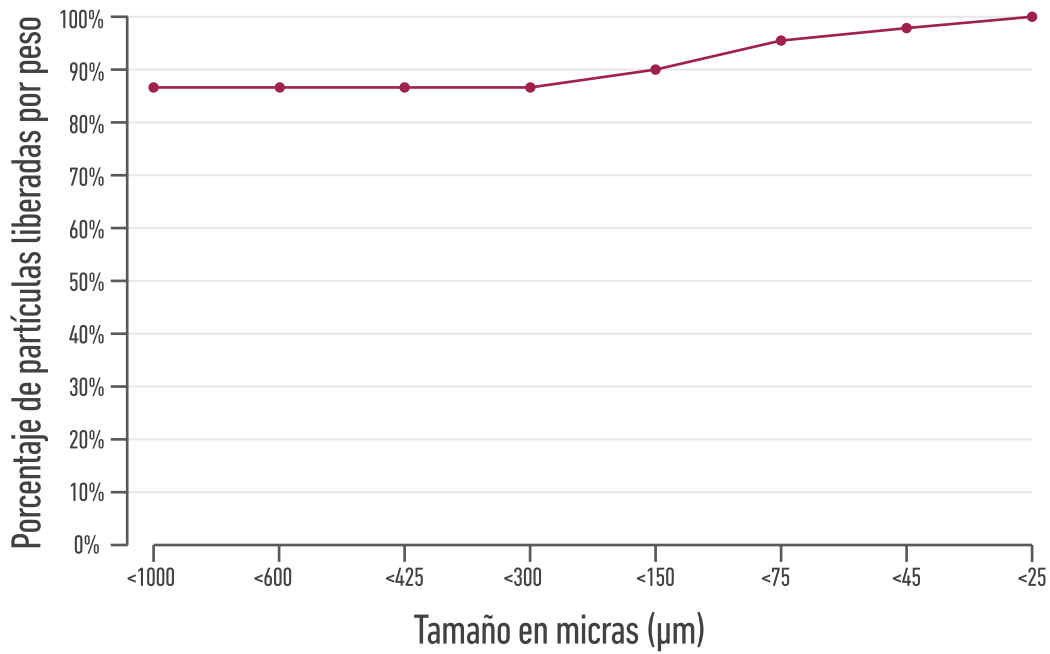


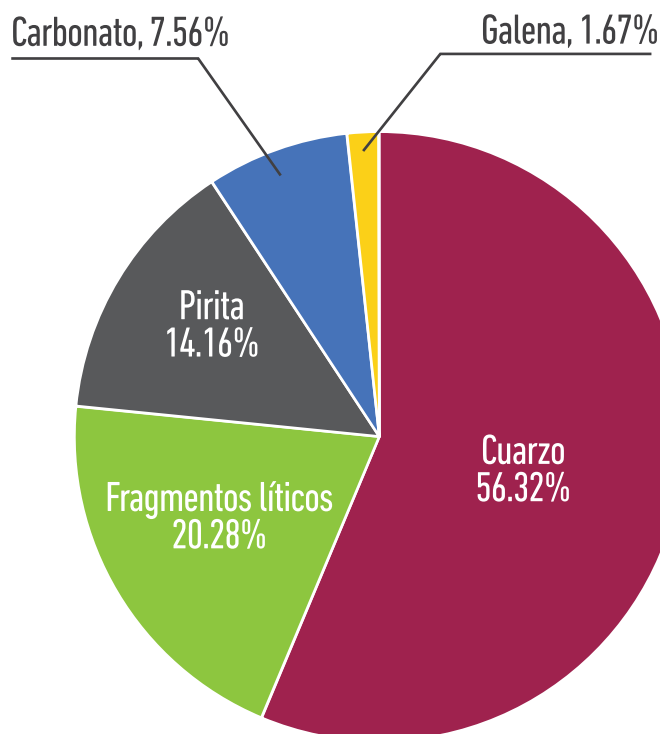
Figura 4.29. Grado de liberación de material de cabeza en la mina La Primavera. Fuente: autores.



4.3.2. SULFUROS MINA ORO VERDE

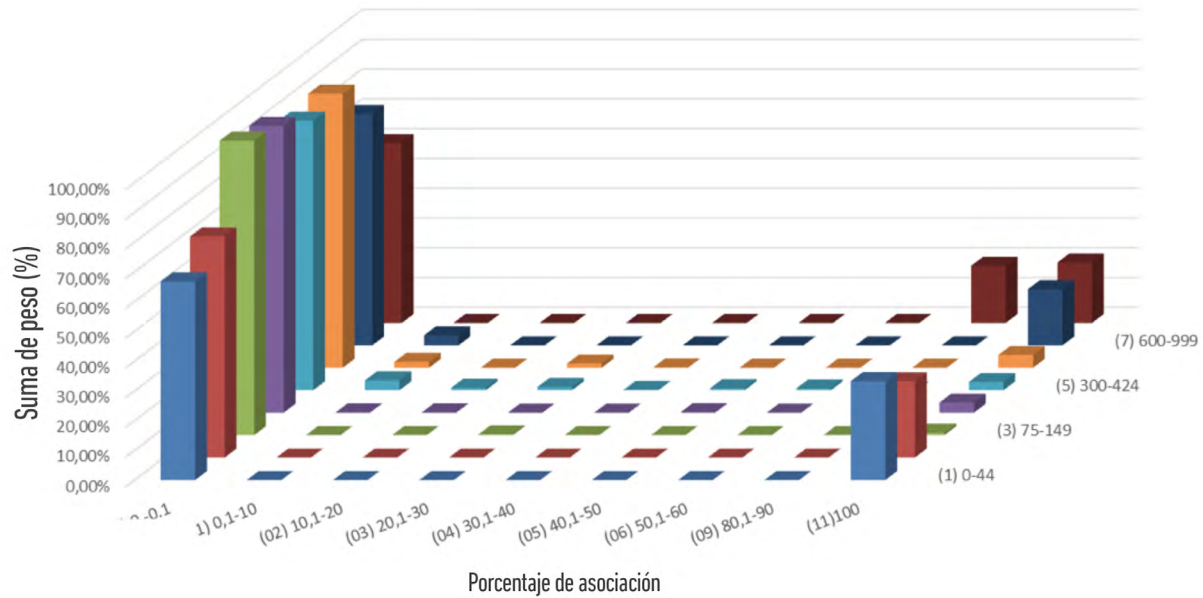
Los análisis mineralógicos realizados a la muestra de cabeza de proceso colectada en mina Oro Verde indican que la distribución mineralógica en porcentaje en peso de la mena está representada por ganga de cuarzo (56 %), fragmentos líticos derivados de la roca encajante (20,3 %), carbonatos (7,6 %), cantidades menores de sulfuros, especialmente pirita (14,2 %), y pequeñas cantidades de galena y arsenopirita (figura 4.30.).

Figura 4.30. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



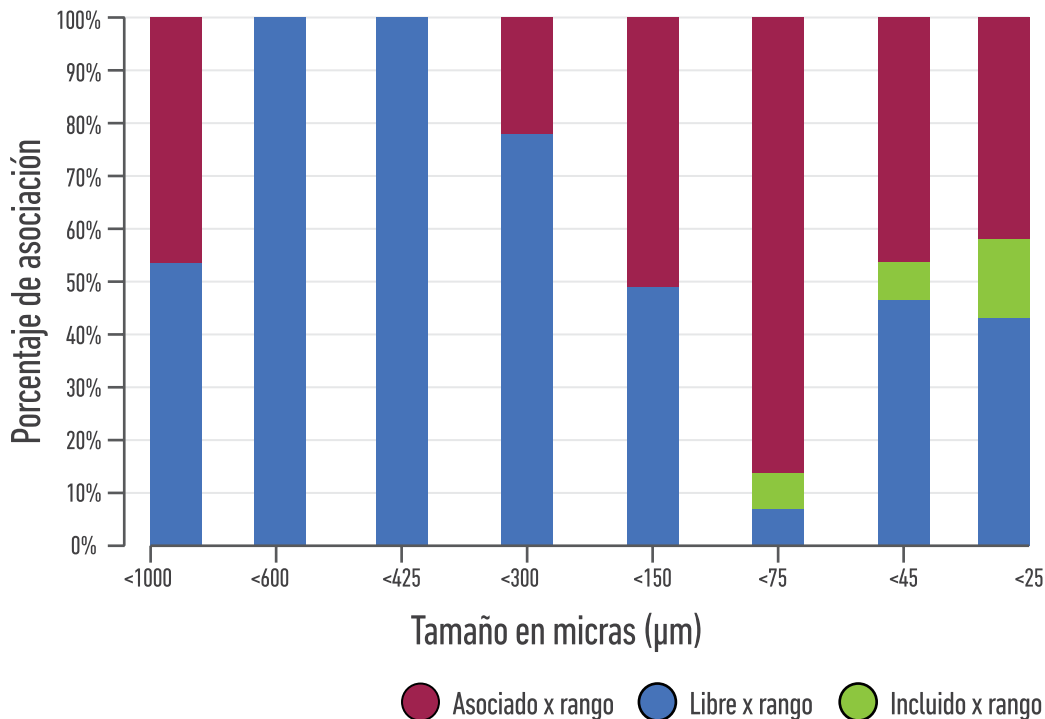
La liberación de partículas ocurre en las primeras etapas de molienda. Considerando un sistema binario de ganga-sulfuros, se observa que en su mayoría los sulfuros se hallan asociados en proporciones menores al 10 % en la fracción menor a 300 micrones, mientras que hay partículas con 90 % de asociación en la fracción gruesa (figura 4.31.).

Figura 4.31. Distribución binaria por fracción de tamaño y por % de asociación de ganga (izquierda) y sulfuros (derecha) en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



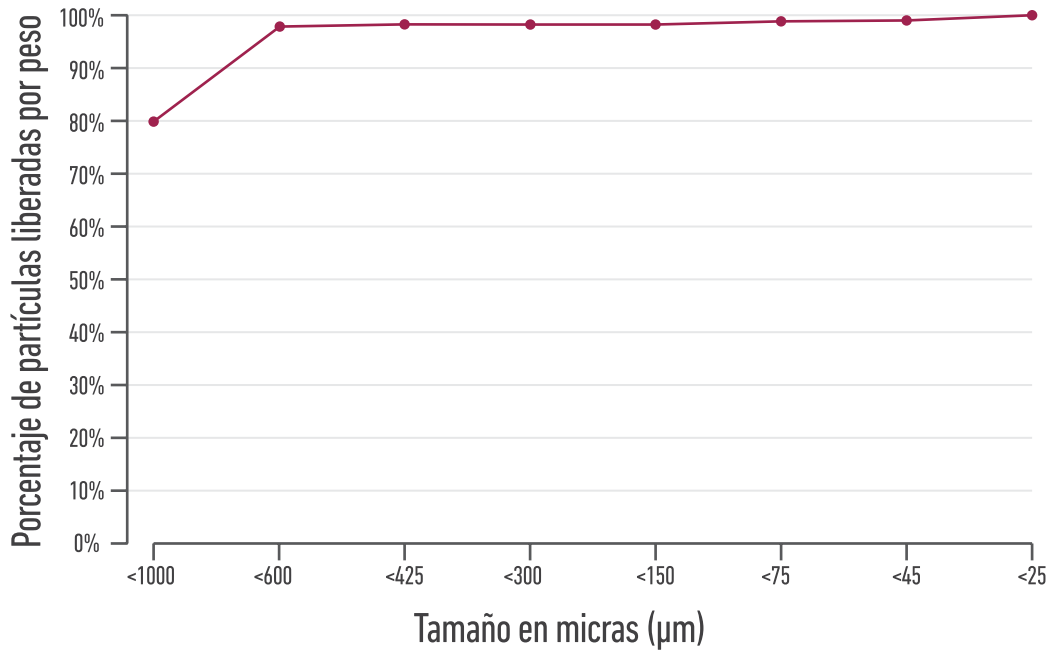
La distribución de granos con sulfuros ponderados al 100 % por fracción indica que en las fracciones menores a 300 μm se encuentran partículas asociadas, mientras que partículas de sulfuros incluidos persisten en las fracciones menores a 75 μm (figura 4.32.).

Figura 4.32. Asociación de minerales metálicos por cada fracción de tamaño en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso está triturado a 1,4 mm, la distribución de tamaño general de sulfuros indica que inicialmente se halla libre el 80 % y por debajo de 600 μm se presenta un alto grado de liberación (figura 4.33.).

Figura 4.33. Grado de liberación de material de cabeza en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



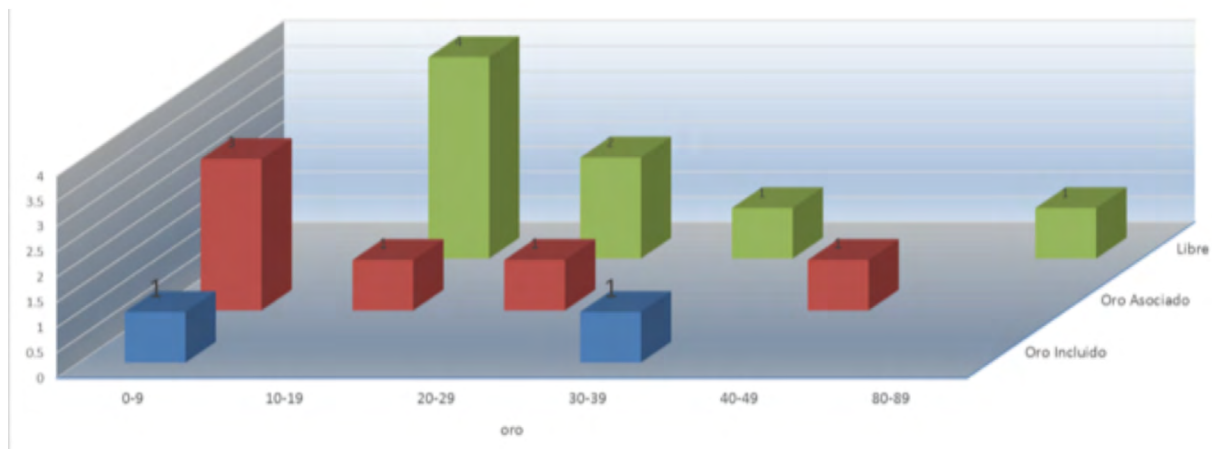
4.4. LIBERACIÓN DE ORO

Se toma como base las partículas de oro halladas en los concentrados de batea de cada una de las cabezas de proceso de las minas seleccionadas. Las dimensiones como tamaño de grano se realizan con el diámetro equivalente de una esfera (D2Eq) y su peso calculado con el producto del volumen de una esfera multiplicado por su densidad.

4.4.1. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LA YE

Un total de 16 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina La Ye, de las cuales 8 están libres, 6 asociadas y 2 incluidas. Considerando el diámetro equivalente se observa predominio de las partículas libres menores a 90 μm (figura 4.34.)

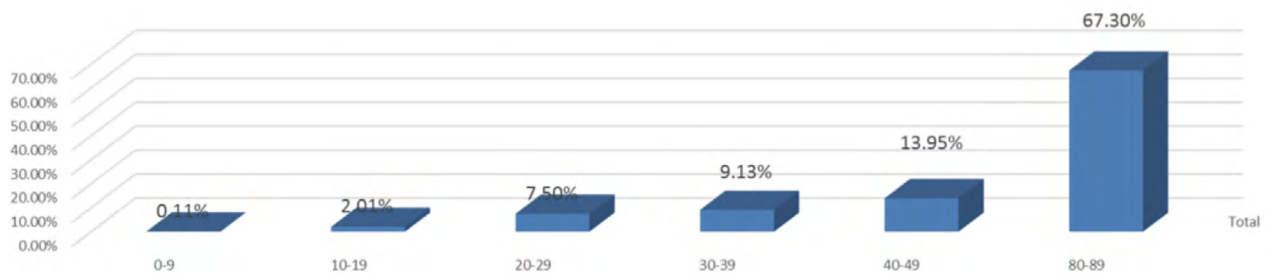
Figura 4.34. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación en la mina La Ye. Fuente: autores.



La distribución en peso de las partículas de oro indica que el 80 % del oro se halla libre, el 16 % asociado a galena y pirita, y el 4 % incluido en galena. La porción mayoritaria equivale a oro libre de tamaño entre 80 y 90 μm ; asociado a galena se encuentra cerca del 13 % del oro y asociado a pirita tan solo el 3 %, con la característica de tener tamaño inferior a 50 μm .

La distribución general del oro en peso indica prevalencia de tamaño entre 80 y 90 μm y representa cerca del 67 %. Este oro es recuperable por métodos convencionales, mientras que el 33 % restante menor a 50 μm requiere de técnicas no convencionales de recuperación (figura 4.35.).

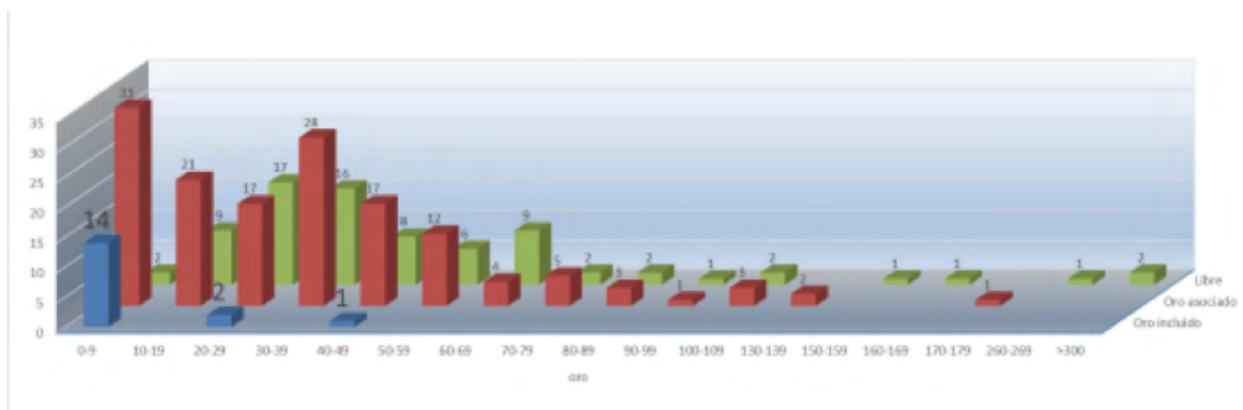
Figura 4.35. Distribución de oro en peso total de la mina La Ye. Fuente: autores.



4.4.2. LIBERACIÓN DE ORO MINA ORO VERDE

Un total de 243 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina Oro Verde, de las cuales la mayoría (147) están asociadas, mientras que 79 están asociadas a sulfuros y 17 están incluidas en sulfuros. Considerando el diámetro equivalente se observa predominio de las partículas libres y asociadas son menores a 70 μm (figura 4.36.).

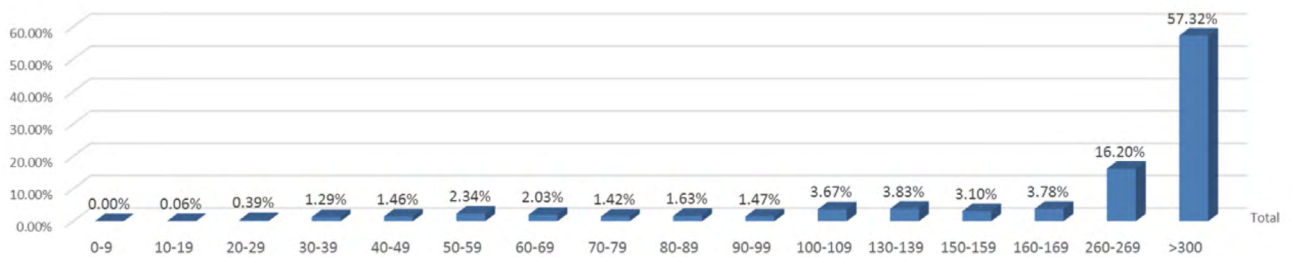
Figura 4.36. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



La distribución en peso de las partículas de oro indica que el 87 % del oro se encuentra libre, mientras que las partículas asociadas corresponden al 13 %. Considerando la distribución por rango de tamaño como el diámetro equivalente de una esfera (D2Eq), se obtiene que las partículas liberadas mayores a 100 μm representan el 83 %, mientras que el oro asociado a pirita representa el 6 % en el mismo rango.

La distribución general del oro indica prevalencia de tamaño por encima de 70 μm y representan más del 92 %. Este oro es recuperable por métodos convencionales, mientras que el 8 % restante, de menor tamaño, requiere de técnicas no convencionales (figura 4.37.).

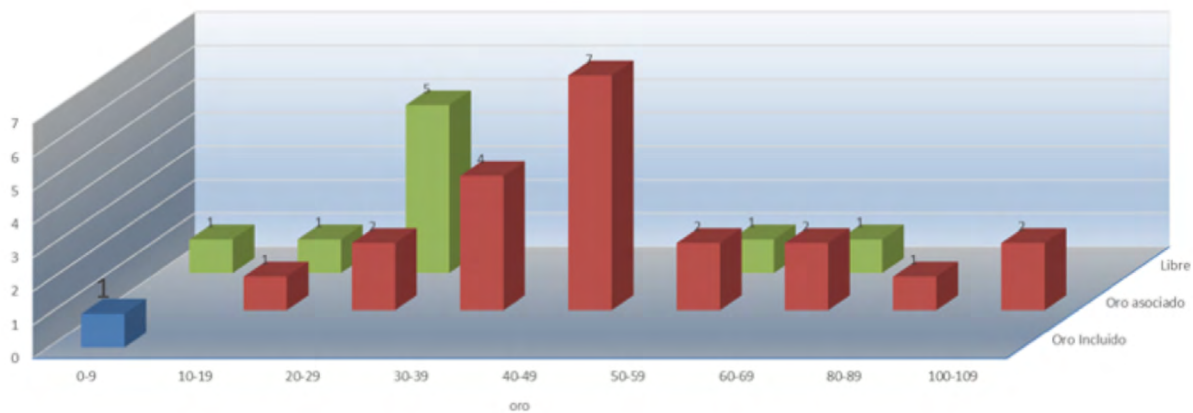
Figura 4.37. Distribución de oro en peso total en la mina Oro Verde. Fuente: autores.



4.4.3. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA EL LIMÓN

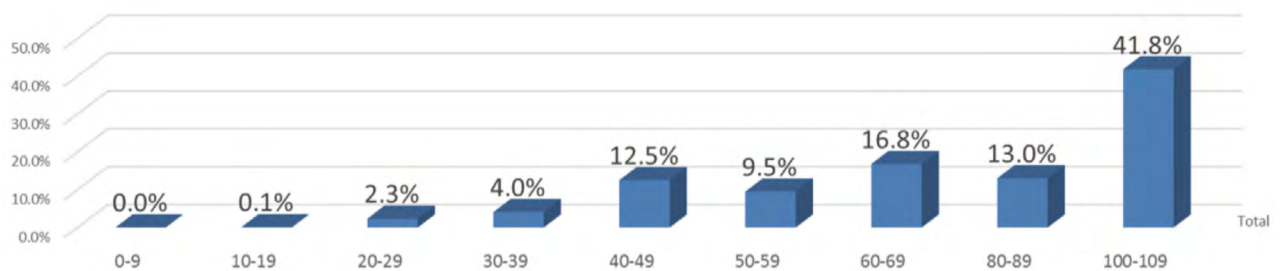
Un total de 31 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina El Limón, de las cuales 21 están asociadas, 9 libres y 1 incluida en sulfuro. Considerando el diámetro equivalente, se observa predominio de las partículas asociadas entre 30 y 110 µm, mientras que las partículas libres son predominantemente menores a 30 µm (figura 4.38.).

Figura 4.38. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación en la mina El Limón. Fuente: autores.



La distribución en peso de las partículas de oro indica que en su mayoría el oro se halla asociado a pirita y secundariamente a galena en un 91 %; el restante 9 % se encuentra liberado. Considerando la distribución por rango de tamaño como el diámetro equivalente (D2Eq) se obtiene que las partículas liberadas entre 70 y 110 µm representan el 72 % y pueden ser recuperables por gravimetría convencional, mientras que el 28 % restante requiere de técnicas específicas de recuperación (figura 4.39.).

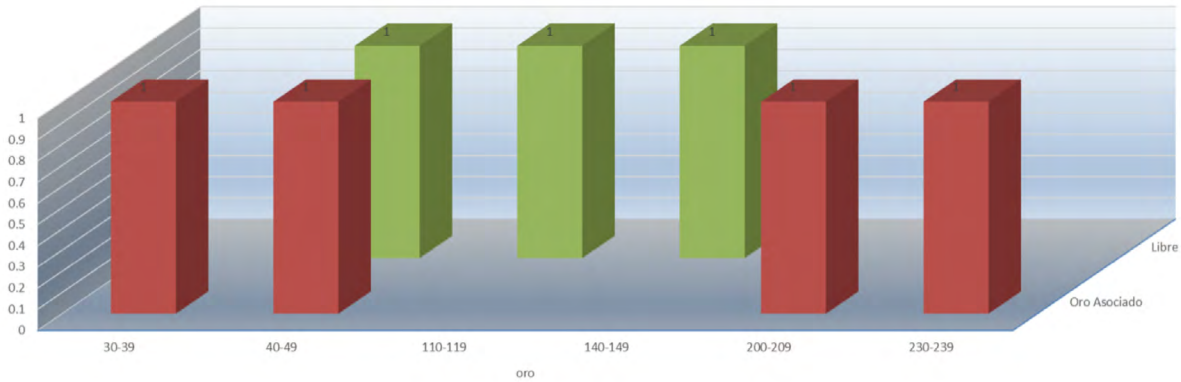
Figura 4.39. Distribución de oro en peso total en la mina El Limón. Fuente: autores.



4.4.4. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LA SILVA

Un total de 7 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina La Silva, de las cuales 3 están libres y 4 asociadas. Considerando el diámetro equivalente se observa que 4 partículas tienen entre 110 y 240 μm , mientras que las 3 restantes están por debajo de 50 μm (figura 4.40.).

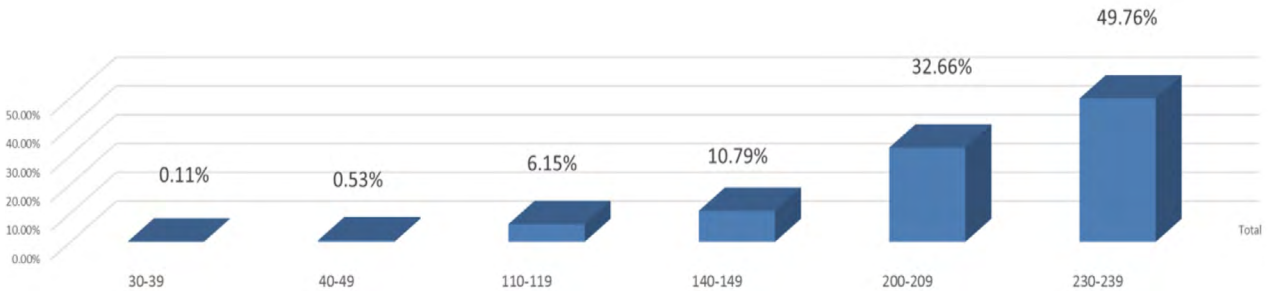
Figura 4.40. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación. La Silva. Fuente: autores.



La distribución en peso de las partículas de oro indica que cerca del 83 % del oro se halla asociado a pirita y esfalerita en partículas grandes mayores a 200 μm , mientras que el 17 % restante se encuentra libre por encima de 110 μm .

La distribución general del oro en peso indica prevalencia de partículas de tamaño entre 110 y 240 μm , y representan cerca del 99 %. Este oro es recuperable por métodos convencionales, mientras que el 1 % restante, menor a 50 μm , requiere de técnicas no convencionales de recuperación (figura 4.41.).

Figura 4.41. Distribución de oro en peso total en la mina La Silva.. Fuente: autores.

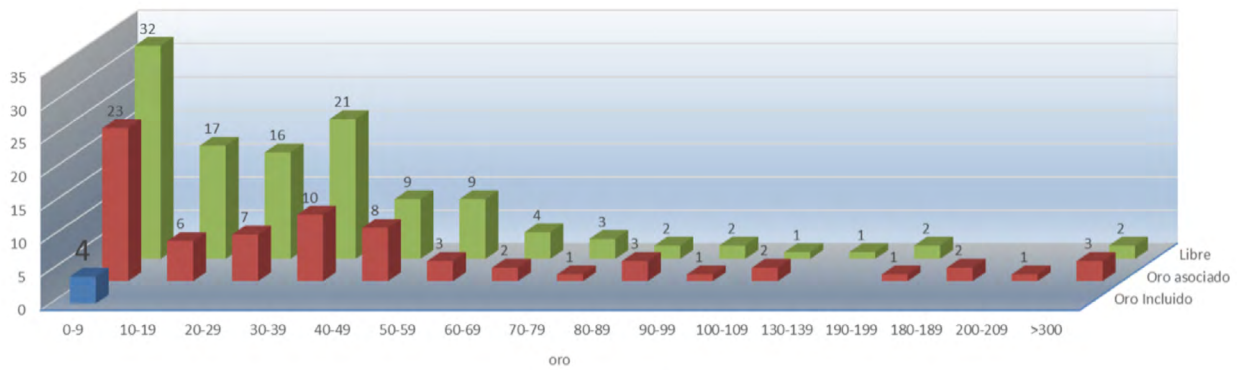


4.4.5. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LOS PISONES

Un total de 198 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina Los Pisones, de las cuales 121 están libres, 94 asociadas y 4 incluidas en sulfuros. Considerando el diámetro equivalente, se observa predominio de las partículas libres y asociadas menores a 80 μm y una pequeña población de partículas de mayor tamaño entre 80 y más de 300 μm . Estas últimas no fueron reportadas en el análisis de veta intacta (figuras 4.42.).

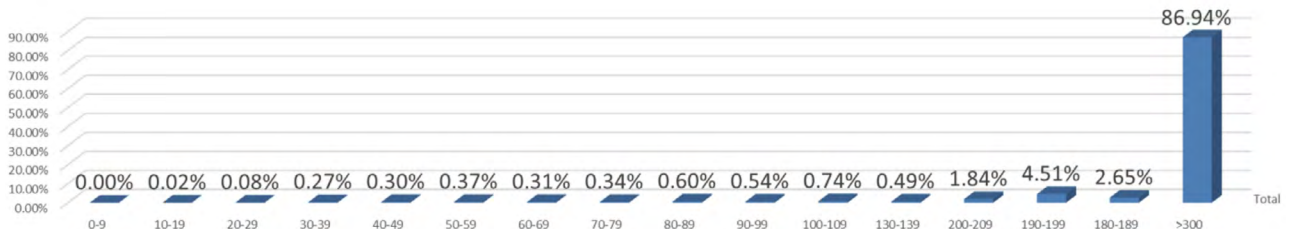
La distribución en peso de las partículas de oro indica predominio en peso de las partículas mayores a 300 μm y representan cerca del 66 %. El oro se halla asociado principalmente a galena y secundariamente a esfalerita en partículas grandes mayores 190 μm , mientras que el 34 % restante se encuentra libre por encima de 100 μm , algunos con fragmentos de galena y pirita en sus bordes.

Figura 4.42. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación en la mina Los Pisones. Fuente: autores.



La distribución general del oro en peso indica predominio de las partículas mayores a 300 µm. Se observa prevalencia de partículas de tamaño entre 100 y más de 300 µm, y representan cerca del 97 %. Este oro es recuperable por métodos convencionales, mientras que el 3 % restante, menor a 50 µm, requiere de técnicas no convencionales de recuperación (figura 4.43.).

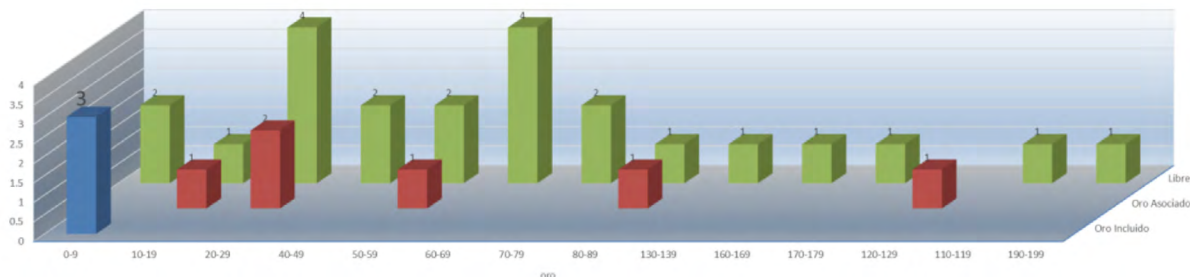
Figura 4.43. Distribución de oro en peso total en la mina Los Pisones. Fuente: autores.



4.4.6. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LA GALLINETA

Un total de 32 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina La Gallineta, de las cuales 23 están libres, 6 asociadas y 3 están incluidas en sulfuros. Considerando el diámetro equivalente se observa que las partículas son menores a 200 µm, con predominio de las partículas libres menores a 80 µm. Los granos de oro asociados se distribuyen en diferentes tamaños menores a 130 µm. 3 partículas menores a 10 µm se hallan incluidas en pirita (figuras 4.44.).

Figura 4.44. Distribución de partículas por rango de tamaño y su asociación en la mina La Gallineta. Fuente: autores.

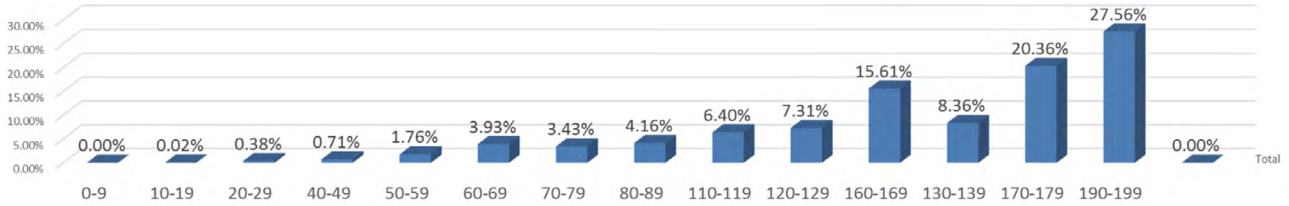


La distribución en peso de las partículas de oro indica que cerca del 90 % del oro se halla libre en partículas de hasta 180 µm; el 10 % restante, de tamaño entre 80 y 130 µm, se halla asociado principalmente a galena y secundariamente a esfalerita, mientras que el oro menor a 50 µm se asocia con pirita.

La distribución general del oro en peso muestra una tendencia creciente, especialmente por encima de 160 µm donde se halla el 72 % de la distribución. Con fines metalúrgicos, es posible que las partículas mayores

a 70 µm puedan ser recuperadas por gravimetría convencional; ellas representan el 93 %. El 7 % restante requiere de métodos más sofisticados, como flotación (figura 4.45.).

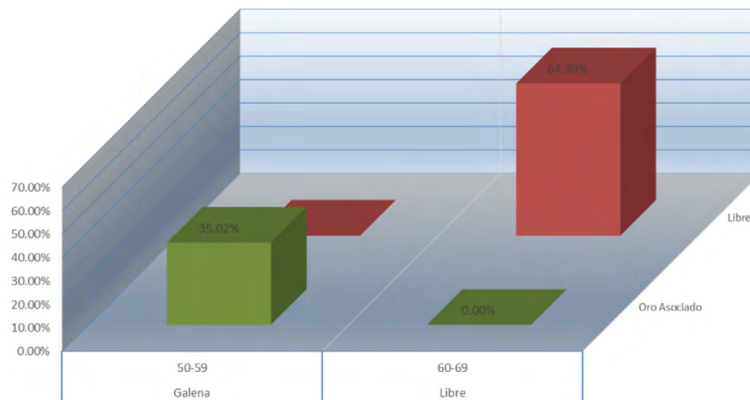
Figura 4.45. Distribución de oro en peso total en la mina La Gallineta. Fuente: autores.



4.4.7. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA EL CRISTO

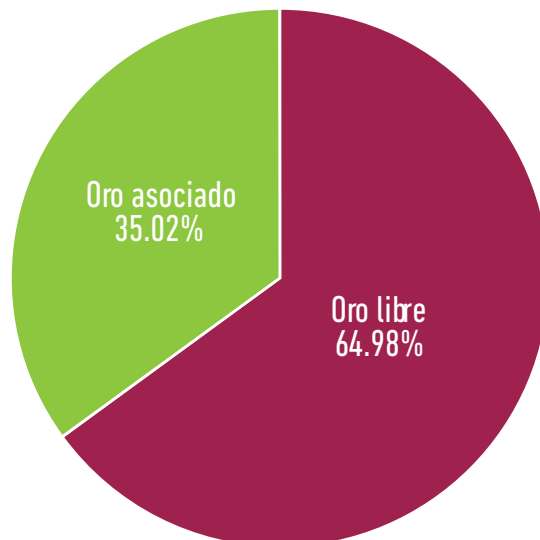
Contrario a lo observado en los análisis de veta intacta, donde se halló abundante oro de tamaño grande, en la cabeza de proceso solo se hallaron 2 granos, uno libre y otro asociado a galena (figura 4.46.).

Figura 4.46. Distribución de partículas en peso y asociación en la mina El Cristo. Fuente: autores.



La distribución en peso de las partículas de oro indica que la partícula libre representa el 65 % del oro, de tamaño entre 60 y 70 µm, mientras que la partícula asociada a galena corresponde al 35 % restante y se halla en el rango entre 50 y 60 µm.

Figura 4.47. Distribución de partículas por asociación en la mina El Cristo. Fuente: autores.



4.5. CONSIDERACIONES EN GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA PARA EL BENEFICIO

- La geología regional del área de estudio está determinada por la interacción del sistema de fallas de Palestina que tiene dirección predominante N-S y ha sido considerada como una zona de sutura entre bloques tectónicos.
- Se han diferenciado 2 sectores, según su localización geográfica y a su contexto geológico de las rocas encajantes: el sector oriental y sector central donde existen diferencias de mineralización, roca encajante y fluidos mineralizantes.
- En general, la alteración hidrotermal predominante es una sericitización moderada en bordes de filones, especialmente en roca granitoides. En ocasiones la sericitización viene acompañada de recristalización de cuarzo, pirita y carbonatos diseminados o en parches.
- En términos generales, la mineralización aurífera está relacionada con filones de cuarzo lechoso con textura masiva, dispuestos en bandas con sucesivos eventos de mineralización y un bajo contenido de sulfuros. Pirita es el mineral más abundante, con pequeñas cantidades de galena, esfalerita, calcopirita, tetraedrita y ocasionalmente pirrotina, embebidos en una matriz de cuarzo. Por lo general, los sulfuros se producen en bandas subparalelas discontinuas y en parches a lo largo de las vetas.
- Una vez caracterizadas las menas se concluye que una única unidad geometalúrgica de mineralogía simple de cuarzo (>95 %) y pirita hasta un 5 %; con rocas encajantes de origen ígneo y metamórfico con alteración hidrotermal incipiente; con sulfuros de fácil liberación y con tamaño de grano de oro esencialmente menor a 70 μm , pero poco representativo en peso, constituyen las características mineralúrgicas propias del área minera.
- Para el oro de veta intacta se establece que el diámetro equivalente (D2Eq) de las partículas de oro analizadas se encuentran por debajo de 50 μm y solo algunas son de tamaño entre 100 y 320 μm de longitud; sin embargo, es importante resaltar que estas partículas de gran tamaño representan el 99 % en peso.
- La clasificación del oro en el área de Zaragoza es tipo electrum, con valores de plata variable entre el 40 % y el 60 %, y puede alcanzar hasta el 80 %. Al parecer las partículas de oro en las minas El Cristo y La Primavera tienen los valores más altos de Au hasta con el 75 %, mientras que el oro de la mina El Brillante tiene los más altos contenidos de plata.
- Las partículas de oro contienen cantidades menores de Hg, Te, Sb y As, principalmente en la mina El Brillante y El Cristo.
- Las composiciones mineralógicas de las cabezas de proceso muestran contenidos altos de pirita en las minas Oro Verde, La Ye y El Limón, menores al 10 %. Las menas con más altos contenidos de cuarzo son las minas Los Pisones y El Cristo, mayores al 60 %. Las minas con más altos contenidos de fragmentos líticos de roca son, en su orden, La Primavera, El Limón y La Ye, con valores por encima del 37 %, de menor dureza para la conminución.
- La liberación de partículas en la etapa primaria de molienda es del 80 % y superior en todas las minas, con excepción de la mina La Ye, donde la liberación se viene presentando a medida que se reduce el tamaño de grano y alcanza el 80 % en la fracción de 150 μm .
- Los carbonatos son comunes en la mena, sin embargo, son particularmente altos en las minas del sector oriental, como las minas La Ye y Oro Verde.

- La presencia de pequeñas cantidades de pirrotina y pirita framboidal son muy poco representativas en las minas del sector central, sin embargo, la presencia de galena en minas como El Cristo, Oro Verde y Los Pisones son notables y su reactividad podría afectar los procesos de beneficio.
- En las seis plantas evaluadas, el oro que se libera parcialmente en molienda es de 212 μm . Regularmente, permanece asociado a pirita y galena, con excepción de la mina La Gallineta y La Ye, donde la mayor parte del oro se halla liberado.
- La distribución del tamaño de oro asociado corresponde a fracciones menores a 80 μm ; en fracciones de mayor tamaño el oro se halla liberado con pequeñas partículas de pirita o galena en sus bordes, como en el caso de las minas El Cristo y Oro Verde, donde las partículas de gran tamaño pueden alcanzar hasta 450 μm .
- La ocurrencia de oro está relacionada por lo menos a 2 eventos mineralizantes, donde inicialmente se encuentra asociado con pirita, calcopirita y pirrotina, en fracturas de pirita; el segundo, esencialmente, está asociado a galena y, secundariamente, a esfalerita, tetraedrita y telururos.

5. ASPECTOS MINEROS

En este capítulo se presentan los resultados de las visitas a algunas minas del municipio de Zaragoza, Subregión del Bajo Cauca Antioqueño, y las consideraciones técnicas para el desarrollo de buenas prácticas de la minería en el distrito. En el primer apartado se detallan algunos conceptos para comprender mejor el análisis que se realiza.

Detalle de malacate para la entrada de los empleados a la labor minera, con imagen de la virgen como protección en mina La Y, Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Oscar Cardona, Servicio Geológico Colombiano



5.1. FUNDAMENTOS TÉCNICO-MINEROS

5.1.1. ETAPAS DE UN PROYECTO MINERO

El proyecto minero inicia con la etapa de búsqueda de recursos minerales de interés que comprende la fase de prospección. Luego, en la exploración se realizan estudios más detallados de la geología del depósito mineral y mediante estudios de prefactibilidad y factibilidad se define si se continúa con el proyecto minero. Debido a que la continuidad del proyecto depende de diversos aspectos como las características del depósito mineral, recursos y reservas, el precio del mineral en el mercado internacional, la rentabilidad del proyecto, los aspectos sociales y de comunidades, los trámites de legalidad minera, legalidad ambiental y áreas de restricción minera son determinantes para la que se consolide del proyecto minero (Carvajal Herrera, 2008; MinMinas, 2015).

Los recursos minerales de un yacimiento pueden ser estimados sobre la base de la información geocientífica. Las reservas minerales son un subconjunto modificado de los recursos minerales indicados y medidos, y requieren la consideración de los factores modificadores que afectan la extracción; estos incluyen factores de minería, procesamiento, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, Agencia Nacional de Minería, Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales, 2018).

Una vez se establece que el proyecto minero continúa, se inicia la etapa de construcción y montaje, en la que, como su nombre lo dice, se instalan y realizan las obras y los accesos necesarios para ejecutar la etapa de explotación del mineral. En la etapa de explotación se realizan tres tipos de labores: desarrollo, preparación y operación.

Estas etapas constituyen el ideal para que un proyecto minero sea llevado a cabo, debido a que es fundamental determinar si se cuenta con recursos y reservas mineras en las fases de exploración, prefactibilidad y factibilidad, en las que se establece la viabilidad de continuar con el desarrollo del negocio minero.

La descripción detallada de las etapas de un proyecto minero se pueden considerar de la siguiente manera:

Prospección: consiste en localizar anomalías geológicas donde pueda existir un depósito mineral.

Exploración: consiste en lograr un conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa de prospección que permita plantear un modelo geológico y de recursos del yacimiento, y que conduzca a un estudio de prefactibilidad donde se defina la continuidad del proyecto.

Evaluación del proyecto: se basa en el estudio de factibilidad del proyecto, en la evaluación económica (costos, inversiones) y en el análisis de reservas. Además, se realizan los trámites legales, sociales, mineros y ambientales, así como el planeamiento minero.

Construcción y desarrollo: comprende el conjunto de actividades que permiten el acceso al yacimiento y el establecimiento de la infraestructura para el proyecto. Incluye la adquisición de permisos para iniciar la explotación, el diseño y el planeamiento detallado de la explotación, además de trabajos previos que se realizan para llegar a la mina: vías de acceso, instalaciones, servicios sanitarios, instalaciones eléctricas y de agua, campamentos, montajes mineros y de beneficio.

Desarrollo (minería subterránea): el desarrollo es una etapa intermedia entre la exploración y la extracción propiamente dicha, y comprende las labores mineras encaminadas a crear los accesos y vías internas dentro del depósito, con el fin de preparar la extracción y el transporte del mineral. El desarrollo puede ser productivo o improductivo. Este último, en minería subterránea, ocurre cuando el avance se realiza en estéril (cruzadas). En cambio, es productivo cuando el avance horizontal se realiza con extracción de mineral (construcción de guías). (MME, 2015).

Explotación: es el proceso de extracción y procesamiento de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral. También es la aplicación de un conjunto de técnicas y normas geológico-mineras y ambientales para extraer un mineral o depósito de carácter económico para su transformación y comercialización. La explotación comprende 2 etapas consecutivas:

Preparación: labores mineras que se llevan a cabo para facilitar la explotación apropiada del yacimiento o depósito, una vez se ha completado la exploración minera y se ha logrado el acceso y el desarrollo tanto en el rumbo como en el buzamiento. Las labores de preparación se realizan, en su mayoría, dentro del yacimiento e incluyen: inclinados y tambores, subniveles, sobre guías, y algunas cruzadas.

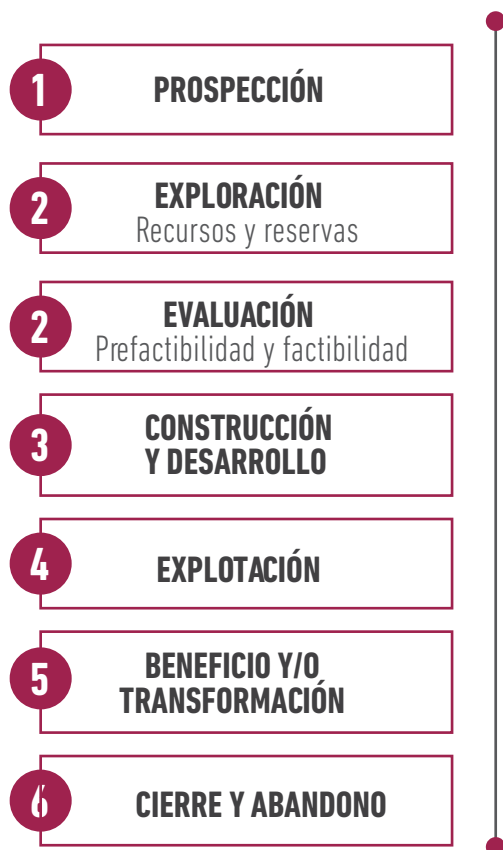
Producción: durante esta fase se extraen y procesan los materiales de interés económico, se readecúan los terrenos intervenidos y se desarrolla la mina. Durante esta etapa se ejecutan actividades y ciclos que permiten que la mina permanezca en operación y producción. Estas son operaciones unitarias ejecutadas para desprender, cargar el material y transportarlo, denominadas respectivamente: arranque, cargue y transporte.

Beneficio: conjunto de operaciones empleadas en el tratamiento de minerales que permite separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados (ganga), puede ser por medios físicos y mecánicos.

Cierre y abandono: finalización de la explotación, eliminación de montajes y de infraestructura. El abandono tiene varias fases: fase del ciclo minero donde tiene lugar la disminución gradual de la producción, ejecución del plan de cierre de la mina y la fase de ejecución del plan de restauración geomorfológica y ambiental del área intervenida, para finalmente organizar el retiro de equipos e infraestructura.

En la siguiente figura se detallan estas etapas:

Figura 5.1. Etapas de un proyecto minero. Fuente: modificado de Ministerio de Minas y Energía, 2015.



5.1.1.1. MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN

Los métodos de explotación se definen como una forma geométrica usada para explotar un yacimiento determinado. Es el modo de dividir el cuerpo mineralizado en sectores aptos para el laboreo. Los métodos de explotación adoptados dependen de varios factores, principalmente, calidad, cantidad, tamaño, forma y profundidad del depósito; accesibilidad y capital disponible (MinMinas, 2015).

El método de explotación más viable será el que permita mayor recuperación de la inversión; adicionalmente, será el que se adapte mejor a las condiciones geológicas y geométricas del yacimiento. Se debe tener en cuenta la estabilidad de las rocas, el rumbo y buzamiento de la veta y de la roca de caja, el grosor de las vetas y, asimismo, el método debe permitir buenas condiciones de seguridad minera para los trabajadores. También se deberá definir si la explotación se realiza a cielo abierto o en subterráneo.

La minería a cielo abierto comprende las actividades y operaciones mineras desarrolladas en superficie para extracción del mineral. La minería subterránea comprende las actividades y operaciones mineras desarrolladas bajo tierra o subterráneamente (figura 5.2).

Figura 5.2. Sistema y métodos de explotación. Fuente: modificado de Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente (2001).



Algunos métodos de explotación subterráneos son los siguientes:

Cámaras y pilares

En este sistema se construye una serie de aberturas de desarrollo horizontal o subhorizontal, con conexiones entre estas a intervalos regulares o irregulares que crean un patrón de cámaras y pilares. Los pilares de mineral se dejan para apoyar la roca que los recubre, pero en algunas minas, una vez que la minería ha alcanzado el límite del depósito, algunos o todos los pilares pueden retirarse para recuperarlos (Clark, Hustulid y Mero, 2017). (figura 5.3. y 5.4.)

Corte y relleno

Este método consiste en arrancar el mineral por franjas horizontales y verticales. Una vez extraída una franja, se rellena con material estéril, que sirve de piso de trabajo a los obreros y permite sostener las paredes de la cámara y, en algunos casos especiales, el techo.

Este sistema se puede adaptar a muchas formas diferentes de cuerpos de mineral y condiciones del terreno; junto con la minería de cámaras y pilares, es el método subterráneo más flexible.

Figura 5.3. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos horizontales. Fuente: modificado de Clark, Hustrulid y Mero (2017).

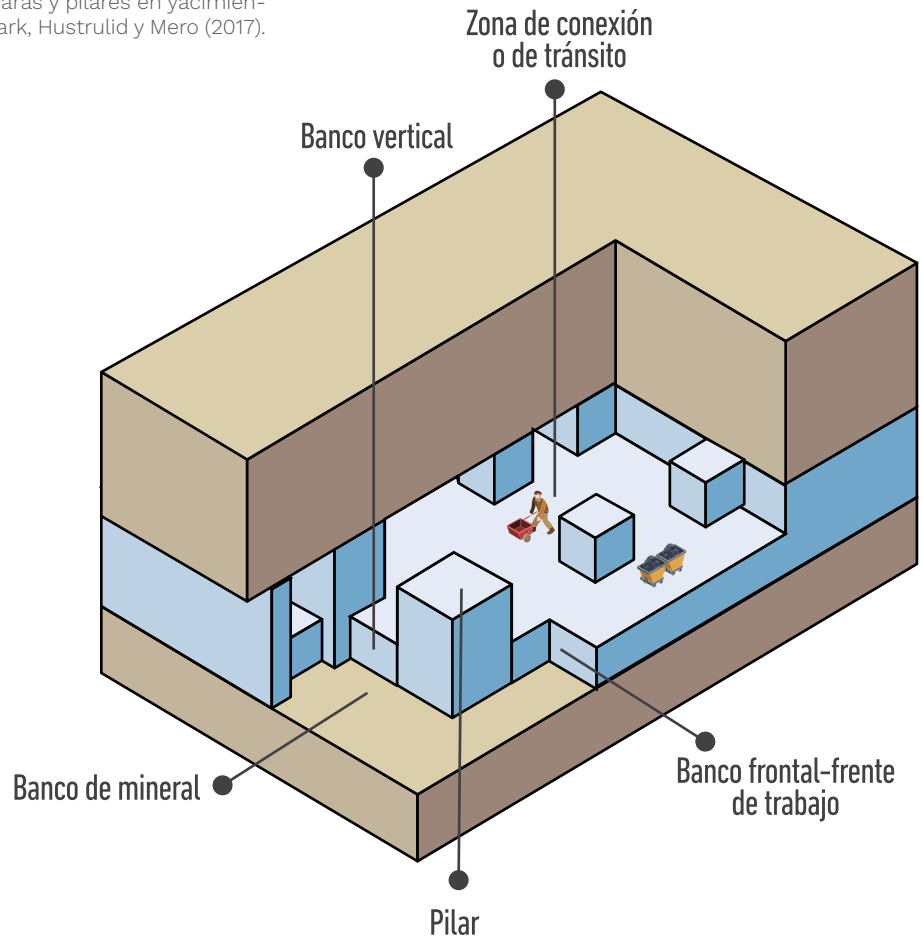
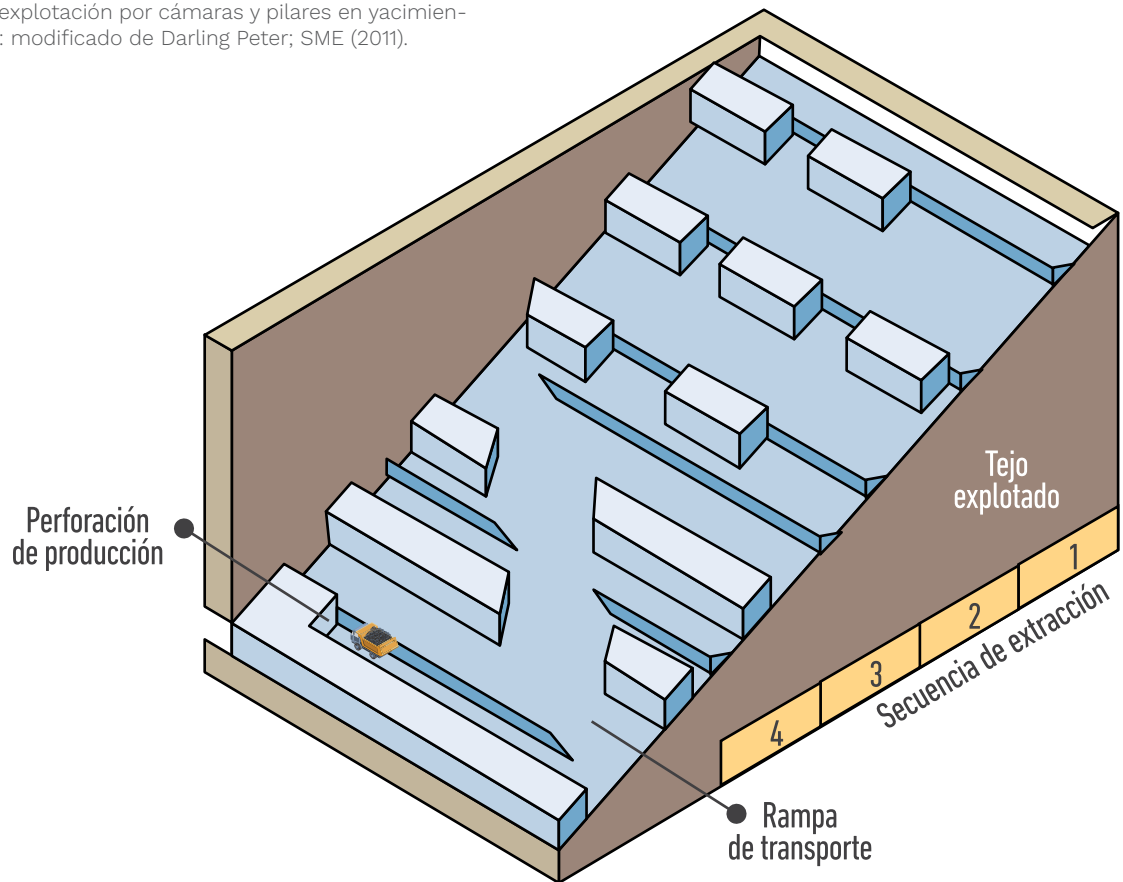


Figura 5.4. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos inclinados. Fuente: modificado de Darling Peter; SME (2011).



En corte y relleno vertical, la variación más común, comienza en el nivel inferior y avanza hacia arriba. En esta técnica (Here are the types..., 2018), el mineral se excava en franjas horizontales, después de lo cual, la pendiente (espacio minado) se llena con roca de desecho y cemento (llamado relleno). Este relleno ayuda a soportar la roca que lo recubre y evita que se derrumbe, lo que garantiza la seguridad de los mineros y el equipo, además de permitir una ventilación adecuada, contribuye a proporcionar una superficie de trabajo para que los mineros excaven secciones más altas del depósito de mineral.

Usos:

- Depósitos masivos y verticales de mineral
- Depósitos con pendientes pronunciadas (ángulo con horizontal) y buena estabilidad
- Minerales de metales de alta ley, como oro, hierro, plata y cobre
- Cuerpos de mineral de forma irregular

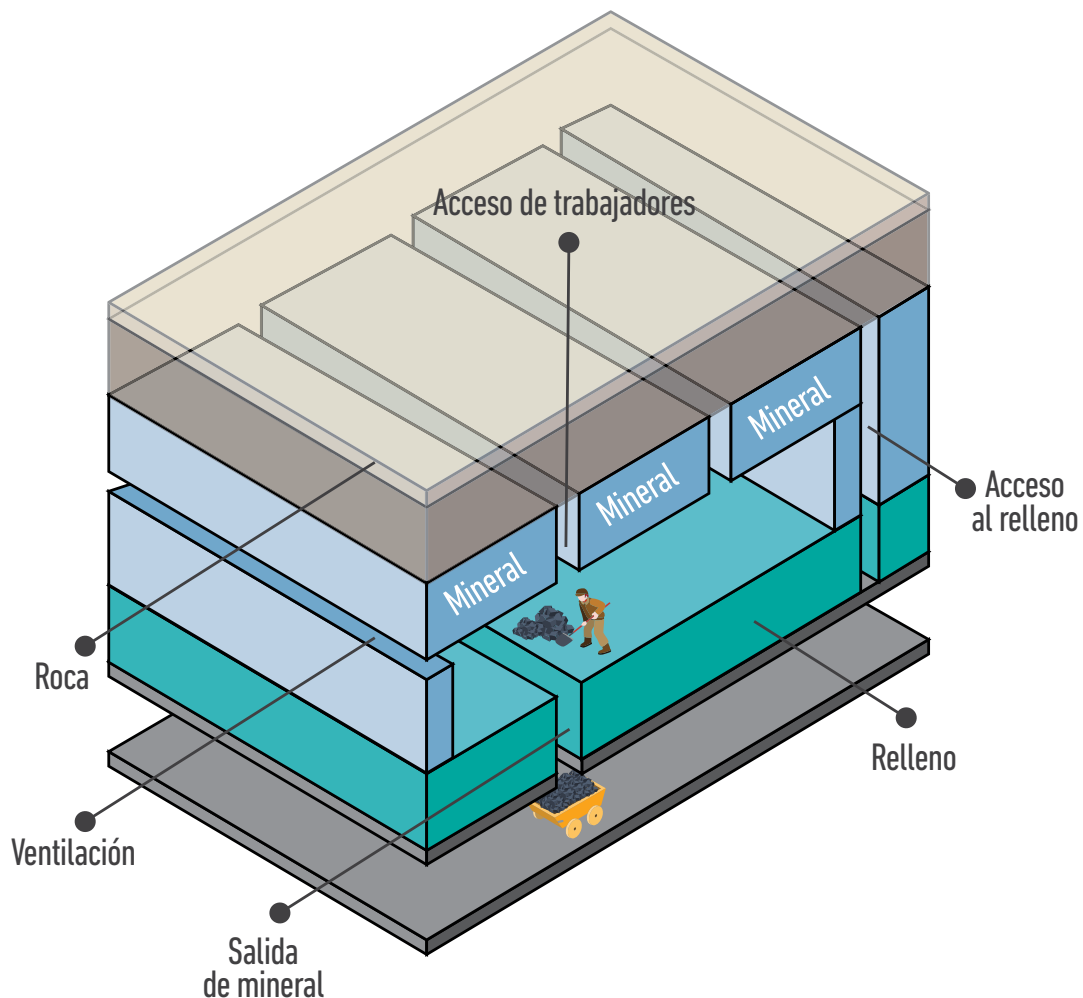
Variaciones:

Corte y relleno descendente: el trabajo avanza desde la parte superior hacia abajo. En este último caso, se debe agregar cemento al relleno para formar un techo resistente bajo el cual trabajar.

En la figura 5.5 se ilustra la minería de corte y relleno en forma escalonada, con acceso provisto por una rampa o túnel. La minería avanza hacia arriba.

Cuando las condiciones del terreno lo permiten, es posible utilizar una combinación de minería de corte y relleno, con subniveles o cámaras y pilares.

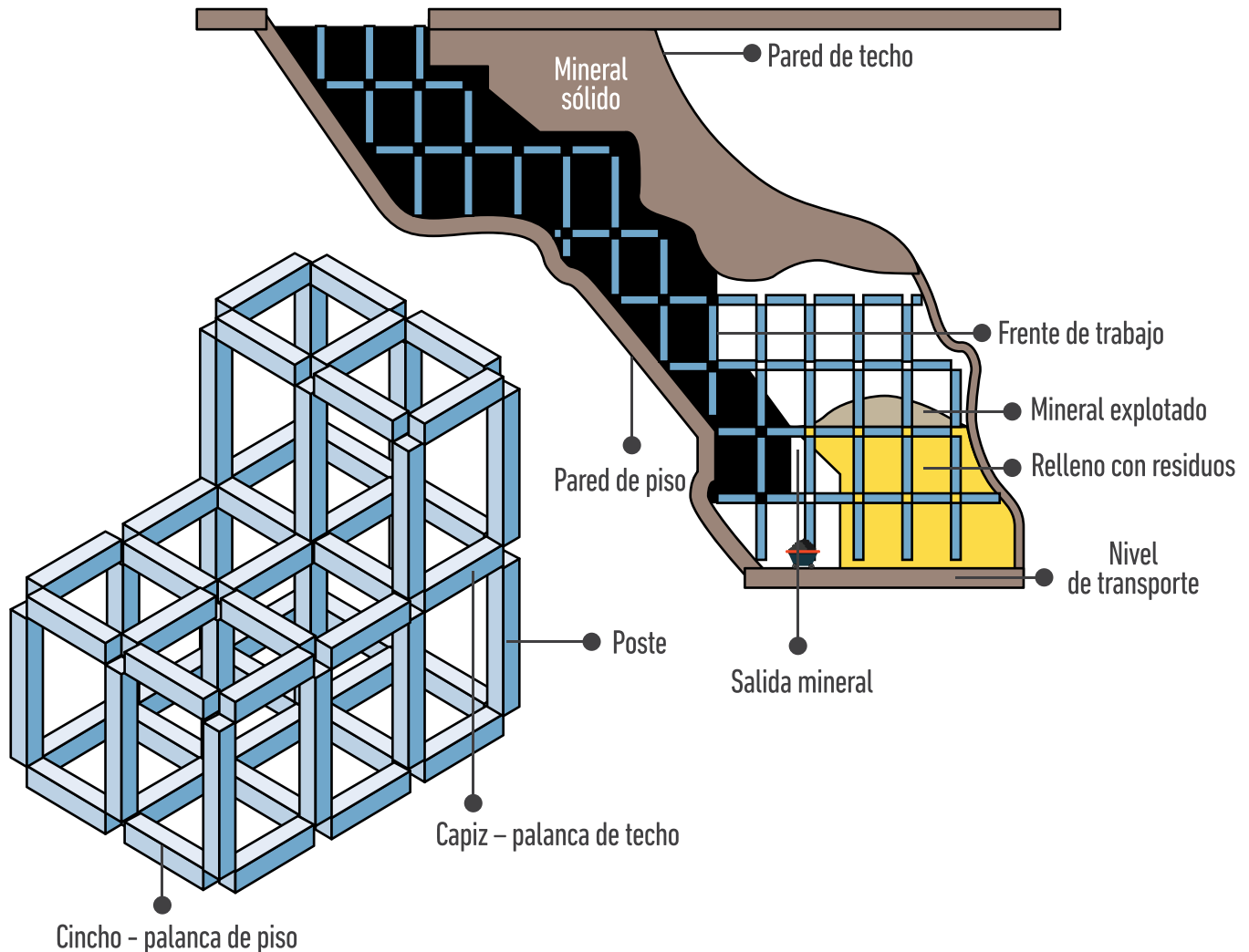
Figura 5.5. Método de explotación corte y relleno. Fuente: modificado de Here are the types... (2018).



Cámaras con soporte en cuadros

Es un método en el que las paredes y la parte posterior de la excavación están soportadas por un sistema de enclavamientos de madera enmarcados o conjunto de cuadros. Un conjunto cuadros de madera o sostenimiento (entibación) con cuadros consiste en un poste vertical y dos miembros horizontales establecidos en ángulos mutuamente rectos. El proceso de extracción es lento y solo se extrae suficiente mineral para proporcionar espacio para la instalación de cada conjunto sucesivo de madera. Las cámaras generalmente se extraen en pisos o paneles horizontales o verticales y los conjuntos de cuadros de cada piso sucesivo se enmarcan en la parte superior del piso anterior creando una red de sostenimiento. (911Metallurgist, 2017).

Figura 5.6. Método de explotación cámara con sostenimiento en cuadros. Fuente: modificado de 911 Metallurgist (2017).



Extracción selectiva (resue mining)

Es un método de minería utilizado en vetas estrechas, donde la pared de roca adyacente a la vena se elimina cortando o excavando en pasos o capa por capa, lo que permite extraer el mineral en una condición más limpia, es decir controlando la dilución del mineral.

En este método la roca de la pared adyacente a la vena mineralizada, se retira antes de que se rompa el mineral o viceversa se realiza mediante el control de disparos de la voladura primero el mineral, luego la roca estéril o viceversa. Es empleado en vetas estrechas de menos de 30 pulgadas (76 cm), se produce un mineral más limpio que cuando se rompen la pared y el mineral juntos (Tuck Michael, 2008).

Subniveles (sublevel stoping)

Es un método de explotación en el cual se extrae el mineral a través de tambores verticales, lo cual genera una excavación de grandes dimensiones, denominada cámara. El mineral arrancado se recolecta en embudos o teclas en la base o nivel de la guía de explotación.

Este método se emplea en yacimientos tabulares de forma vertical o subvertical. Los siguientes son algunos parámetros que hay que tener en cuenta para utilizar este método de explotación:

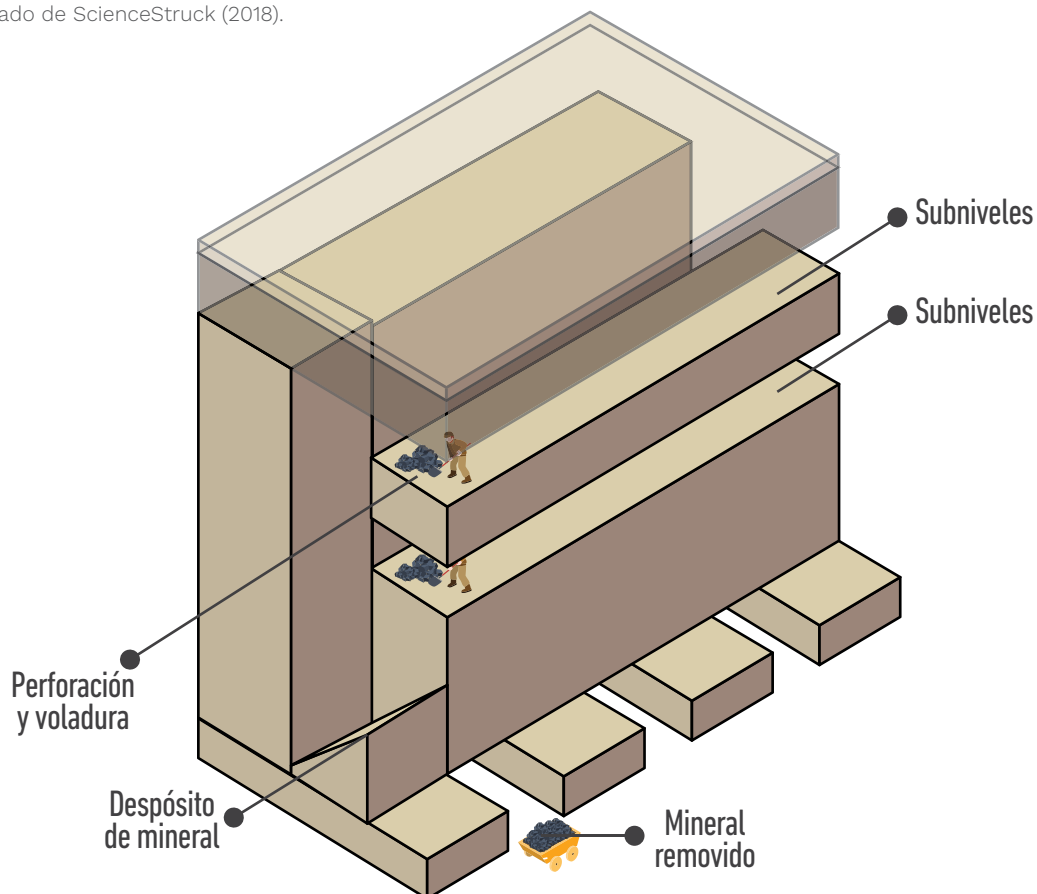
- Forma: la forma del cuerpo mineralizado debe ser tabular y regular.
- Buzamiento Dip mayor de 50° . El buzamiento debe ser mayor que el ángulo de reposo del material quebrado.
- Geotecnia: la resistencia de la roca mineralizada debe ser moderada a competente, y la roca de caja debe ser competente.
- Tamaño de pilares: las características del mineral determinan el tamaño de los pilares y bloques, estructuras, calidad del macizo rocoso y condiciones operacionales.

El método por subniveles, o sublevel stoping, que se puede utilizar tanto en vetas angostas como en yacimientos masivos, permite tener distintos niveles de trabajo conectados a través de una rampa. Para desarrollar este método de trabajo se debe contar con lo siguiente (figura 5.7.):

- Un nivel base o galería de transporte y puntos de descargue o teclas de extracción
- Zanjas recolectoras de mineral que abarcan toda la extensión del nivel de producción
- Galerías o subniveles de trabajo localizados en altura conforme a la geometría del depósito
- Una galería de acceso a los subniveles de trabajo
- Pilares que harán las veces de soporte
- Tambor o chimenea para iniciar los trabajos de extracción en labor vertical (la extracción se puede hacer de manera ascendente o descendente)

Figura 5.7. Método por subniveles.

Fuente: modificado de ScienceStruck (2018).



El método puede presentar variaciones para ajustarse a las condiciones de la mineralización. Por ejemplo, puede realizarse mediante subniveles en retirada (sublevel retreat), método en el que se requiere un solo nivel para llevar a cabo las actividades de producción; la extracción se realiza en un solo sentido.

Método de tambores paralelos

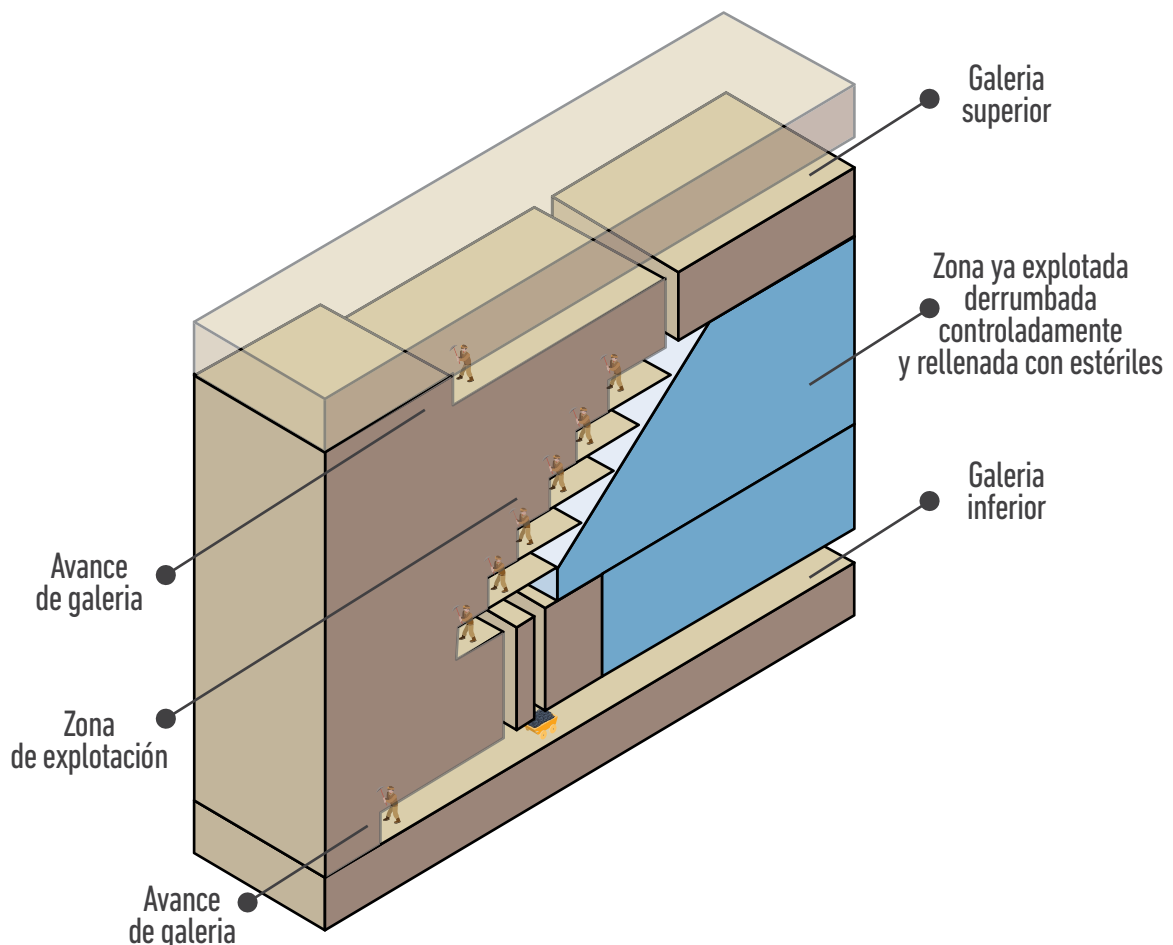
- Se utiliza en mineralizaciones con inclinaciones superiores a los 35°.
- Dependiendo de la dureza de los respaldos, se define si se requiere sostenimiento. Cuando los respaldos son inconsistentes se utiliza sostenimiento en cuadros.
- Los tambores avanzan por el filón siguiendo el buzamiento.
- Se construye un tambor para transporte de material y otro para transporte de personal.
- Se realiza avance en ascenso con frentes cortos y se van formando cámaras cuando los respaldos son competentes. El avance se realiza descendentemente y en frentes cortos cuando el buzamiento es fuerte (80° a 90°) (MME, 1988).

Tajos largos diagonales con testeros o frentes cortos y relleno al piso

Este método es utilizado en yacimientos con fuerte buzamiento, para lo cual se realizan niveles de trabajo. Se parte de la galería superior o inferior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchando, formando bloques escalonados que van progresando a medida que avanza la explotación.

El material explotado va cayendo por gravedad hasta la galería inferior de transporte. En vetas muy angostas requiere proceso de selección final para reducir la dilución de mineral, ver figura 5.8.

Figura 5.8. Método de explotación por testeros invertidos. Fuente: autores.



Este método de explotación es empleado en filones con fuerte buzamiento y pequeña competencia. Se practica en yacimientos de pendiente fuerte, principalmente mayores de 60°.

Los escalones son frentes cortos de explotación. En cada uno se ubica un trabajador que se sostiene en un planchón o soporte bajo el techo del mineral que se va a arrancar.

Se puede emplear relleno para controlar los vacíos.

Se inicia en una galería inferior o superior y se abre un frente de trabajo que se va ensanchado y formando bloques escalonados. El descargue se realiza por gravedad hasta la galería inferior, (MME, 1988).

5.1.2. MÉTODOS DE ARRANQUE

Esta operación corresponde a “la fragmentación del macizo rocoso hasta llevarlo a un tamaño que permita su manipulación para ser cargado y transportado. El arranque puede ser realizado con métodos mecánicos (forma continua y discontinua) y también por medio de la perforación con sustancias explosivas (forma discontinua).

”**Arranque continuo.** Se realiza por medio de la interacción mecánica de una herramienta, máquina o pieza sobre la roca para superar su resistencia y cohesión. [...] permite una extracción y un transporte en forma continua, como, por ejemplo: rozadora, rotopalas, minadores, dragas, entre otros.

”**Arranque discontinuo.** En este tipo de arranque hay unos procedimientos cíclicos e iterativos donde las técnicas más comunes son las siguientes: aplicaciones mecánicas, eléctricas, la energía química (explosivos), el láser, el calor, energía hidráulica.

Figura 5.9. Arranque manual y herramientas. Fuente: autores.



”**Arranque mecánico.** En este tipo de arranque se usan máquinas que utilizan los impactos, el rozado, la fuerza hidráulica, el rizado o la excavación para desprender el mineral. [...] Se usan máquinas de impactos, tales como martillo hidráulico, martillo eléctrico y martillo neumático [o herramientas manuales]” (MME, 2015).

El **arranque manual** con picos y cinceles y mazos se realiza principalmente para arrancar minerales blandos o de textura media.

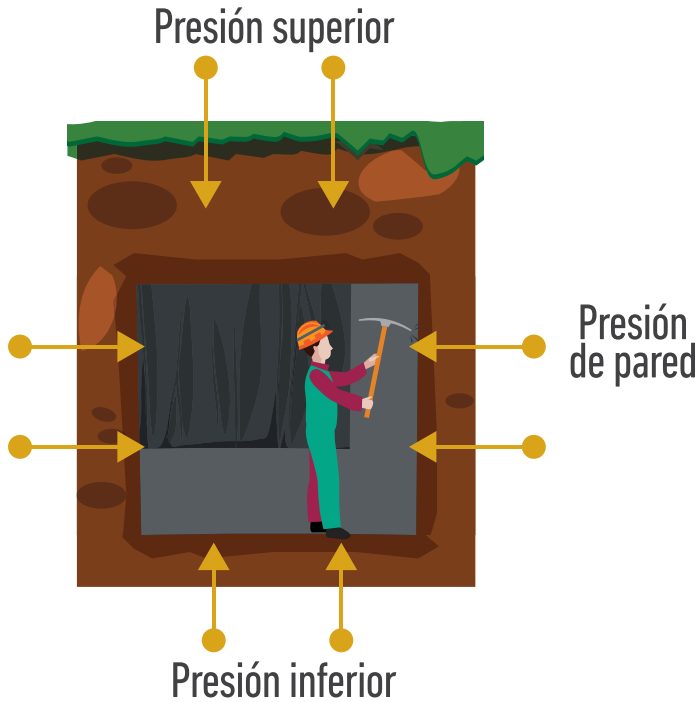
El **arranque con martillo** picador se realiza con aire comprimido y es empleado en rocas de dureza media.

El **arranque con explosivos** se utiliza para fragmentar rocas duras y se complementa con martillo picador o martillo manual.

5.1.3. TIPOS DE SOSTENIMIENTO

Las excavaciones subterráneas presentan presiones de techo, laterales y de piso debido al propio peso de la roca y al espacio generado con la construcción de la galería. según las características geológicas, resistencia, fracturamiento y estabilidad de la roca se puede determinar el tipo de sostenimiento a utilizar natural o artificial. Ver figura 5.10.

Figura 5.10. Presiones en una explotación minera. Fuente: autores.



Estos son los tipos de sostenimiento en minería subterránea:

Sostenimiento natural. Se utiliza en rocas fuertes, estables y resistentes, cuando la roca soporta resistencia a la compresión y a la tensión. El techo y el piso deben ser competentes. Para el sostenimiento natural también se utilizan soportes de material de la misma mina, como son machones y pilares, que se conforman con el mineral y soportan las presiones de la excavación.

Sostenimiento artificial. Se utiliza cuando la roca que se trabaja presenta fallas estructurales o diaclasamientos y cuando, por sus condiciones naturales, no presenta suficiente competencia para sostenerse por sí misma. Por lo tanto, para garantizar la seguridad de la explotación y del personal se requiere implementar el sostenimiento artificial. Entre estos soportes se encuentran la entibación con madera, con puertas de madera como la alemana, medias puertas, canastas y cuadros. En las construcciones y explotaciones de mayor avance tecnológico se utilizan arcos de acero y pernos de anclaje, ver figura 5.11.

“El área de las labores definidas para el transporte debe ser suficientemente amplia, de tal forma que los equipos utilizados puedan circular sin tocar los respaldos (paredes), ni el techo, para no alterar el sostenimiento en dichas labores. El área mínima libre de una excavación minera en galerías debe ser de tres metros cuadrados (3 m²) con una altura mínima de uno

Figura 5.12. Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial. Clases según Brown. Fuente: Hoek E & Brown E. T. (2007).

CLASE	CLASIFICACIÓN DE ROCA SEGÚN RESISTENCIA	RESISTENCIA UNIAxIAL (MPa)	ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL (MPa)	ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA	EJEMPLOS DE ROCA
R6 (A)	Extremadamente resistente	> 250	> 10	Golpes de martillo geológico sólo causan descostramientos superficiales de la roca.	Basalto fresco, chert, diabasa, gneiss, granito, cuarcita.
R5	Muy resistente	100 - 250	4 - 10	Un trozo de roca requiere varios golpes de martillo geológico para fracturarse.	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneiss, granodiorita, caliza, mármol, riolita, toba.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	Un trozo de roca requiere más de un golpe con el martillo geológico para fracturarse.	Caliza, mármol, filitas, arenisca, esquistos, pizarras.
R3	Moderadamente resistente	25 - 50	1 - 2	Un trozo de roca puede fracturarse con un único golpe del martillo geológico, pero no es posible descostrar la roca con un cortaplumas.	Arcillolita, carbón, concreto, esquistos, pizarra, limolitas.
R2	Débil	5 - 25	(B)	Un golpe con la punta del martillo geológico de una indentación superficial. La roca puede ser descostrada un cortaplumas pero con dificultad.	Creta, sal mineral, potasio.
R1	Muy débil	1 - 5		La roca se disgrega al ser golpeada con la punta del martillo geológico. La roca puede ser descostrada con un cortaplumas.	Roca muy alterada o muy meteorizada.
R0	Extremadamente débil	0.25 - 1		La roca puede ser indentada con la uña del pulgar.	Salbanda arcillosa dura.

A. Clase según Brown.

B. Para rocas con una resistencia en compresión menor que 25 Mpa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.

C. Esta caracterización no exige los análisis de laboratorio y estudios geomecánicos de las rocas para definir su geomecánica y planes de sostenimiento.

Figura 5.11. Tipos de sostenimiento. Fuente: autores.



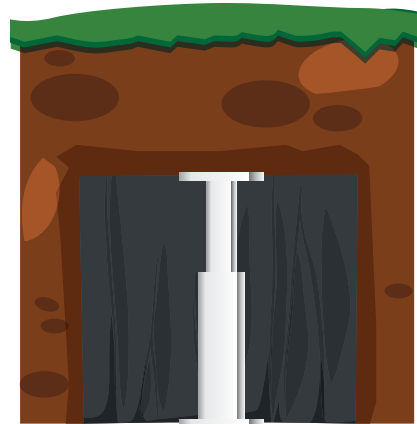
Puerta de madera



Taco de madera



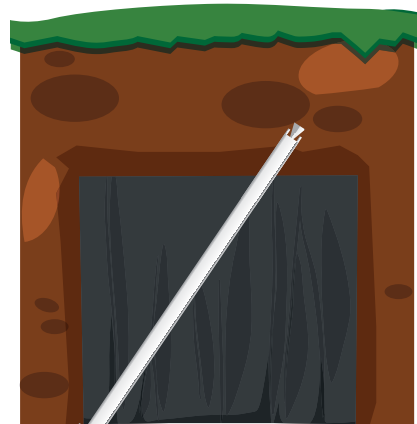
Arco de acero



Palanca de acero



Concreto



Perno de anclaje

coma ochenta metros (1,80 m)”. (Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas. Decreto 1886 de 2015). Ministerio de Minas y Energía, 2015).

El sostenimiento de la mina depende de las condiciones de estabilidad de los respaldos. El análisis de la mecánica de las rocas y sus estructuras geológicas fallas, diaclasamiento, dureza y resistencia es de gran importancia para definir el sostenimiento a implementar en la labor minera, para esto se requiere realizar análisis de laboratorio para establecer la resistencia a la compresión y tensión de la roca. De manera inicial y preliminar se pueden identificar en terreno características de resistencia de la roca con la clasificación de Hoek E & Brown E. T. (2007) que se presentan en la figura 5.12, sin dejar de lado los estudios estructurales, geológicos y análisis de laboratorio.

5.1.4. TIPOS DE VENTILACIÓN

La ventilación de una mina consiste en el proceso de hacer pasar un flujo de aire considerable y necesario para crear las condiciones óptimas para que los trabajadores se encuentren en una atmósfera agradable, limpia y sin gases, estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores.

La ventilación natural: consiste en el paso natural de un flujo de aire por las labores mineras. Para que el circuito de aire se dé es necesario contar con dos accesos para la entrada y salida de aire los cuales deben tener diferencia de cotas ó nivel. La diferencia de temperatura y presión barométrica genera una diferencia de peso específico entre el aire saliente y entrante, lo cual crea el circuito de ventilación natural.

La mayoría de las minas han utilizado el Sistema de ventilación natural, sin embargo, el artículo 40 del decreto 1886 de 2015 establece que toda “toda labor subterránea debe contar con un circuito de ventilación forzada”, la ventilación contribuye a controlar los gases contaminantes de la mina, ver figuras 5.13 y 5.14.

Ventilación Artificial: corresponde al caudal de aire que ingresa a la mina y que se produce como resultado de un efecto mecánico o ventilador.

Los sistemas de ventilación son:

Sistema Soplante o impelente: caudal de aire impulsado por un ventilador hacia el interior de la mina, para

Figura 5.13. Valores límites permisibles para gases contaminantes. Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

CLASIFICACIÓN	GASES	FÓRMULA	TLV-TWA (ppm)	TLV-STEL (ppm)
Sofocante-venenoso	Dióxido de carbono	CO ₂	5.000	30.000
Asfixiante-venenoso Explosivo	Monóxido de carbono	CO	25	-
Explosivo Venenoso Olor a huevo podrido	Acido Sulfhidrico	H ₂ S	1	5
Asfixiante inflamable	Anhidrido sulfuroso	SO ₂	-	0.25
Asfixiante	Oxido Nitrico	NO	25	-
Asfixiante	Dioxido de Nitrogeno	NO ₂	0.2	-
Explosivo sofocante	Metano	CH ₄	-	-
Soporte de la combustión	Oxígeno	O ₂	El volumen mínimo de oxígeno para trabajar en una labor bajo tierra es de 19.5% y máximo de 23.5%.	

VLP-TWA: Corresponde al valor límite permisible de tiempo promedio ponderado para una jornada de 8 horas diarias y 40 horas a la semana de trabajo.

VLP-STEL: Valor límite permisible para un corto tiempo de exposición, el cual no debe exceder de 15 minutos; debe existir por lo menos un lapso de 60 minutos entre dos exposiciones sucesivas a este nivel y no mas de 4 veces en la jornada de trabajo.

conducir el aire se utilizan mangueras o mangas de plástico o materiales flexibles.

Sistema aspirante: El aire fresco ingresa al frente por la galería y el contaminado es extraído por mangueras de plástico (mangas) o conductos conectados al ventilador aspirante. Las mangueras o mangas deben tener un anillado en espiral rígido para soportar la succión de aire.

Sistema combinado: Aspirante-soplante (impelente), emplea dos tendidos de mangueras de plástico (Mangas) o conductos, uno para extraer aire y el segundo para impulsar aire limpio al frente en avance. (Guía de Seguridad para ventilación de Minas subterráneas, ARL Positiva, 2017).

Para garantizar la seguridad del personal al interior de la mina es necesario controlar los aspectos contaminantes y explosivos como son las partículas de polvo y los gases.

Las concentraciones máximas de metano (CH₄) permitidas y a partir de las que se deben suspender los trabajos y evacuar el personal de manera inmediata hasta que se haya diluido el metano por debajo de los límites máximos permisibles establecidos, los cuales se presentan en la figura 5.15.

Figura 5.14. Ubicación de gases contaminantes en la mina. Fuente: autores

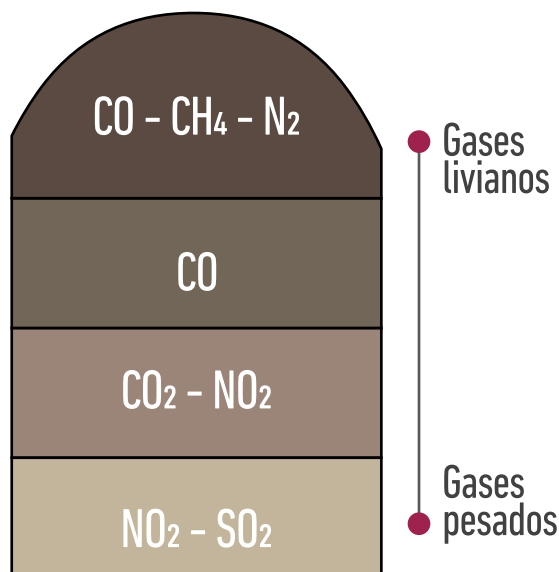


Figura 5.15. Concentraciones máximas de metano (CH₄). Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

LABOR SUBTERRANEA	PORCENTAJE (%) MÁXIMO PERMISIBLE DE METANO (CH ₄)	PORCENTAJE (%) LEL
EN LABORES O FRENDES DE EXPLOTACION O AVANCE	1.0	20%
EN LOS RETORNOS PRINCIPALES DE AIRE	1.0	20%
EN EL RETORNO DE AIRE DE LOS TAJOS	1.5	30%
EN EL RETORNO DE AIRE DE LOS FRENDES DE PREPARACION Y DESARROLLO	1.5	30%

Porcentaje LEL: El límite inferior de explosión (LEL) corresponde a la concentración (en Volumen %) de una mezcla de gas combustible y aire que puede inflamarse y ocasionar explosión.

5.1.5. CARGA Y TRANSPORTE DE MINERAL

En las minas después de haber arrancado el mineral y el material estéril se requiere cargarlo a un medio de transporte por medios manuales con palas y carretillas, baldes o katangas (amarre para cargar en la espalda del minero el mineral en baldes o costales) o por medios mecanizados con palas neumáticas o mecánicas, cargadores para minería subterránea, winche minero, pancer o transportador blindado, bandas transportadores, malacates, locomotoras con vagones para trasladarlo hasta la superficie, al patio de acopio o a la planta de beneficio.

5.2. ESTUDIO MINERO DE LA ZONA MINERA

La actividad minera en el municipio de Zaragoza (Antioquia) se caracteriza principalmente por la explotación de oro aluvial en los ríos Porce y Nechí, así como por explotaciones subterráneas de oro de veta. Las explotaciones de oro en los ríos Porce y Nechí se han realizado con grandes dragados y procesos de concentración de oro. También en la minería aluvial de los pequeños mineros se identifican minidragas y barequeo en estos ríos, al igual que en pequeñas fuentes hídricas del municipio; también se da la explotación de terrazas aluviales. La explotación de oro en minas subterráneas es desarrollada también por mineros artesanales y por empresas constituidas con títulos mineros.

La informalidad en la explotación minera aluvial y de minería subterránea es una realidad del municipio. Los títulos mineros que presentan en sus áreas surgen porque los mineros tradicionales han iniciado algunos procesos de formalización con explotadores tradicionales que se encuentran en las áreas concesionadas, a los que se compra el mineral producido dentro del título minero mediante procesos ante las autoridades mineras y ambientales.

En este capítulo se identificaron algunas minas subterráneas del municipio, las cuales se visitaron para detallar las características mineras de su explotación y, posteriormente, se establecieron algunas consideraciones para implementar buenas prácticas mineras para el mejoramiento de la producción del oro.

5.2.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las siguientes actividades se realizaron para el análisis minero:

- Revisión de antecedentes mineros del municipio de Zaragoza y del departamento de Antioquia, como estadísticas de la Agencia Nacional de Minería, informes y estudios geológicos de la región.
- Preparación de formulario de recolección de información de campo en los aspectos mineros.
- Reconocimiento cartográfico de la zona, topografía, geología y localización de las minas a visitar.
- Contacto telefónico con representantes de la actividad minera en Zaragoza.
- Planeación de las actividades de campo.

MAPE: La minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE) es la extracción de oro realizada por mineros independientes o compañías pequeñas que cuentan con un capital de inversión y producción limitados. Normalmente es un sistema de producción descentralizado. Algunos gobiernos la definen por la magnitud de la mena procesada (p. ej., menos de 300 toneladas al día) y otros la definen por los métodos de extracción y procesamiento utilizados (p. ej., técnicas manuales o semimecanizadas). (Determinación del uso del mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y en pequeña escala MAPE, (ONU, 2017).

Las explotaciones pequeñas son extracciones sin técnica y de poca profundidad, que se realizan “con herramientas e implementos simples de uso manual, accionados por la fuerza humana, y cuya cantidad extraída no sobrepase en ningún caso a las doscientas cincuenta (250) toneladas anuales de material”, (MME,2015).

Para este capítulo se define como una mina artesanal aquella que se explota sin técnica minera específica o que combina las prácticas empíricas con algunas técnicas mineras, en la cual se han ido incorporando herramientas y equipos para lograr mayor productividad.

- En la zona se identificaron las minas que se podían visitar para desarrollar los temas mineros; para la selección de las minas se tuvieron en cuenta los temas de seguridad, facilidades de acceso y cronograma de trabajo.
- Socialización con los mineros de las actividades a desarrollar.
- En las minas que fueron seleccionadas se realizó un recorrido técnico por día con un equipo técnico conformado por un ingeniero de minas, un geólogo y de la persona delegada por mina que tuviera buen conocimiento de las actividades que se desarrollan en estas.
- Georreferenciación de minas.
- La información recopilada corresponde a la captación de información visual y escrita capturada en campo y en un formato tipo encuesta que se aplicó con las personas que acompañaban el recorrido de la visita de la mina.
- El ingeniero de minas, para la elaboración del informe de descripción y análisis se utilizó los datos de campo para describir de cada MAPE los aspectos como son Sistema y método de explotación.
 - Método de arranque
 - Sostenimiento minero
 - Tipo de Ventilación
 - Cargue y transporte de material
 - Aspectos ambientales mineros
- La información del capítulo geológico se incorporó tanto en la descripción de las mineralizaciones como para identificar de manera preliminar métodos de explotación que se pueden aplicar en las diferentes vetas.
- Se elaboraron consideraciones técnicas a manera de recomendaciones para el mejoramiento de las explotaciones y la seguridad del personal.

Para iniciar los trabajos de campo en las minas, inicialmente se realizó una socialización de los objetivos del proyecto con mineros de la zona. Se estableció una programación de las actividades por grupos de trabajo a realizar según la disponibilidad y acceso a las minas, la cual se fue ajustando a las diversas condiciones que se presentaron.

De las minas visitadas en temas metalúrgicos, ambientales, geológicos, por temas de logística y desplazamientos, solamente fue posible estudiar para los aspectos mineros siete (7) minas. De las cuales cinco (5) son minas artesanales en pequeña escala (MAPE) de veta y dos minas de mediana minería.

Con la información obtenida de las minas se plantean consideraciones mineras que pueden servir en los procesos de planificación minera de las explotaciones.

5.2.2. CARACTERISTICAS DE EXPLOTACIONES MINERAS VISITADAS EN ZARAGOZA

Figura 5.16. Nombre y ubicación de minas visitadas. Fuente: autores.

NOMBRE MINA
MINA EL CRISTO
MINA EL LIMÓN
MINA ORO VERDE
MINA PISONES
MINA LA AMADA
MINA LA PRIMAVERA
MINA LA YE

5.2.2.1. MINA ARTESANAL ORO VERDE

La zona denominada Oro Verde se localiza al sureste de la cabecera municipal de Zaragoza, en la vereda San Antonio. Se identificaron dos labores artesanales que se encuentran en área de un título minero HB1291005, Cooperativa de Mineros del Nordeste Antioqueño- Coominas.

Las explotaciones artesanales principalmente corresponden a dos clavadas para acceso a la explotación y al interior guías para explotar la veta. Las explotaciones se encuentran cerca a quebradas pequeñas. Las explotaciones se denominan Oro Verde 1 y Oro Verde 2. En la zona también se realizan actividades de barequeo en diversas quebradas que se encuentran en el sector.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Oro verde 2
VEREDA	Vereda San Antonio.
SISTEMA	Subterráneo.
MENA	una vetilla de cuarzo-carbonato-pirita de 1 cm de ancho en dirección 356/90, que se encuentra fragmentada y escalonada por fallas en dirección 45/36. La mineralización se encuentra emplazada en una roca dolerítica con alteración clorita-carbonato.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso por carreteable hasta la mina. El acceso se realizaba por clavadas o tambores verticales. Acceso por tambor Inclinado 65° de profundidad 20 m . Sección 2 m x 1.6 m = 3.2 m².
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Explotación en guía con arranque selectivo primero el estéril luego la veta o viceversa.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilador de un (2) caballos 2 hp con mangas de 1' 1/2 pulgada.
SOSTENIMIENTO	cuadros de madera y forro con tablones, puerta alemana al interior. y también sostenimiento natural.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque manual .
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual en baldes y transporte con garrucha y motor eléctrico.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Actividades mineras muy cercanas a una pequeña quebrada.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En la mina artesanal labora cinco (5) mineros. En la planta de beneficio laboran cuatro (4) personas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	3 tomines x 50 kilos aproximadamente. Relación de estéril mineral 3: 1
BENEFICIO	Molinos de bolas.



Fotografía 5.1. Acceso a la mina artesanal Oro Verde 2, inclinado de 70°. Fuente: autores.



Fotografía 5.2. Vagón con malacate para transporte de material. Fuente: autores.



Fotografía 5.3. Tolva para descargue de mineral. Fuente: autores.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Oro verde 1
VEREDA	Vereda San Antonio.
SISTEMA	Subterráneo.
MENA	Consta de una vena de cuarzo y sulfuros de 20 centímetros de espesor en dirección 330/65.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso por carretable hasta la mina. El acceso se realizaba por clavadas o tambores verticales. Acceso por tambor vertical profundidad 90 m . Sección 2 m x 1.6 m = 3.2 m ² .
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Explotación en guía con arranque selectivo primero el estéril luego la veta o viceversa.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilador de un (1) caballos 1hp con mangas de 1' 1/2 pulgada.
SOSTENIMIENTO	cuadros de madera y forro con tablones, puerta alemana al interior. y también sostenimiento natural.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque manual.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual en baldes y transporte con garrucha o malacate artesanal y motor eléctrico.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Actividades mineras muy cercanas a una pequeña quebrada.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En la mina artesanal labora diez (10) mineros. En la planta de beneficio laboran cuatro (4) personas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	1 a 2 tomines aproximadamente.
BENEFICIO	Molinos de bolas.



Fotografía 5.4. Bocamina Oro verde 1. Fuente: autores.



Fotografía 5.5. Tolva para almacenamiento de maerial. Fuente: autores.



Fotografía 5.6. Ventilador helicoidal tipo búfalo. Fuente: autores.

5.2.2.2. MINA EL CRISTO

Esta mina se localiza en la vereda Fraguas, al extremo sur de la cabecera municipal de Zaragoza, por la vía hacia el municipio. Al momento de la visita, la mina no se encontraba desarrollando labores de explotación, debido a que se estaban adelantando los permisos legales ante las entidades mineras y ambientales para iniciar explotación. Se identificaron pequeños frentes de trabajo exploratorio donde se observó una veta de cuarzo lechoso amplia aproximadamente de 1 m a 2 m de ancho.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	El Cristo. Título minero: IEG-10161
VEREDA	Fraguas
SISTEMA	Subterráneo
LABORES DE DESARROLLO	El acceso a la bocamina se realiza por sendero.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Al momento de la visita no se realizaba explotación debido a que se estaba tramitando los permisos mineros y ambientales. Se identificó una veta con ancho entre 1 -2m rumbo N25°W buzamiento de 30°NE DDR 245°. Explotación proyectada para el método ensanche de tambores
FORMA DE VENTILACIÓN	No se utiliza
SOSTENIMIENTO	La roca de caja neiss presenta estabilidad por lo que se utiliza sostenimiento natural en las pequeñas exploraciones encontradas



5.2.2.3. MINA LA AMADA

Esta mina se encuentra localizada en la vereda La Porquera. En esta área minera se identificaron dos bocaminas, La Amada, 1 que corresponde a una bocamina que recientemente había iniciado labores que corresponden a un inclinado de 7 m de longitud y de 30° de inclinación. Se encuentra a una altura de 145 m s. n. m. Su bocamina tiene una veta de dirección N40°W, DDR 230, buzamiento 30W.

La Amada 2 es la bocamina en la que ya se han adelantado labores mineras. Sus coordenadas son: E, 1245648; N, 1312247. Se encuentra a una altura de 147 m s. n. m. Su bocamina tiene una veta de dirección N85W, DDR 5°, buzamiento 30W y longitud de 19 m.

Los trabajos se encuentran en proceso de formalización por lo cual se han conseguido inversionistas para tecnificar la explotación.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina La Amada. Área en proceso de formalización con mina El Limón
VEREDA	Vereda La Porquera.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable. Inclinado de acceso a las labores de explotación. Longitud 19 m. Inicio de construcción de labor para explotación en guía sección ancho 3 m x 2 m.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La explotación se proyecta realizarla en guía.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural.
SOSTENIMIENTO	Sostenimiento en la parte superficial con puerta alemana y posteriormente sostenimiento natural.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque manual.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual, transporte con el personal minero, mediante uso de katangas (amarres para transportar los costales de material en la espada). Malacate mecánico.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	El material removido se acumula en los alrededores de la bocamina. Al interior de la mina se presenta filtración de agua por lo que se requiere bombeo permanente de las aguas de mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En la explotación laboran nueve (9) operarios.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	3-4 ton/día aproximadamente.
BENEFICIO	El material se comercializa y se beneficia en la planta de beneficio de la mina El Limón.



Fotografía 5.10. Bocamina La Amada. Fuente: autores.



Fotografía 5.11. Vagón para extracción de material. Fuente: autores.



Fotografía 5.12. Trabajo con infiltración de agua. Fuente: autores.

5.2.2.4. MINA PISONES

La mina Pisones se localiza en la vereda El 20 y pertenece a la empresa Inversiones Majona, con título minero 7894. A los trabajos se accede por una guía de 46,60 m.

Se cuenta con un inclinado de transporte de 70 m de longitud, luego, para acceder al frente de trabajo principal, se desciende por una clavada de 30 m. La explotación se realiza en dos guías donde se va arrancado el mineral de manera selectiva. La sección de trabajo tiene un ancho de 2,2 m y una altura de 1,9 m. La galería principal que comunica a todas las labores tiene una longitud aproximada de 300 m.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Pisones
VEREDA	El 20.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable en un tramo y luego se continua por sendero.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	A la mina se accede por un inclinado y guía. La mina cuenta con dos (2) niveles de explotación. La explotación se realiza siguiendo el rumbo de la veta en guía. Veta de ancho aproximado 0,50 m. Explotación en guías y tambores.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural y artificial con ventilador soplante.
SOSTENIMIENTO	En la mayor parte de las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural. En algunos tramos, sostenimiento con Puerta Alemana.
FORMA DE ARRANQUE	manual y con martillos neumáticos.
CARGUE Y TRANSPORTE	Transporte de mineral con malacate y balde, carretas.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Los estériles de explotación se acumulan en los alrededores de la mina. La mina se encuentra cerca de una quebrada por lo que presenta infiltración de agua por las áreas de fracturamiento.
No DE PERSONAS VINCULADAS	24 operarios en mina y 7 operarios en planta. Se trabaja en 3 turnos.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	4-6gr /tonelada aproximadamente.
BENEFICIO	En el área de beneficio se molinos de bolas.



Fotografía 5.13. Bocamina y vagón de transporte. Fuente: autores.



Fotografía 5.14. Sostenimiento con puertas alemanas. Fuente: autores.



Fotografía 5.15. Mangas para conducción de aire. Fuente: autores.

5.2.2.5. MINA LIMÓN

El Limón es una mina que se encuentra en el área del título minero Registro de Propiedad Privada RPP N.º 12011, de la empresa Four Points mining, compañía colombo-inglesa. La empresa minera tiene una gran área titulada donde se encuentran pequeños mineros artesanales, a los que les compran el mineral como parte de los procesos de formalización que se encuentran realizando. También adelantan procesos de formalización y tecnificación con algunas pequeñas explotaciones.

En la mina se encuentra una veta de cuarzo masivo blanco, con salbanda en los contactos. Estructura con dirección N-S. La roca caja es estable en esquistos silicificados y neiss. Se observaron tres tipos de fallamientos de comportamiento normal siniestral.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina El Limón. Título minero RPP: 12011
VEREDA	El Limón.
SISTEMA	Subterráneo.
MENA	En el punto muestrado se observó una veta de cuarzo lechoso con alteración cuarzo-seriecita y salbanda a ambos lados con galena-esfalerita-calcopirita-pirita-oro libre. La estructura es primordialmente N-S buzando al occidente 180/50.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable. Acceso de personal en guía, inclinado y clavada con 8 niveles de trabajos en guías. Se cuenta con Inclinado de transporte.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La mina cuenta con ocho (8) niveles de explotación separados entre 40-50 m. Se utilizan dos métodos de explotación en algunas partes resuing y en otras Cámaras y Pilares. Sección en guías 1.80 de h x3 m de ancho.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación artificial con ventiladores y extractores para succión de aire viciado. Cuentan con monitoreo permanente de caudal y gases.
SOSTENIMIENTO	En la mayor parte de las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural rocas de esquistos silicificados y neiss y en algunos tramos se instalaron puertas alemanas.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque con voladura, se utilizan en los cuatro (4) frentes de trabajo cuatro (4) martillos neumáticos con compresor atlas copco.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue y transporte con winche (tracción con cable y malacate). Transporte de mineral en inclinado con malacate mecánico y (skip) vagón. Capacidad 1 tonelada. Coches (vagon) en nivel principal.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Los estériles de explotación en su mayoría son utilizados como relleno al interior de la mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación y planta de beneficio se trabaja generalmente dos (2) turnos de trabajo de 8 horas donde laboran aproximadamente en cada turno 50 operarios en la mina, ingeniero de minas, jefe de mina, geólogo y profesional de seguridad y salud en el trabajo.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	4-6gr /tonelada aproximadamente.
BENEFICIO	Se cuenta con proceso de beneficio por cianuración.



Fotografía 5.16. Bocamina con puerta de seguridad. Fuente: autores.



Fotografía 5.17. Acceso por escalera y rieles de conducción de vagón. Fuente: autores.



Fotografía 5.18. Clasificación de mineral desde el interior de la mina. Fuente: autores.

5.2.2.6. MINA LA YE

La mina La Ye se localiza en la vereda Naranjal, en el municipio de Zaragoza, y es explotada por la empresa colombiana Mineros S. A., que se encuentra en la actividad minera desde hace 38 años. Es una empresa que cuenta con departamento de geología y departamento de minería para la planeación de las actividades

mineras. La mina tiene proyectada una producción de mineral de 350 ton/día (25 000 onzas/año) mediante procesos de mejoramiento y optimización. A esta mina se llega por una vía carretable en regular estado.

En la mina se encuentra una veta de cuarzo masivo blanco, de aproximadamente 2 m de espesor, con una dirección 155/50, cortada por una falla en dirección 170/40 que alcanza a producir un salto de 80 m. La mineralización se encuentra encajada en rocas intrusivas de composición tonalítica de grano grueso del stock del Carmen. El sostenimiento es natural.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina La Ye. Título minero RPP: 55011
VEREDA	Naranjal.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable. El acceso a la mina se realiza en malacate con tren para personal y se cuenta aparte con malacate con skip (vagón) para transporte de materiales. Inclinado con longitud aproximadamente de 400 m e inclinación 35°.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La mina cuenta con seis (6) niveles de explotación separados entre sí 40-50 m. Se utilizan dos métodos de explotación en algunas partes cámaras y pilares y principalmente y sectores con corte y relleno. Sección en guías 1.80 de h y 2.5m de altura (h) x 3m de ancho. Longitud hasta 2.5 km. Los informes de la mina reportan buzamientos ente 65° -70°.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación artificial con ventiladores y extractores para succión de aire viciado. Cuentan con monitoreo permanente de caudal y gases.
SOSTENIMIENTO	En la mayor parte de las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural rocas neiss y tonalita. Las áreas ya explotadas son rellenadas con material estéril de la misma explotación o materiales sobrantes de otras explotaciones de la empresa.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque con voladura. Martillos neumáticos.
CARGUE Y TRANSPORTE	Transporte de mineral con malacate mecánico y (skip) vagón. Capacidad 1 tonelada. Coches en nivel principal. Palas mecánicas, locomotora, winches.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Los estériles de explotación en su mayoría son utilizados como relleno al interior de la mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación y planta de beneficio se trabaja generalmente tres turnos de trabajo de 8 horas donde laboran aproximadamente en cada turno 120 operarios en la mina, ingeniero de minas, jefe de mina, geólogo y profesional de seguridad y salud en el trabajo.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	3-4 gr/ton aproximadamente.
BENEFICIO	Se cuenta con proceso de beneficio por cianuración.



Fotografía 5.19. Tren para transporte de personal en la mina. Fuente: autores.



Fotografía 5.20. Sostenimiento natural. Fuente: autores.



Fotografía 5.21. Pala para cargue de mineral. Fuente: autores.

5.2.2.7. MINA LA PRIMAVERA

La mina la Primavera se localiza en la vereda La Porquera. Es una explotación subterránea a la cual se ingresa por un inclinado de 110 m de profundidad, donde se han desarrollado tres niveles de explotación: el primero a 39 m, el segundo a 70 m y el tercero a 100 m.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina La Primavera
VEREDA	La Porquera.
SISTEMA	Subterráneo.
MENA	Vena de cuarzo blanco lechoso de 50 centímetros de espesor, en dirección E-W buzando 50° al S.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carreteable. El acceso a la mina se realiza por un inclinado de 110 metros de profundidad, con sección de 2m de ancho x 1.50 de altura para permitir el acceso del vagón para transporte de material y una sección para acceso del personal. Inclinado con ángulo de 45°.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La mina cuenta con cuatro (4) niveles de explotación separados entre sí 15-20 m. Se utiliza el método de explotación guía y tambores y cámaras y pilares. Sección en guías 1.80m de h x1.5 m de ancho.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación artificial con ventilador axial de 12".
SOSTENIMIENTO	En la mayor parte de las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural esquistos verdes silicificados en partes y en algunas partes sostenimiento artificial con puertas alemanas.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque manual y con martillos neumáticos.
CARGUE Y TRANSPORTE	Transporte de mineral con malacate mecánico y (skip) vagón. Capacidad 1 tonelada.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Los estériles de explotación son arrojados en los alrededores de la planta de beneficio.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación y planta de beneficio se trabaja generalmente en un turno de 8 horas donde laboran aproximadamente en cada turno 16 operarios en la mina. Machineros (2), Auxiliares (2) Malacates (2), Almacén (2), Descargadores (6), Mineros (2).
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO BENEFICIO	2,5-4 gr/ton aproximadamente. Se cuenta con proceso de beneficio por cianuración.



Fotografía 5.22. Bocamina La Primavera. Fuente: autores.



Fotografía 5.23. vagón y malacate. Fuente: autores.



Fotografía 5.24. Escaleras para ingreso a la mina. Fuente: autores.

5.2.3. MINERÍA ALUVIAL

Desde la población de Zaragoza hacia la vía a Zaragoza, y por los trayectos hacia las minas La Ye, El Cristo y El Limón, se observaron numerosas personas realizando mineral aluvial con barequeo, canalones y, en ocasiones, minidragas o arranque con retroexcavadora y lavado en clasificadoras. Esta actividad es generalizada en la región y hace parte de la economía y minería informal que ha caracterizado la región de Zaragoza.



Fotografía 5.25. Retroexcavadora. Fuente: autores.



Fotografía 5.26. Barequeo. Fuente: autores.

5.2.3.1. MINA LA VALERIA

Esta actividad minera artesanal se localiza en la vereda San Antonio, al sureste de la cabecera municipal de Zaragoza.

Se observó una explotación de terrazas aluviales con excavación de talud con altura de 30 m de profundidad, aledaño a una quebrada denominada Oro Verde, de 10 m de ancho y separación de una margen de 6 m de ancho. En la explotación se observaba maquinaria para la extracción del material y personas realizando barequeo.



Fotografía 5.27. Panorámica explotación mina La Valeria. Fuente: autores.



Fotografía 5.28. Talud y corte de explotación. Fuente: autores.

5.3. ANÁLISIS MINERO

El análisis minero presenta las condiciones actuales de las siete minas que se visitaron en el municipio de Zaragoza y, con base en esta caracterización, se presentan consideraciones técnicas que puedan servir en los procesos de planificación minera que se desarrollen en las explotaciones de esta región.

En el análisis minero, inicialmente se describen las condiciones actuales de las minas visitadas y posteriormente se analizan algunos aspectos de método de explotación, dilución y sostenimiento que son fundamentales en el planeamiento minero. El planeamiento minero parte de los estudios de exploración geológica, donde se determinan aspectos como el tipo de minerales, los recursos, las reservas, la geometría del depósito y características como la cantidad y calidad del mineral económicamente explotable. Para esto, es importante que se basen los resultados de la exploración geológica en los lineamientos nacionales e internacionales, y de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Mineras (CRIRSCO).

El planeamiento de la explotación minera se condensa en el documento Programa de trabajos y obras, donde se establecen los siguientes componentes, que constituyen la herramienta del trabajo del explotador minero: A) delimitación definitiva del área de explotación; B) mapa topográfico de dicha área; C) detallada información cartográfica del área y, si se tratare de minería marina, especificaciones batimétricas; D) ubicación, cálculo y características de las reservas que habrán de ser explotadas en desarrollo del proyecto; E) descripción y localización de las instalaciones y obras de minería, depósito de minerales, beneficio y transporte y, si es del caso, de transformación; F) plan minero de explotación, que incluirá la indicación de las guías técnicas que serán utilizadas; G) plan de obras de recuperación geomorfológica, paisajística y forestal del sistema alterado; H) escala y duración de la producción esperada; I) características físicas y químicas de los minerales por explotarse; J) descripción y localización de las obras e instalaciones necesarias para el ejercicio de las servidumbres inherentes a operaciones mineras; K) plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura (Ley 685 de 2001, Código de Minas).

La planificación minera en las explotaciones de oro define qué tenor de mineral será extraído, acorde con el tenor de corte establecido; mediante este se determina la rentabilidad del proyecto minero. Todo lo referenciado anteriormente determina hacia dónde se deben enfocar las explotaciones mineras para contar con una actividad organizada, técnica y rentable.

5.3.1. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

Con el objetivo de buscar la tecnificación, la racionalidad y la productividad de las pequeñas explotaciones mineras, se realiza un análisis teórico de datos puntuales de las vetas, donde, a partir de la proyección inferida de un punto de rumbo y buzamiento, se examinan métodos de explotación que podrían adaptarse en las explotaciones artesanales.

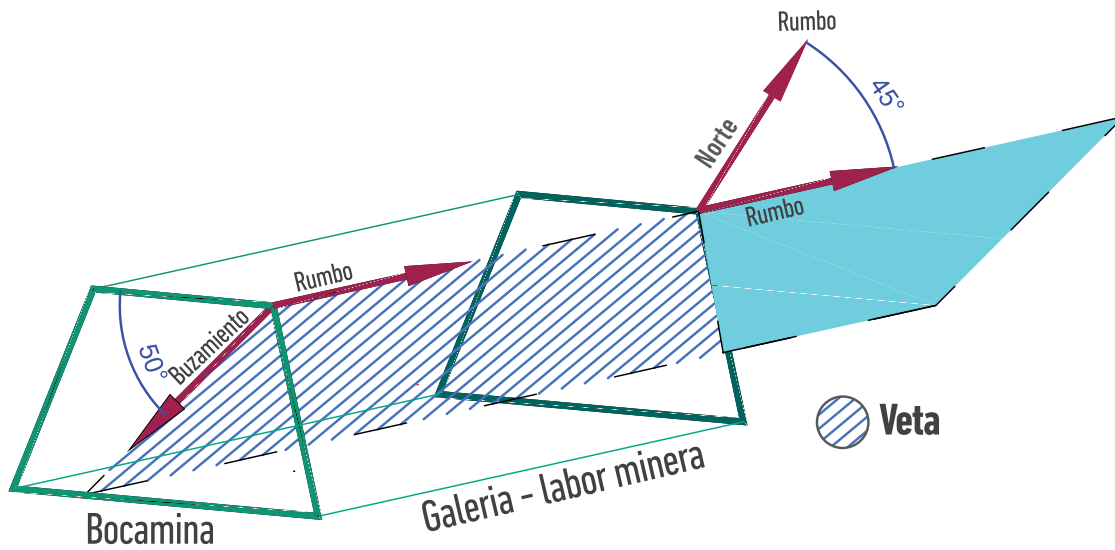
Las características geológicas de cada veta son las principales condiciones que determinan la elección del método de explotación, debido a que se debe estudiar de manera detallada la forma del yacimiento, el tipo de depósito, la estabilidad de las rocas, el rumbo, el buzamiento de la veta, la resistencia de la roca de caja y de la veta, al igual que el ancho de veta. En el presente análisis no se cuenta con información detallada de las mineralizaciones —información a profundidad de exploración como son perforaciones para determinar la continuidad de la veta, la estructura y la geometría de la mineralización—, se tomaron datos puntuales y disponibles de la información levantada por los geólogos en campo y se realizó la proyección inferida de un punto de muestra de la veta, al cual se infirió una longitud en rumbo y en buzamiento.

Con estos datos se proyecta si la inclinación del buzamiento es vertical u horizontal y si las características a priori de la roca de caja son débiles o fuertes para relacionar posibles métodos de explotación proyectados con base en métodos cualitativos como el sistema de Boschkov y Wrigth (1973).

En la figura 5.17. se esquematiza la proyección de un punto de una veta en rumbo y buzamiento, como un ejemplo para visualizar las proyecciones que se pretenden esquematizar de métodos de explotación con base en los datos puntuales con que se cuenta. En las minas visitadas se realizó este ejercicio para luego entrar a analizar los posibles métodos de explotación que podrían ajustarse a estas proyecciones inferidas.

En las minas visitadas se realizó este ejercicio para luego entrar a analizar los posibles métodos de explotación que podrían ajustarse a estas proyecciones inferidas.

Figura 5.17. Esquema de la proyección inferida de un punto de una veta en rumbo y buzamiento. Fuente: autores.



Actualmente, las pequeñas explotaciones y minas artesanales siguen la mineralización a través de guías y tambores o clavadas, en labores antiguas ya intervenidas se desarrollan cruzadas para encontrar la veta más amplia. En la explotación los mineros artesanales primero explotan la veta y posteriormente proceden a explotar la roca encajante por separado. La explotación, generalmente, se realiza con el ancho de la veta y en algunos casos se explotan algunas rocas encajantes que se observan que presentan mineralización, realizando, entonces, una explotación selectiva en trabajos por niveles y subniveles con tambores e inclinados, sin desarrollar un método de explotación específico. Solamente en las minas El Limón y La Ye se tiene definido el método de explotación que corresponde a cámaras y pilares y corte y relleno, respectivamente.

Con el propósito de mejorar las prácticas de explotación de las minas artesanales se analizan métodos de explotación que se puedan ajustar a las condiciones identificadas durante el trabajo de campo. Para la selección del método de explotación existen diferentes metodologías tanto cuantitativas como cualitativas, entre las que se encuentran las siguientes (Kawatra, 2011):

- Sistema de Boshkov y Wright (1973): selección cualitativa, desarrollada para la selección subterránea. La selección se realiza con la potencia de las vetas, inclinación de veta y resistencia del macizo rocoso.
- Sistema de Hartman (1987): selección cualitativa que se realiza en un diagrama de flujo que considera la geometría del yacimiento, la geomecánica del macizo rocoso; incluye métodos de explotación a cielo abierto.
- Sistema de Morrison (1976): selección cualitativa, realizada con base en la potencia de la veta, soporte-sostenimiento y la energía tensión de deformación.
- Sistema de Laubscher (1981): se basa en la resistencia del macizo rocoso, en el grado de fracturamiento del macizo rocoso y las discontinuidades.
- Sistema de Nicolas (1981): selección cuantitativa, basada en la geometría del depósito, forma, potencia, buzamiento, distribución, resistencia de la roca a la compresión uniaxial y frecuencia de fracturas.

Entre los métodos cualitativos se encuentra el sistema de Boschkov y Wrigth (1973); este sistema se basa en la potencia e inclinación del cuerpo mineralizado y la resistencia del macizo rocoso, como se observa en la figura 5.18.

Figura 5.18. Métodos de explotación según el tipo de mineralización, buzamiento y resistencia de la mena y roca encajante (Sistema de Boshkov y Wright). Fuente. SME. mining Engineerin Hanbook 2011.

TIPO DE MINERALIZACIÓN	BUZAMIENTO	RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA	RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA	MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO
Capas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares Tajo largo
		Débil o fuerte	Débil	Tajo largo
Capas gruesas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares
		Débil o fuerte	Débil	Cavidades en subniveles
Capas muy gruesas	NA	NA	NA	Lo mismo que para masivos
Venas muy delgadas	Inclinado	Débil o fuerte	Débil o fuerte	Extracción selectiva (resuing)
Venas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales Cámaras y pilares
		Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas Corte y relleno
	Débil	Fuerte	Espacios con sostenimiento cuadrado	
	Inclinado	Débil	Débil	Espacios con sostenimiento en cuadros
Venas gruesas	Horizontal	NA	NA	Lo mismo que para masivos
Venas gruesas	Inclinado Inclinado	Fuerte	Fuerte	Tajos descendentes
				Hundimiento (Underground glory hole)
				Shrinkage stopes (excavaciones ascendentes)
				subniveles
				Corte y relleno
				Combinación de métodos
		Fuerte	Débil	Corte y relleno
Masivos	NA	Fuerte	Fuerte	Hundimiento controlado Subniveles Corte y relleno Combinación de métodos
	NA	Débil	Fuerte o débil	Subniveles Bloques -camaras Cámaras con sostenimiento en cuadros Combinación de métodos

En el capítulo geológico se identificó que las minas objeto de este análisis presentan mineralizaciones de oro de tipo vetiformes. El estilo de mineralización predominante corresponde a vetas de cuarzo sulfuro blanco masivas (predomina pirita y en menor proporción: galena, calcopirita y raramente esfalerita). Las vetas se encuentran encajadas dentro de rocas metamórficas afectadas por segmentos del sistema de fallas de Palestina e influenciadas por rocas ígneas granitoides. Los espesores de las vetas oscilan desde 0,15 hasta 3 m, con formas tabulares. En la figura 5.19 se resumen las características de los puntos muestreados en las minas visitadas.

Figura 5.19. Rumbo y Buzamiento de un punto de veta pequeñas explotaciones mineras visitadas. Fuente: autores.

MINA	RUMBO	BUZAMIENTO	ANCHO	ROCA DE CAJA	MINERALIZACIÓN
Oro verde No1	330	65	0.20 m		Veta de cuarzo y sulfuros
Oro verde No 2	356	90	0.01 m	Roca dolerítica con alteración clorita-carbonato	Vetilla de cuarzo carbonato pirita, fragmentada y escalonada por fallas de dirección 45/36
Limón	180	50w	0.50-1 m	Roca ígnea masiva	Vena de cuarzo lechoso con alteración cuarzo-sericita y salvanda
La Ye	155 -170	50-40	Aprox 2,0 m	Rocasa intrusivas Tonalita de grano grueso	Consta de tres vetas. Se visitó la veta del nivel dos
La Primavera	70	50s	0.50 m	Roca esquistos verdes silicificados	Vena de cuarzo lechoso masivo
La Amada	180	30	0.04 m	Rocas de textura gneisica	Enrejado de vetas de cuarzo
El Brillante	190	30	0.30-0.50 m	Rocas de andesítica silicificada	Vena de cuarzo con falla inversa
La Silva	22	68	0.20 m	Roca intrusiva de grano fino con alteración carbonato clorita	Veta de cuarzo con sericita
Pisones	180	70w	Hasta 1.0 m	Esquistos verdes en contacto intrusivo con granitoide fanerítico	Vena de cuarzo lechoso blanco masivo al techo
Pisones	180	70w	Hasta 1.0 m	Esquistos verdes en contacto intrusivo con granitoide fanerítico	Vena de cuarzo lechoso blanco masivo al techo
La Gallineta	170	42	0.50 m	Roca intrusiva en contacto con esquistos verdes	Vena de cuarzo carbonato
El Cristo	246 NE -SW	30°-40°	Hasta 1.5 m	Una roca intrusiva de composición granodiorita con alteración	Veta de cuarzo blanco lechoso con estructura en peine y pirita en nidos. Vena de cuarzo carbonato con pirrotina-galena-pirita

El método de explotación que se seleccione deberá ofrecer condiciones para obtener una buena producción y rentabilidad para facilitar el retorno de la inversión de los propietarios de la mina. También, según las condiciones geológicas, establecerá el diseño de las labores de preparación y extracción, así como el sostenimiento del macizo rocoso intervenido, acorde con la geología estructural. Finalmente, proporcionará las mejores técnicas para realizar una explotación con buenos niveles de producción. La producción también tendrá en cuenta el tenor de corte y la dilución del material para establecer un planeamiento minero con rentabilidad. Por otra parte, es necesario tener en cuenta la reducción de impactos de los aspectos ambientales y trabajar con condiciones de seguridad laboral.

En este capítulo se realiza un análisis cualitativo para la selección del método de explotación, debido a que el objetivo del proyecto no es realizar análisis puntuales y específicos sino, más bien, precisar consideraciones para que los mineros visualicen otros métodos de explotación que puedan mejorar la productividad y rendimiento de la explotación. Para esto, se utiliza el sistema de Boshkov y Wright (1973) donde se analiza la potencia de las vetas, inclinación de veta y resistencia del macizo rocoso.

Los sitios muestreados de las minas visitadas presentan buzamientos entre los 35° y 50° de inclinación al E y espesores variables entre 0,15 y 3 m, correspondiente a venas delgadas . En las minas donde se realizó el análisis minero se identifican los métodos de explotación que se podrían implementar para mejorar la productividad (figura 5.20.).

Figura 5.20. Métodos de explotación que se podrían implementar en las minas artesanales con venas delgadas. Fuente: autores.

TIPO DE MINERALIZACIÓN	BUZAMIENTO	RESISTENCIA DE LA MENA MINERALIZADA	RESISTENCIA DE LA ROCA DE CAJA	MÉTODO DE MINERÍA COMÚNMENTE APLICADO
Venas muy delgadas	Inclinado	Débil o fuerte	Débil o fuerte	Extracción selectiva (resuing)
Venas delgadas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales
				Cámaras y pilares
	Inclinado	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas
				Corte y relleno
				Cámaras con sostenimiento cuadrado
Inclinado	Débil	Débil	Cámaras con sostenimiento en cuadros	

Basado en el Sistema de Boshkov y Wright. Métodos de explotación según el tipo de mineralización, buzamiento y resistencia de la mena y roca encajante. Darling, SME(2011). mining Engineerin Hanbook 2011.

Es de aclarar que para definir en una mina el comportamiento de la mineralización es necesario realizar estudios geológicos detallados. Para este caso se realiza la proyección inferida de la veta para identificar los métodos proyectados que se pueden implementar en los procesos de tecnificación de la minería artesanal conforme a datos puntuales tomados en campo. Esta información es solo una proyección no corresponde a estudios determinantes.

Figura 5.21. Método de explotación proyectados en vetas inferidas como delgadas de las minas visitadas en el análisis minero. Fuente: autores.

MINA	RUMBO	BUZAMIENTO	ANCHO	ROCA DE CAJA	MINERALIZACIÓN	ESTIMACIÓN DE DUREZA*	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN ACTUAL	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUGERIDO
Oro verde No 1	330	65	0.20m	Roca dolerítica con alteración clorita-carbonato	Veta de cuarzo y sulfuros	Moderadamente resistente	Explotación en guías y tambores	Resuing, Cámaras con sostenimiento en cuadros Corte y relleno Ensanche de tambores
Oro Verde No 2	356	90	0.01m	Roca dolerítica con alteración clorita-carbonato	Veilla de cuarzo carbonato pirita, fragmentada y escalonada por fallas de dirección 45/36	Moderadamente resistente	Explotación en guías y tambores	Resuing, Cámaras con sostenimiento en cuadros Ensanche de tambores
Limón	180	50w	0.50-1m	Roca ígnea masiva	Vena de cuarzo lechoso con alteración cuarzo-sericita y salvanda	Muy Resistente	Cámaras y pilares y resuing	Resuing Cámaras y pilares, corte y relleno Combinación de métodos
La Ye	155-170	50-40	2 - 3m	Rocasa intrusivas tonalita de grano grueso	Consta de tres venas. Se visitó la veta del nivel dos	Muy Resistente	Corte y relleno, cámaras y pilares	Resuing Cámaras y pilares, corte y relleno Combinación de métodos
Primavera	70	50s	0.50m	Roca esquistos verdes silicificados	Vena de cuarzo lechoso masivo	Resistente	Explotación en guías y tambores	Resuing Cámaras y pilares, corte y relleno Combinación de métodos
La Amada	180	30	0.04m	Rocas de textura gneisica	Enrejado de venas de cuarzo	Moderadamente resistente	Iniciando explotación en inclinado	Resuing, Cámaras con sostenimiento en cuadros Corte y relleno Combinación de métodos
Pisones	180	70w	Hasta 1.0m	Esquistos verdes en contacto intrusivo con granitoides fanerítico	Vena de cuarzo lechoso blanco masivo al techo	Resistente	Explotación en guías y tambores	Resuing Cámaras y pilares, corte y relleno Combinación de métodos Ensanche de tambores
El Cristo	246 NE -SW	30° -40°	Hasta 1.5m	Una roca intrusiva de composición granodiorita con alteración cuarzo-sericita-clorita.	Veta de cuarzo blanco lechoso con estructura en peine y pirita en nidos. Vena de cuarzo carbonato con pirrotina-galena-pirita	Muy Resistente	No ha iniciado explotación	Resuing Cámaras y pilares, corte y relleno Combinación de métodos Ensanche de tambores

*Se requiere realizar análisis de laboratorio de la compresión uniaxial

En síntesis, las labores de desarrollo minero identificadas en las minas con el análisis minero son:

- Las minas artesanales visitadas de Oro Verde y La Amada contaban con acceso vehicular por vía carreteable, al igual que las minas tecnificadas de El Limón y La Ye. A la mina La Primavera se realiza el acceso por vía carreteable y luego se continúa por sendero. A la mina El Cristo se llega por un sendero; esta mina no ha iniciado la explotación.
- Las minas tecnificadas El Limón y La Ye cuentan con infraestructura física, administrativa y operativa con equipos tecnificados y departamentos técnicos de geología, minería, seguridad y administrativos para la ejecución de los procesos de explotación y beneficio.
- El acceso de personal en la mina La Ye se realiza por un malacate con tren exclusivo para personal (skip), a través de un inclinado. En la mina El Limón el acceso se realiza por una cruzada y luego por guía principal, seguido de inclinados y tambores verticales con escaleras hacia los niveles de explotación. En las minas artesanales de Oro Verde, La Primavera y La Amada el ingreso a las operaciones se realiza por tambores verticales e inclinados con escaleras; en la mina Los Pisones el ingreso se realiza por una cruzada y luego por tambores verticales e inclinados con escaleras para el acceso a los niveles de trabajo.
- La seguridad en el acceso del personal es básica para su buen desempeño, por lo cual es necesario establecer las mejores alternativas para el ingreso de personal y minimizar el desgaste físico, ya que esta energía se requiere en otras labores de la mina.
- Es necesario hacer la revisión diaria de las labores de acceso, al igual que de las escaleras y soportes de las minas, del sostenimiento y del estado del cable y los frenos del malacate. Es preciso reportar las observaciones en planillas de inspección diaria.
- Otro aspecto a tener en cuenta es la seguridad en la ejecución de trabajos en alturas al interior de la mina, para lo que se requiere el uso de elementos de seguridad como arnés, manilas, cuerdas de seguridad, mosquetones, poleas, jumpers, entre otros.

Las labores de preparación identificadas en las minas con el análisis minero son:

- En las minas tecnificadas de La Ye y El Limón las labores de preparación corresponden a guías, inclinados amplios en las zonas mineralizadas.
- En las minas artesanales de Oro Verde, La Primavera, La Amada y Pisones las labores de preparación, principalmente, corresponden a guías y tambores verticales para acceso a las áreas mineralizadas.

Las labores de explotación identificadas en las minas con el análisis minero son:

- En las minas tecnificadas los métodos de explotación utilizados son: mina El Limón, con cámaras y pilares, y resuing; mina La Ye, con corte y relleno, principalmente, y cámaras y pilares.
- Los métodos de explotación que se utilizan en las minas artesanales Oro Verde, La Primavera, La Amada y Los Pisones corresponden a explotaciones sin un diseño minero definido. Según las características generales de las actividades realizadas, se concluye que corresponden a explotación en guías y tambores que siguen la dirección de la veta. Las técnicas de explotación son tradicionales, de acuerdo con la experticia de los mineros con mayores conocimientos. También se realiza una explotación selectiva del mineral donde se explota primero el estéril y luego se explota el mineral para recuperar mayor cantidad de mineral enriquecido.
- Las minas se explotan con herramientas manuales y mecanizadas como martillos perforadores eléctricos y neumáticos; martillos con adecuaciones artesanales, principalmente; cargue con palas manuales y transporte con vagones (vagonetas); y malacates. En las minas tecnificadas se identificaron martillos perforadores neumáticos, palas mecánicas, malacates mecánicos skip y cargador winche.
- Las mineralizaciones identificadas en el estudio presentaron, en general, características de venas angostas (<3 m) y respaldos competentes, por lo que se puede pensar en métodos de explotación como corte con relleno, cámaras con pilares, subniveles y explotación selectiva (resuing). Las metodologías deberán evaluarse para cada mina y se seleccionará, finalmente, la que ofrezca mejores garantías para la explotación.

- Los métodos de explotación por corte y relleno, y cámaras y pilares, se ajustan a las condiciones de las minas de la región, debido a que las vetas angostas y respaldos competentes permiten realizar un diseño de la explotación adaptable a las necesidades de mejoramiento de la producción, a fin de garantizar la alimentación permanente de las plantas de beneficio. Por otra parte se incrementan los niveles de producción, dado que la tecnificación de la explotación con la implementación de mejores prácticas para la recuperación de mineral; actualmente, este se explota en los frentes de las guías o clavadas en avance, y entre los niveles de las guías queda mineral que se podría recuperar al implementar métodos de explotación con un diseño y planeamiento minero, acorde con las características geológicas de yacimiento, lo cual hace parte del planeamiento minero que se lleve a cabo en cada explotación. En las vetas más angostas se puede realizar la explotación selectiva (resuing) como método de explotación que permite reducir la contaminación del mineral con estéril.

5.3.2. DILUCIÓN DE LA VETA

La producción del mineral de oro es el objetivo de la explotación minera. Esta explotación debe generar un volumen de mineral tenor mínimo que haga rentable la actividad. El tenor del mineral es un factor importante para obtener beneficio económico o generar pérdidas, por lo que se busca un punto de equilibrio entre la producción con el tenor del mineral para tener sostenibilidad económica de la explotación. Para definir el punto de equilibrio se utiliza el tenor de corte y el factor de dilución.

El tenor de corte crítico (TCC, o cutoff) es la concentración de oro que permite obtener beneficio económico al final de la operación. Es el criterio normalmente utilizado en la operación minera para discriminar entre el mineral factible de extraer obteniendo beneficio económico del depósito y el estéril (Bascetin et al., 2011, citado en Franco y Velilla, 2014). Todo lo que esté por debajo de este valor es tratado como estéril y, lo que esté por encima, como mineral útil y es aprovechable. Es decir, donde los ingresos obtenidos por el producto igualan a los costos de extracción de este, es lo que se conoce como punto de equilibrio (Franco y Velilla, 2014). Esta información se obtiene con estudios detallados geológico-mineros y económicos de la explotación.

El factor de dilución es la relación que se da entre la mezcla del material estéril de la roca encajante con el mineral de la veta en el proceso de extracción. Es un porcentaje de estéril de la roca encajante que se revuelve con la veta. Depende del ancho de la veta y del ancho del corte de explotación. El factor de dilución se obtiene del ancho promedio del corte de explotación y del ancho de veta (Ortiz, 1991).

La dilución del mineral genera costos, debido a que se incrementa el transporte de material estéril y se reduce el tenor de mineral. El incremento de la dilución se presenta por condiciones naturales del mineral, de la roca encajante, la forma de la extracción y malla de voladura. Así, hay dos tipos de dilución:

- Interna: corresponde a minerales de baja o nula ley (estéril) que no se pueden separar del bloque mineralizado, debido a que están incluidos en este. Esta dilución es difícil de controlar.
- Externa: corresponde a los minerales estériles en contacto con el mineral que se extrae en el bloque de explotación. Esta dilución tiene manejo.

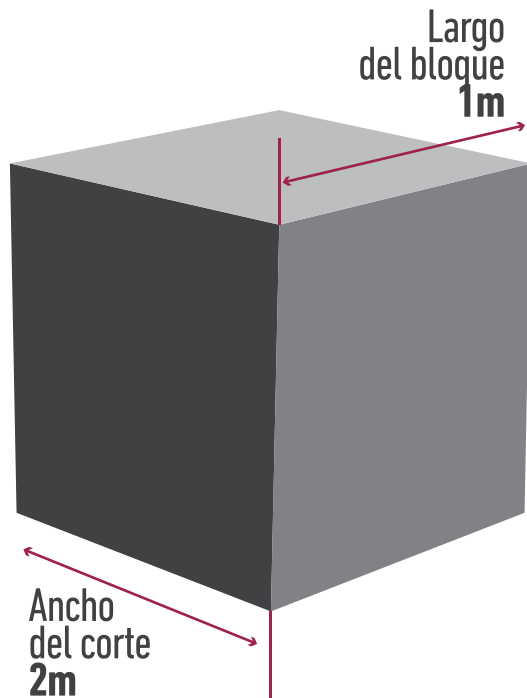
Ejemplo de aplicación

Para el cálculo de la dilución en el bloque de trabajo se siguió la metodología presentada por el geólogo Hernán Ortiz Delgado (1991) en el libro Geología minera del oro de veta. Se realizó un análisis de la dilución externa en un frente de explotación de la mina La Primavera, donde se toma para el ejemplo un bloque conforme al avance de explotación diaria. Cada que el frente de trabajo avanza o se realiza una voladura se debería realizarse el registro de la dilución y el muestreo de la veta, para determinar la calidad y cantidad de mineral que se está obteniendo en la mina. Esto también determinará el tenor de corte de la mina, es decir, si el bloque que se está explotando es rentable o no y las consideraciones que deberán tomar los geólogos, los ingenieros de minas, los economistas y los inversionistas sobre la rentabilidad de la explotación. Estos análisis se deberían realizar a medida que se realiza el avance de la explotación, es decir, cada que se realizan labores de perforación y voladuras en el frente donde se extrae el mineral que va a la planta de beneficio.

5.3.2.1. ANÁLISIS DE DILUCIÓN MINA LA PRIMAVERA

Estos datos corresponde a una proyección o ejemplo tomado con la información recopilada en la mina para efectos del aplicación del análisis de dilución.

Figura 5.22. Localización Bloque de muestra. Fuente: autores.



En la Mina La Primavera, se realizó muestreo en un frente de explotación con avance de 1 m y ancho de 2 m. Para el análisis se presenta los siguientes valores: Bloque de muestra 1: frente de explotación abscisa 59 m nivel 1. estos datos deberian ser la sumatoria de varios muestreos para este ejemplo solo se toma un dato del frente analizado

El bloque de veta que se analiza tiene las siguientes dimensiones:

Corte o ancho de bloque: 2.0m

Largo de bloque: 1.0m de avance por voladura en el frente de explotación.

Ancho de veta: 0.40m

Características de Caja y veta:

Roca de caja: WP-0086-roca metamórfica levemente foliada con sectores de color amarillo verdosos pálidos y verde oscuro.

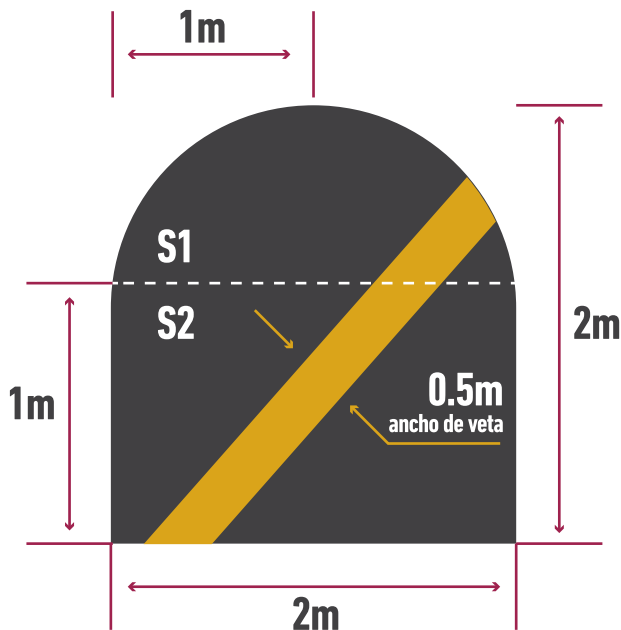
Densidad caja: 2.83 ton/m³

Veta: Vena de cuarzo blanco lechoso de 50 centímetros de espesor, en dirección E-W buzando 50° al S, con sulfuros principalmente pirita, encajada en esquistos verdes con vetillas de cuarzo-carbonato con foliación 325/62.

Densidad veta: 2.818 ton/m³

a) Dimensiones frente de explotación:

Figura 5.23. Frente de explotación. Ancho de corte y ancho de veta. Fuente: autores.



Altura: 2.0m

Ancho-corte: 2.0m

Ancho de la veta en el frente de trabajo: 0.5m

Para el ejemplo de cálculo de área horizontal del bloque no explotado se toma el ancho del corte por un metro de avance.

b) Área horizontal (A):

bloque no explotado de 2,0m x 1m = 2,0m²

Factor de corrección: corrección del buzamiento del ángulo promedio de la veta, se realiza corrección del área debido la inclinación de la veta de la siguiente manera:

Área Horizontal proyectada: Buzamiento > 45° se proyecta en plano vertical $A' = A \times \text{sen}(B)$

Buzamiento < 45° se proyecta en plano horizontal $A' = A \times \text{cos}(B)$

Buzamiento $\text{sen } 50^\circ = 0,766$

Area verdadera (A') = área horizontal m² /sen(buzamiento)

$A' = 2,0m^2 / 0.766 = 2.61m^2$



Fotografía 5.29 y 5.30 Veta en mina La Primavera. Fuente: autores.

c) Área de sección de trabajo:

Sección guía promedio: 2,0 m de altura, 2,0 m de ancho en el piso, Área de la sección:

Sección de la Mina La Primavera = S1 + S2

$$SP= S1 + S2$$

$$S_1 = (\pi \times r^2)/2$$

$$S_2 = b \times h$$

$$S1= \pi \times 1m^2/2 = 1.5708m^2$$

$$S2 = 1.0m \times 2m = 2m^2$$

$$SP= S1 + S2$$

$$SP= 1.5708m^2 + 2m^2$$

$$SP= 3.5708m^2$$

d) Ancho de veta promedio : 0.5m

e) Metros cúbicos=ancho de veta*área verdadera.

$$\text{Metros cúbicos de mineral} = 0.5m \times 2.61m^2 (\text{ancho promedio de veta}) = 1,3 m^3$$

f) Toneladas métricas de mineral en veta:

Toneladas de mineral en veta=metros cúbicos x gravedad específica del mineral

$$\text{Toneladas de mineral en veta (Tmv)} = 1,3m^3 \times 2,818 t/m^3 = 3,66t$$

g) escribir el ejemplo solo se realiza para gramos de oro. Valores de oro y plata en veta:

Se registran los valores de cada muestra según el avance.

Resultado laboratorio SGC de tenor en muestra de oro de veta 3,69 g/t. Este análisis se realiza, en este caso, solo para gramos de oro.

h) Gramos de oro y plata

Gramos de oro= toneladas de mineral en veta*tenores de oro y plata

$$\text{Gramos de oro}=3,66 t \times 3,69 g/t = 13,5054g$$

i) Ancho promedio de veta

$$\text{Ancho promedio de veta} = (\text{Suma total de metros cúbicos})/(\text{Suma total de área verdadera (A')})$$

$$\text{Suma total de metros cúbicos}=1,3 m^3$$

$$\text{suma total Área verdadera (A')} = (\text{área horizontal})/(\text{sen(ángulo de buzamiento)})$$

$$\text{sen(ángulo de buzamiento)} = \text{sen}(50^\circ)=0,766$$

$$\text{Área horizontal} = 2,0 m^2$$

Área verdadera (A') = $(2,0\text{m}^2)/0,766 = 2,61 \text{ m}^2$

Luego,

Ancho promedio de veta = $(1,3 \text{ m}^3)/(2,61\text{m}^2) = 0,50\text{m}$

j) Valor promedio del tenor de oro y plata.

Valor promedio de tenor de oro y plata = $(\text{suma total de gramos de oro y plata})/(\text{suma total de toneladas de mineral en veta})$

También se obtiene aplicando:

Valor promedio de tenor de oro y plata = $(\text{total de gramos de oro y plata (g)})/(\text{suma total de ancho de veta (m)})$

En este caso, se aplicará la primera ecuación.

Valor promedio de tenor de oro = $(13,5054\text{g})/(3,66\text{t})$

Valor promedio de tenor de oro = $3,69\text{g/t}$

k) Onzas de Oro y Plata.

Onzas de oro y plata = $(\text{total de gramos de oro})/(\text{onza troy})$

1 onza troy = 31,1035g

Onzas de oro = $(13,5054 \text{ g})/(31,1035 \text{ g/onza troy})$

Onzas de oro = $0,4342 \text{ onza troy}$

l) Ancho del corte = Ancho promedio de la sección de trabajo

m) Dilución. Mezcla del material estéril de la roca encajante con el mineral de la veta en el proceso de explotación. La dilución disminuye el tenor de la veta.

La dilución promedio en metros: La dilución se puede medir pesando en kilos o toneladas por m^3 un metro cúbico (1m^3) de material compuesto por mineral explotado suelto y con dilución. Este peso se confronta con las toneladas de mineral explotable puesto en la tolva del molino.

En este ejemplo el ancho de corte es de 2,0m y el ancho de veta es de 0,50m entonces la dilución es de 1,50m.

n) Factor de Dilución. Porcentaje de estéril de la roca encajante que se revuelve con la veta. Depende del ancho de la veta y del ancho del corte de explotación.

Existen diversas fórmulas de calcular el factor de dilución entre estas se encuentran las siguientes:

Dilución = 1.50m

Factor de dilucion del tonelaje FD = $(\text{ancho de corte} \times 100\%)/(\text{ancho de veta promedio})$

FDtonelaje = $(2\text{m} \times 100\%)/0,50\text{m}$

FDtonelaje = 400%

FDtonelaje = 4

Otra fórmula es:

Dilución = $(\text{toneladas esteril})/(\text{toneladas de oro} + \text{toneladas de esteril}) \times 100\%$

Dilución = $1,5\text{m}/0,5\text{m} + 1,5\text{m} \times 100\% = 75\%$

ñ) Factor de dilución de los valores de tenor.

FDvalores = recíproco matemático de FD Tonelaje = $1/\text{FDtonelaje}$

FDvalores = $1/4 = 0,25$

o) Toneladas de mineral explotable (TME)

Toneladas de mineral explotable (TME) = $\text{toneladas métricas de mineral en veta (Tmv)} \times \text{FDtonelaje}$

Toneladas métricas de mineral en veta: 3,66 ton

Factor de dilución del tonelaje: 4

Toneladas de mineral explotable = $\text{reserva minera con dilución}$

TME = 14,64 ton

p) Valores Diluidos o tenores diluidos (Vd)

Valores diluidos (Vd) = tenor promedio tenor de oro x Factor dilución de valores

Valor promedio del tenor de oro: 3,69 gr/ton

Factor de dilución de los valores FDv = 0,25

Valores Diluidos o tenores diluidos oro (Au)

Vd (oro) = 3,69gr/ton x 0,25 = 0.92 gr/ton

q) Reserva de mineral de la mina o en el frente de trabajo analizado (Re) :

Toneladas de mineral explotable (TME) = 14,64 t reserva minera con dilución

Valores Diluidos o tenores diluidos oro (Vd) = 0,92gr/t

Reserva de mineral (en el frente de trabajo) = toneladas de mineral explotable (TME)x valores diluidos (Vd)

Re=14,64 t x 0.92 gr/t = 13,4688 gr oro (Au)

Reserva minera (Re): 13,4688 gr oro (Au)

Reserva de mineral en onzastroy Au

onzatroy Au = 31.1035 gr

Reserva minera en total de gramos dividido entre 31.1035 gr/onzastroy Au = 13,4688gr/(au) /31.1035gr

Reserva minera: 0,4330 onza troy

r) Reserva de mineral explotable recuperable de la mina (Rer)

Se analiza y establece en la mina un porcentaje de pérdidas de mineral por inconvenientes en la voladura, el cargue y transporte, contaminación.

Porcentaje de pérdidas de mineral en la explotación = 20%

Toneladas de Mineral explotable con dilución: 14,64 Ton

toneladas de pérdidas en la explotación: 20%x TME

toneladas de perdidas en la explotación = 20% x 14,64 t = 2.93 t

Ton mineral explotable recuperable = Toneladas de mineral explotable con dilución-toneladas de perdidas

Ton mineral explotable recuperable de la mina = 14,64t-2,93t = 11,71 t

Reserva minera recuperable=ton mineral explotable recuperable x valores diluidos

Valores diluidos o tenores diluidos Au (Vd) = gr/ton

Reserva minera recuperable (Rer) = 11.71 t x 0,92 gr/t

Au = 10,7732gr = 0,3463 onzastroy Au

El análisis anterior permite concluir que:

- En la mina La Primavera, para 1m de avance en el frente de explotación nivel 2, se presentó una dilución de 1,50 m (75%) con una veta de ancho de 0,50 m y 1 m de avance, donde se obtienen 5,92 ton de mineral explotable-recuperable, con un tenor diluido de 1,77 g/ton; es decir, el frente de trabajo produce 10,4784 g de oro.
- A medida que se avance en los frentes de explotación y bloques de trabajo se recomienda realizar muestreos de tenor en veta y de caja; calcular la dilución para identificar el comportamiento de la mineralización; y analizar si los costos de producción vs. los ingresos obtenidos se encuentran generando ganancias.
- Entre mayor sea la dilución, se incrementa la cantidad de material que se lleva a la planta de beneficio, pero se disminuye el tenor del mineral y disminuye la cantidad del mineral recuperado en la planta de beneficio; asimismo, aumentan los costos y se reducen las ganancias para la mina.
- Cuando se identifica el mineral y el material estéril que genera la dilución del mineral se establecerán acciones para separar estos dos productos de manera que se reduzca la dilución. En la pequeña minería, generalmente, se realiza una explotación selectiva en los frentes de explotación debido a que los procesos no son continuos y la producción es baja.

Nota: Tenor de cabeza de mineral para la planta puede rebajar de 1 a 2 gr depende del arranque y transporte de la mina a la planta y la recuperación del oro depende del proceso que se lleve a cabo en la planta de beneficio.

La dilución externa se puede controlar con buenas prácticas mineras como:

- Conocimiento de la geología y geometría del depósito mineralizado y de las rocas encajantes. Geología estructural del macizo.
- Planeamiento del diseño de la explotación.
- Selección del método de explotación acorde con la mineralización.
- Topografía de labores y elaboración de planos de avance, muestreo y diseño.
- Diseño de malla de voladura de acuerdo a las variaciones del corte de explotación y geometría de veta.
- Capacitación del personal operativo que realiza las voladuras y cargue del mineral en temas referentes a reducción de la dilución.

Figura 5.24. Sostenimiento utilizado en las minas visitadas. Fuente: autores.

MINA	ROCA DE CAJA	ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA*	SOSTENIMIENTO UTILIZADO ACTUALMENTE
Oro Verde No 1	Roca dolerítica con alteración clorita-carbonato.	Moderadamente resistente	Principalmente sostenimiento natural y puerta alemana en las parte son saprolito.
Oro Verde No 2	Roca dolerítica con alteración clorita-carbonato.	Moderadamente resistente	Principalmente sostenimiento natural y puerta alemana en las parte son saprolito. cuadros y forro de paredes en el tambor vertical de ingreso.
Limón	Roca ígnea intrusiva masiva.	Muy Resistente	Sostenimiento natural en la mayor parte de las labores se identificaron machones de sostenimiento y pilares en las áreas de explotación. Al ingreso del túnel principal se reforzó con concreto.
La Ye	Rocas a intrusivas. Tonalita de grano grueso	Muy Resistente	Sostenimiento natural en la mayor parte de las labores se identificaron machones de sostenimiento.
Primavera	Roca esquistos verdes silicificados	Moderadamente Resistente	En la mayor parte de las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural rocas neiss y en algunas partes sostenimiento artificial con puertas alemanas.
La Amada	Rocas de textura gneissica, con una fuerte alteración hidrotermal.	Resistente	Puerta alemana al inicio del inclinado y posteriormente sostenimiento natural tipo boveda.
Pisones	Esquistos verdes en contacto intrusivo con granitoide fanerítico.	Resistente	Sostenimiento natural en las guía en algunos puntos y al ingreso a l la labor se encontró sostenimiento con puerta alemana y medias puertas.
El Cristo	Roca intrusiva de composición granodiorita con alteración cuarzo-sericita-clorita.	Muy Resistente	En esta área no se ha iniciado explotación. En las pequeñas labores exploratorias el sostenimiento era natural

*Se requiere realizar análisis de laboratorio de la compresión uniaxial

5.3.3. SOSTENIMIENTO

El sostenimiento de las labores mineras subterráneas es fundamental para la seguridad del personal minero y las labores de explotación. Para definir el sostenimiento es necesario conocer la resistencia y geología estructural del macizo rocoso donde se desarrolla el proyecto minero, debido a que estos definen la calidad, resistencia y mecánica de las rocas y determinan las necesidades de sostenimiento en cada una de las labores de preparación, desarrollo y explotación de la mina. (figura 5.24.)

Las minas visitadas en el municipio de Zaragoza presentaban en sus respaldos rocas estables y resistentes, por lo que generalmente el sostenimiento se realizaba de manera natural. En algunos puntos, como los más superficiales de las explotaciones, debido a la roca meteorizada, se requería instalar sostenimiento artificial tipo puerta alemanau otro tipo de sostenimientos.

En las minas visitadas el sostenimiento identificado corresponde, principalmente, a sostenimiento natural, debido a que se encuentran las labores en rocas duras y poco fracturadas. Sin embargo, es importante que se realicen los estudios estructurales y de mecánica de rocas para garantizar la estabilidad de las explotaciones a medida que se vaya avanzando en estas.

De las explotaciones mineras se seleccionó la mina La Primavera para precisar algunas características de la roca de respaldo y del sostenimiento.

5.3.3.1. CARACTERÍSTICAS DE SOSTENIMIENTO DE LA MINA LA PRIMAVERA

La característica de resistencia de la roca de respaldo es moderadamente resistente y el bajo fracturamiento de la roca a pesar de que se identificaron zonas de foliación y fallamiento.

Los puntos identificados con fracturamiento de roca se identificaron de manera preliminar, debido a que solo se hizo una rápida visita en un día donde se caracterizaron algunos aspectos de la mina, por lo tanto en la mina es importante realizar estudios de geología estructural específicos para caracterizar el macizo rocoso y el avance de las futuras labores mineras. En la siguiente figura se observan los puntos de fracturamiento identificados preliminarmente y en las fotografías se observan las características de las rocas de respaldo.

La sección de trabajo en la guía principal se encontraba generalmente superior a los 3m2 acorde con el reglamento de higiene y seguridad en labores mineras subterráneas y en otros puntos requiere adecuación

Las rocas de respaldos y caja de la labor minera principal en guía, corresponden a principalmente a esquistos verdes silicificados. Las características de esta roca son las siguientes:

Muestra roca metamórfica levemente foliada con sectores de color amarillo verdosos pálidos y verde oscuro. Densidad caja :2.83 ton/m3

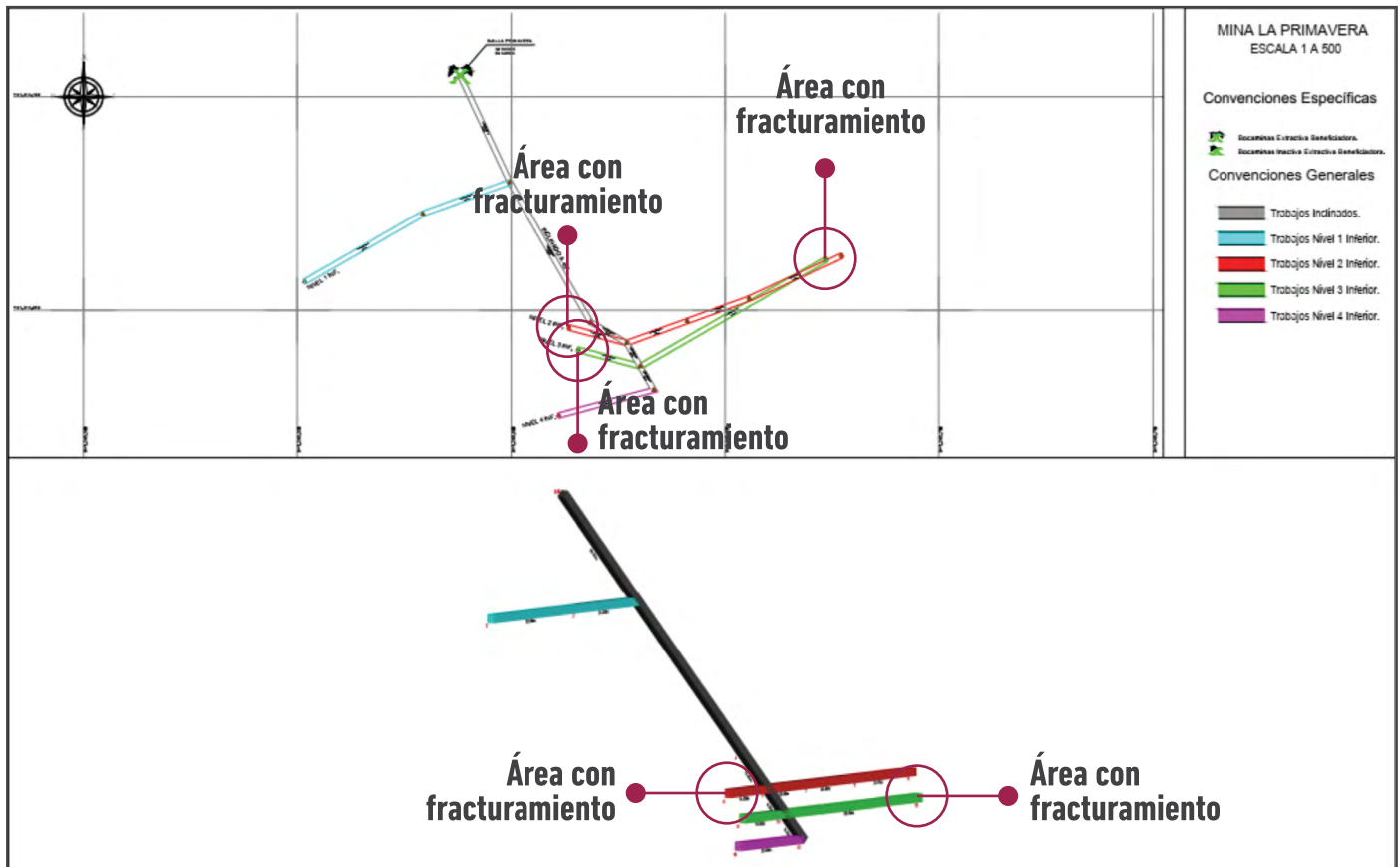
Las rocas como los esquistos silicificados presentan un índice de carga puntual entre 1-2 Mpa y resistencia uniaxial entre 25-50 Mpa según la estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial. Clases Hoek E & Brown E. T. (2007).

Figura 5.25. Puntos de control de sostenimiento en mina. Fuente: autores.

PUNTO DE CONTROL		ABSISA	TIPO DE SOSTENIMIENTO ACTUAL	OBSERVACIÓN
1	Frente de explotación zona de cizalla	Guía nivel 2. Abs. 21.5M DDR310°/40°	Sostenimiento natural tipo boveda	Plan de mejoramiento: inspección diaria de fracturamiento, establecimiento de sostenimiento artificial para reforzar la zona
2	Lineamiento de falla esquisto silicificado	Guía nivel 3. Abs 13.8 falla DDR 310°/65°	Sostenimiento natural tipo boveda	

En la mina La Primavera se identificaron puntos de fracturamiento de roca donde es necesario realizar estudio estructural para determinar los controles y el sostenimiento.

Figura 5.26. Identificación preliminar de zonas de fracturamiento de roca en la guía de acceso. Mina La Primavera. Fuente: autores.



Como en el caso de la Mina La Primavera, en las minas en general, diariamente es necesario realizar revisiones del sostenimiento y de los sitios que presenten fracturamiento y de las labores en general para establecer las medidas preventivas y correctivas que se implementaran en los planes de sostenimiento, los cuales se basan en el comportamiento estructural, medición de diaclasamientos y la geo mecánica de las rocas. El comportamiento del macizo rocoso de la mina en este estudio no se alcanza a definir, sin embargo es presentarle al minero la información que se ha de tener en cuenta para iniciar los estudios de sostenimiento de la mina, el cual será aplicado en el plan de sostenimiento el cual incluye los estudios del macizo rocoso de la mina, la definición del sostenimiento, las revisiones diarias de sostenimiento y los planes de mejoramiento.

La estimación de la resistencia de macizos rocosos utilizando el criterio de Hoek –Brown requiere definir el criterio de falla y evaluar tres propiedades: la resistencia en compresión no confinada de los trozos de roca intacta en el macizo rocoso, el valor de la constante m_i de Hoek–Brown para roca intacta y el valor del índice de resistencia geológica GS para el macizo rocoso. Otros aspectos a tener en cuenta son el efecto del agua debido a que las rocas pueden disminuir su resistencia por el contenido de humedad por efecto de la presencia de agua en la mina. También la composición mineralógica, el tamaño de grano, el metamorfismo y el fallamiento caracterizan el comportamiento del macizo rocoso. Esta información es necesaria tenerla en cuenta a la hora de definir el sostenimiento minero, el cual es básico en el desarrollo de la operación minera y de la seguridad del personal.

Se considera que es importante para el minero tener en cuenta los siguientes aspectos referentes al sostenimiento:

- El sostenimiento de las obras subterráneas se hace necesario para controlar la estabilidad de las excavaciones y para mejorar la seguridad del personal que trabaja o circula por ellas.

- El buen sostenimiento es básico para garantizar el tránsito de personal, equipos y el desarrollo, preparación y operación de la explotación.
- Un buen sostenimiento permite el desarrollo y operación segura de la explotación.
- Cuando el sostenimiento es natural se debe realizar inspecciones diarias del comportamiento de la roca para identificar zonas de debilidad o fractura donde es necesario instalar el reforzamiento con sostenimiento artificial.
- Contar con un buen sostenimiento minero es básico para la seguridad del personal y de la operación minera.
- Según las condiciones del terreno y la fracturación de la roca se determina qué tipo de sostenimiento se utilizará para garantizar que se conserven las labores mineras. Por lo cual es necesario realizar estudios geotécnicos y de geología estructural para determinar las características físicas y de resistencia a la compresión, flexión y tensión de la roca.
- Dependiendo de las condiciones geotécnicas del terreno, se pueden emplear diversos medios de refuerzo de roca las cuales pueden ser: sostenimiento natural o artificial con puertas de madera, arcos de acero, pernos de anclaje.
- Las puertas de madera sirven para soportar las presiones de techo y paredes de la mina.
- Un taco de madera rolliza sirve para soportar presiones en los techos de las minas
- Después de las voladuras queda material suelto en el techo o paredes cuya remoción se realiza con posterioridad o se acumula aumentando la posibilidad de desplomes, accidentes y de obstrucción de los frentes de explotación, lo que hace necesario que se realice diariamente el proceso de desabombar el techo de material suelto.

Características técnicas del sostenimiento:

- Ser resistente a las cargas y presiones.
- Ser estable. La fortificación debe conservar la forma que se le proyecta aún bajo la acción de las cargas.
- Ser duradera: su vida útil debe ser acorde con las labores de la explotación.
- Ocupar el menor espacio posible para permitir conservar la sección mínima de 3m² en galerías.
- Las dimensiones de las galerías serán construidas con áreas que permitan la libre circulación de personal, máquinas y herramientas, en condiciones normales las excavaciones mineras tendrán tres (3) metros cuadrados y una altura libre de uno metro ochenta (1.80) metros. (Decreto 1886 de 2015, Reglamento de Seguridad en Labores Mineras Subterráneas).
- Se recomienda mantener limpios los frentes de avance y asegurados los frentes de las labores subterráneas.
- Supervisar y mantener en buenas condiciones las puertas de madera del sostenimiento de la mina.
- Generalmente el sostenimiento en las minas se realiza con puertas alemanas que se conforman con tres maderas resistentes que conforman un trapecio, las partes de la puerta son Capiz que se instala en la parte superior de la puerta soportada por dos palancas. El Capiz puede ser sencillo o de doble diente o patilla. También se utilizan tiples y cuñas para ajustar las puertas y forros de paredes.
- Los tiples son troncos de madera que se instalan perpendicularmente entre las puertas para evitar que se inclinen, para el ajuste en las palancas se realizan con cortes en boca de pescado. Las cuñas son troncos pequeños de madera que se utilizan para ajustar las puertas con la roca y el forro es la madera utilizada entre la puerta y la roca para evitar caída de roca.

Figura 5.27. Sostenimiento de puerta alemana Sección mínima 3 m². Altura mínima 1.80m. Fuente: autores.



5.3.4. VENTILACIÓN

La ventilación de la mina es necesaria para garantizar una buena atmosfera minera para el personal, durante el desarrollo de las operaciones de arranque, voladuras, cargue y transporte. Es importante recordar que en toda labor minera es necesario contar con una entrada y una salida independiente para lograr circuito de ventilación y como vía alterna de evacuación de personal. Las labores de entrada y salida independientes preferentemente estarán ubicadas a una distancia de 50 m entre una y otra.

En las minas subterráneas visitadas, la mayor parte contaba con ventiladores soplantes tipo búfalo cuya operación es necesario que se monitoree, debido a que las mangas o conductos del aire generalmente no son las adecuadas, pues son tela de costal o tubos de PVC. También, las mangueras se pueden encontrar deterioradas, lo que hace que se ocasionen perdidas de caudal de aire, el cual puede resultar insuficiente para garantizar la buena atmósfera al interior de la mina. Por ello, es importante contar con un termoanemómetro (fotografía 5.31.) para medir la temperatura al interior de la mina y el caudal del aire que se encuentra circulando para identificar si hay que implementar acciones correctivas.

Es importante considerar el caudal de aire mínimo por trabajadores. El volumen mínimo de aire que circula en las labores subterráneas debe calcularse teniendo en cuenta el turno de mayor personal, la elevación de las labores sobre el nivel del mar, gases o vapores nocivos y gases explosivos. Los volúmenes mínimos de caudal serán:

- Excavaciones mineras de hasta 1500 m s. n. m.: 3m³/min por cada trabajador.
- Excavaciones mineras con cotas superiores a los 1500 m s. n. m.: 6m³/min por cada trabajador.

En las labores mineras se debe realizar monitoreo de medición de gases que se puedan presentar en las minas, para el cual se requiere contar con un multidetector de seis gases y con un tablero de registro de las mediciones diarias donde se registre la fecha y hora, frente de trabajo y las concentraciones de la medición de gases.

Es necesario llevar un registro en un libro de las mediciones realizadas. En caso de presentarse altas concentraciones de gases tóxicos, asfixiantes o explosivos, se requiere evacuar el personal y ventilar las labores mineras o realizar correctivos a la ventilación hasta que se logre una atmosfera normal.

La temperatura y humedad influyen en la jornada laboral del personal por lo cual esta se puede controlar con la ventilación. La temperatura efectiva es la combinación de la temperatura del ambiente, la humedad relativa y el movimiento del aire en la mina que genera la sensación de frío o calor en el personal al interior de la mina.

La temperatura efectiva en el frente de trabajo se calcula de la siguiente manera:
 $t_e = 0.7 t_h + 0.3 t_s - V$, donde:

te= temperatura efectiva
 th = temperatura húmeda en grados centígrados.
 ts = temperatura seca en grados centígrados.
 V = Velocidad de la corriente del aire m/s.

Los tiempos de permanencia del personal en los frentes de trabajo, según la temperatura efectiva son los siguientes:

Temperatura efectiva te (°C) vs Tiempo de permanencia (horas)

Figura 5.28. Cuadro de Temperatura efectiva Vs tiempo de permanencia. Fuente: autores.

TEMPERATURA EFECTIVA. TE (°C)	TIEMPO DE PERMANENCIA (HORAS)
28°C	Sin limitaciones
29°C	Seis (6) horas
30 °C	Cuatro (4) horas
32 °C	Cero (0) horas En aquellas partes de la mina donde se tenga una temperatura (te) superior a 31 °C, solamente podrán entrar cuadrillas de salvamento de la mina o minero



Fotografía 5.31. Termómetro anemometro. Fuente: <https://mlstaticquic-a.akamaihd.net>.

El Termo anemómetro permite realizar mediciones rápidas y exactas de la velocidad del aire, así como para determinar el caudal de aire en pies cúbicos por minuto (CFM) y la temperatura del ambiente húmeda y seca.



Fotografía 5.32. Multidetector de gases. Fuente: <http://www.equilabser.com>.

Un multidetector de gases en un equipo que detecta la presencia de los gases contaminantes en la atmosfera minera cuando superan los valores límites permisibles para la exposición y seguridad del personal y de las labores. Ante la alta emanacion de gase el equipo emite una señal óptica y acústica de alarma para que se tomen las medidas correctivas correspondientes.

5.3.5. MINERO-AMBIENTALES

En las explotaciones mineras artesanales visitadas en el Municipio de Zaragoza se identificaron los siguientes aspectos minero-ambientales:

- Las pequeñas explotaciones extraen el material estéril de la mina y este generalmente es depositado en los alrededores de la explotación. Los materiales estériles que se derivan de las explotaciones mineras requieren ser dispuestos de manera adecuada en un sitio destinado para esta actividad. Disponerlos organizadamente en niveles y posteriormente revegetalizar las áreas intervenidas. También es posible pensar en utilizarlos como rellenos al interior de las explotaciones los que también servirán como sostenimiento en las labores ya abandonadas.
- Las aguas efluentes de las minas en ocasiones son constantes en otras intermitentes, o no presentan efluentes y algunas presentan óxidos. Las aguas de mina se conducen en canales construidos en suelo hacia las fuentes hídricas. Estas aguas con un análisis previo de sus condiciones y características físicoquímicas pueden ser tratadas para aprovecharlas en las plantas de beneficio y otras labores de la

mina. A su vez es importante analizarlas al final del uso para determinar que el vertimiento no altere las características naturales del agua o si es necesario implementar medidas de control y mitigación.

- En el Municipio de Zaragoza se identificaron numerosas actividades de explotación aluvial en pequeñas quebradas que remueven los márgenes alterando las condiciones naturales de la microcuenca. Otro aspecto identificado es la explotación de terrazas aluviales donde se observaron taludes altos con pendientes muy inclinadas casi verticales, las cuales pueden presentar riesgo de deslizamiento y afectación de los mineros que barequean en la base de estos trabajos.

5.4. CONCLUSIONES EN ASPECTOS MINEROS

- Las explotaciones visitadas en el Municipio Zaragoza en su mayoría contaban con vías de acceso carretable hasta las bocaminas. A excepción de la mina La Primavera y El Cristo que no ha iniciado explotación.
- Todas las explotaciones mineras contaban con planta de beneficio a excepción de la Amada que comercializaba el mineral con la Mina El Limón.
- En las minas tecnificadas los métodos de explotación utilizados son: Mina El Limón con cámaras y pilares y resuing. Mina la YE con corte y relleno principalmente y cámaras y pilares.
- Los métodos de explotación que se utilizan en las minas artesanales, Oro verde, Primavera, La Amada, pisones corresponden a explotaciones sin un diseño minero definido, según las características generales de las actividades realizadas se concluye que corresponden a explotación en guías y tambores siguiendo la dirección de la veta. En la explotación los mineros artesanales primero explotan la veta y posteriormente procede a explotar la roca encajante por separado para obtener el mineral mejor clasificado para el proceso de beneficio. La explotación generalmente se realiza basados en el ancho de la veta y en algunos casos se explotan algunas rocas encajantes que se observan que presentan mineralización, realizando entonces una explotación selectiva en trabajos por niveles.
- Las minas analizadas presentan un estilo de mineralización predominante que corresponde a vetas de cuarzo blanco masivas con sulfuros (predomina pirita y en menor proporción: galena, calcopirita y raramente esfalerita, Las vetas se encuentran encajadas dentro de rocas ígneas y algunas metamórficas afectadas por segmentos del sistema de fallas OTU. buzamientos entre los 35° y 70° de inclinación al este y espesores variables entre 0.15 metros hasta 3 metros correspondiente a venas delgadas .
- Se realizó el análisis cualitativo para selección del método de explotación utilizando el Sistema de Boskhov y Wright (1973) donde se tomaron datos puntuales de la potencia de las vetas, inclinación de veta y resistencia del macizo rocoso. Los datos puntuales de las mineralizaciones identificadas en el estudio se caracterizaron por vetas angostas (<3m) y respaldos competentes por lo que se puede pensar en métodos de explotación como corte con relleno, cámaras con pilares, y cámaras con sostenimiento en cuadros y explotación selectiva (resuing). Sin embargo, Las condiciones deberán evaluarse para cada mina y se seleccionará finalmente la que ofrezca mejores garantías para la explotación., de manera que las explotaciones artesanales pueden tecnificarse con buenas prácticas mineras que permitan mejorar las labores de desarrollo y explotación, mejorar la producción y la seguridad de los mineros; todo en el marco de los procesos de formalización y legalización de la actividad..
- El factor de dilución es la relación que se da entre la mezcla del material estéril de la roca encajante con el mineral de la veta en el proceso de extracción. Es un porcentaje de estéril de la roca encajante que se revuelve con la veta.
- En el ejemplo de dilución de la mina La Primavera se obtuvo como resultado que para 1 m de avance en el frente de explotación nivel 1, se presentó una dilución de 1.50m (75%) con una veta de ancho de 0,50m; ancho de corte de 2.0m; con un metro (1 m) de avance en el bloque de trabajo, donde obtiene factor de dilución de 400%; un 11,71 ton de mineral explotable-recuperable con un tenor diluido de 0,92 gr/ton, es decir el frente de trabajo produce 10,7732gr de oro (Au). Estos cálculos se realizaron solo para un punto de muestreo pero lo ideal es realizarlo a lo largo de los bloques explotados y en exploración de los trabajos mineros para determinar la dilución de la producción y las reservas de mineral con que cuenta el bloque de trabajo en la mina.
- Es importante determinar este factor de dilución para establecer reservas de mineral, así como establecer las acciones de control de la dilución tanto en el método de explotación, voladura, selección del mineral a llevar a la planta de beneficio, lo anterior debido a que el mineral que se lleva a la planta entre

mejor tenga su calidad y tenor generará mayores ingresos para equilibrar los costos de operación, para lo cual se es importante manejar controles de muestreos de tenor en veta y caja y producción de mineral estéril.

- En las minas visitadas en los aspectos mineros como Oro verde y La Amada se utiliza sostenimiento con puertas alemanas y tramos con sostenimiento natural. En las minas Pisones, La Ye, El limón el sostenimiento identificado corresponde principalmente a sostenimiento natural debido a que se encuentran las labores en rocas moderadamente resistentes a resistentes y poco fracturadas, sin embargo hay puntos donde se ha instalado fortificación artificial con puertas alemanas. En las minas subterráneas importante que se realicen los estudios estructurales, medición de diaclasamientos y de análisis mecánica y resistencia de rocas para garantizar la estabilidad de las explotaciones a medida que se vaya avanzando en las explotaciones.
- La información del comportamiento del macizo rocoso es la base de la definición del sostenimiento de la mina y del diseño del plan de sostenimiento donde también se incluyen las revisiones diarias y el plan de mejoramiento del sostenimiento el cual se elabora con los lineamientos del Decreto 1886 de 2015 Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas.
- En los aspectos minero-ambientales los materiales estériles de las explotaciones que se van acumulando en los alrededores de las bocaminas puede buscarse un uso alternativo, también disponerlo de manera adecuada en sitios específicos y conformando niveles para control de la estabilidad y en sitios no cercanos de fuentes hídricas. Las aguas efluentes de las minas es importante caracterizarlas para definir un reuso dentro de las actividades mineras, así como establecer si requieren tratamientos antes de ser vertidas en las fuentes hídricas.

The image shows a large industrial facility, likely a primary mill, with a complex network of steel beams, pipes, and walkways. A large cylindrical mill is the central focus, surrounded by various mechanical components and structural supports. Yellow safety railings are visible on the walkways. The lighting is somewhat dim, highlighting the industrial environment.

6. ASPECTOS METALÚRGICOS

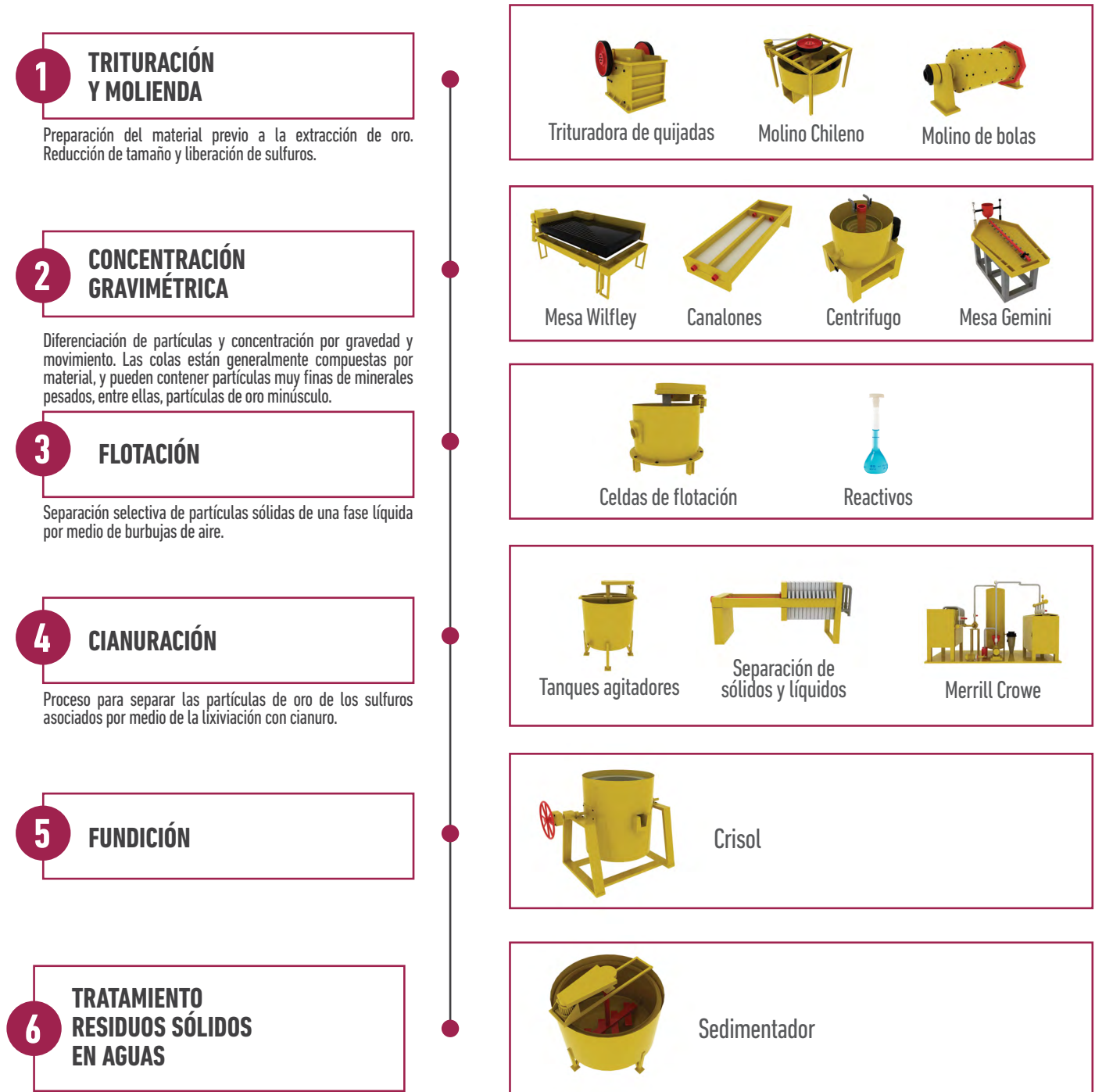
En este capítulo se muestran los diferentes aspectos metalúrgicos que se deben tener en cuenta, partiendo del conocimiento de las fases que comprende el proceso de beneficio y los principales equipos que realizan las operaciones unitarias.

Interior de planta de beneficio en la zona minera de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano

6.1. FUNDAMENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO DE BENEFICIO METALÚRGICO

6.1.1. BENEFICIO DE MINERALES EN PLANTA

Figura 6.1. Etapas de beneficio metalúrgico en planta. Fuente: Carvajal Herrera, 2008; Ministerio de Minas y Energía, 2015.



6.1.2. PROCESO DE CONMINUCIÓN (TRITURACIÓN Y MOLIENDA)

La conminución o reducción de tamaño de un mineral representa la primera etapa del beneficio, después de la extracción del mineral de la mina. La conminución es una etapa importante en el beneficio de minerales y contribuye a disminuir en un gran porcentaje los costos operativos y de capital de cualquier planta de procesamiento mineral. Dicho porcentaje oscila entre el 30 % y el 50% del consumo total de energía de una planta, y puede llegar a un 70%, en el caso de minerales muy competentes (Napier, Morrel, Morrison y Kojovic, 1996). Los objetivos de la conminución pueden ser:

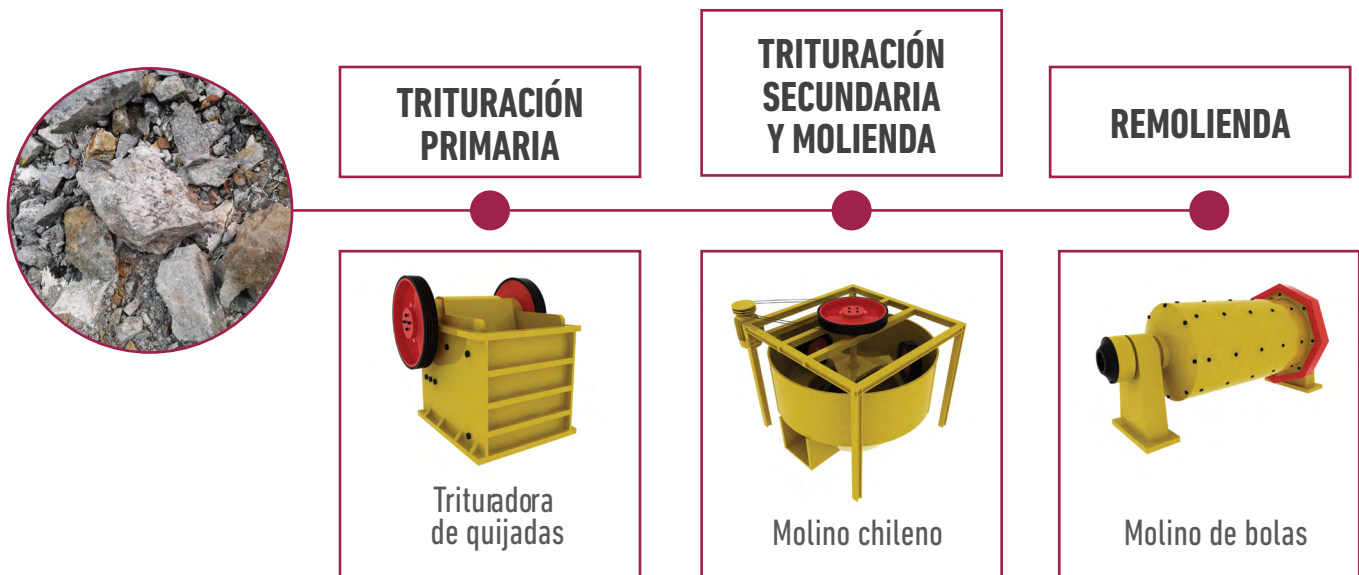
- Producir partículas de tamaño y forma adecuados para su utilización directa
- Liberar los minerales valiosos de los minerales de ganga, de modo que los primeros puedan ser concentrados
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química

La reducción de tamaño del mineral extraído de la mina hasta lograr su adaptación a las operaciones de molienda y concentración es realizada en seco y por etapas, sobre todo debido al gran volumen de dichos fragmentos. La reducción en una sola etapa se traduce en mayores gastos energéticos y costos de operación, debido al mayor desgaste de los equipos.

Se puede definir la trituración como el conjunto de operaciones cuyo objeto es reducir grandes fragmentos de mineral a fragmentos menores, para facilitar las operaciones subsiguientes de transporte, molienda, concentración, etc.

El fin principal es entregar a la molienda un producto con tamaño de partícula entre 5 y 20 mm (Wills y Finch, 2016). El proceso de trituración generalmente se divide en trituración primaria (gruesa) y trituración secundaria (media y fina).

Figura 6.2. Diagrama de proceso de conminución (trituración y molienda). Fuente: autores.



6.1.2.1. 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, en plantas que procesan más de 1000 ton/h pueden entregarse fragmentos con dimensiones de hasta 1.500 mm. La fragmentación de los minerales en la trituración primaria se da por la aplicación, fundamentalmente, de las fuerzas de compresión, clivaje y abrasión, aplicadas hasta obtener fragmentos cuya dimensión puede variar entre 300 y 100 mm, que son enviados a las siguientes etapas de trituración.

Trituradora de quijadas

Fotografía 6.1. Modelo de trituradora de quijadas. Fuente: autores.

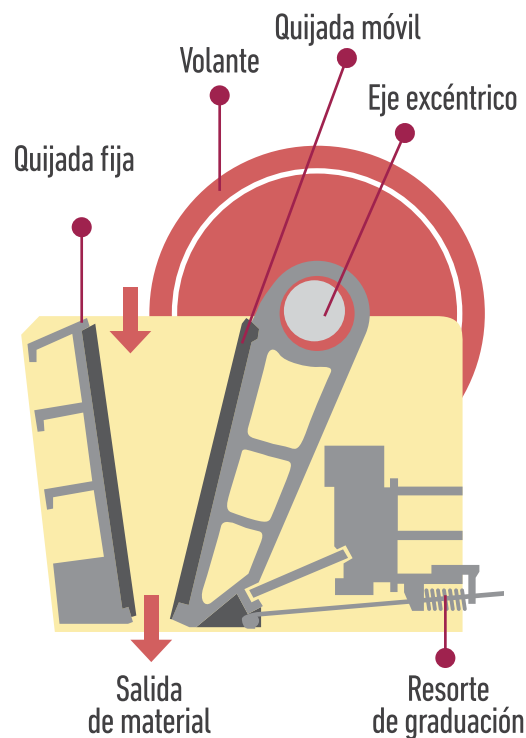
En la trituradora de quijadas, el mineral se fragmenta mediante compresión, en combinación con el clivaje, entre las superficies de las quijadas fija y móvil. La quijada móvil se aproxima (durante la marcha de trabajo) o se aleja (durante la marcha en vacío) de la quijada fija, al rotar el árbol excéntrico. 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 la gravedad (Metso, 2009).

Existen tres tipos de trituradoras de quijadas, que se clasifican de acuerdo con el movimiento de la quijada móvil. En la trituradora de tipo Blake, la quijada móvil es pivotada en la parte superior y puede variar la abertura de salida; la trituradora tipo Dodge es pivotada en la parte inferior y puede variar la abertura de entrada; la trituradora de tipo universal es pivotada en el medio de la quijada móvil y pueden variar tanto las aberturas de entrada como de salida (Wills y Finch, 2016).



Figura 6.3. Diagrama de funcionamiento de la trituradora de quijadas. Fuente: autores.

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE OPERACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> · Ángulo de pellizco · Diámetro mineral inicial · Diámetro mineral final · Índice de Bond (kWh/t) · Coeficiente de variación de peso · Densidad mineral · Eficiencia · Múltiplo de variación de longitud de boca. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ancho de abertura de la boca · Longitud de la boca · Altura de la pared delantera · Capacidad (t/h) · Velocidad (rpm) · Velocidad crítica (rpm) · Velocidad óptima (rpm) · Potencia requerida (HP)



6.1.2.2. TRITURACIÓN SECUNDARIA (FINA)

Después de la trituración gruesa, el material se somete a una trituración en las máquinas de trituración media y fina, en las cuales el proceso se realiza con el tamaño de salida de la trituración primaria hasta tamaños menores a 10 mm. En la trituración media y fina se utilizan principalmente trituradoras cónicas y de impacto.

Trituradora de impacto

La trituradora de impacto (martillos) es una máquina que aprovecha la energía de un impacto o golpe para fragmentar el mineral. En general, estas máquinas proporcionan tasas mayores de reducción, si se comparan con las que proveen las trituradoras de mandíbulas, así como un buen factor de forma. Sin embargo, en materiales arcillosos su rendimiento disminuye.

La entrada de la alimentación de la trituradora se sitúa en la parte superior, en un lateral con 45° respecto a la vertical; la salida del producto se encuentra en la parte inferior, y tiene una malla que clasifica el mineral que se encuentra en el tamaño adecuado. Las placas de choque, de acero al manganeso, se desgastan de forma desigual, por lo que se diseñan de forma simétrica para invertirlas y aprovecharlas mejor. Suelen ser dentadas para facilitar la fractura del mineral.

Fotografía 6.2. Modelo de trituradora de martillos. Fuente: autores.

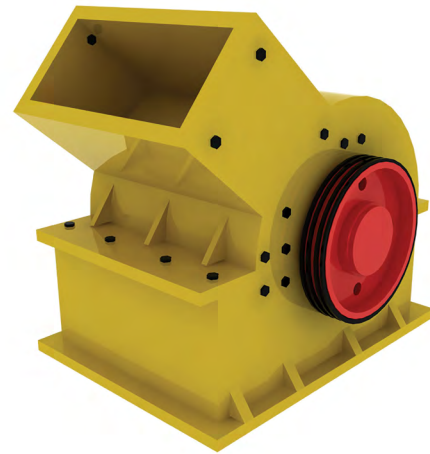
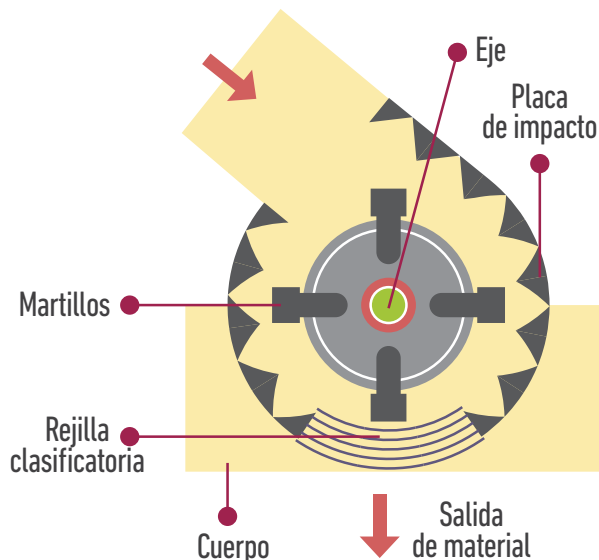


Figura 6.4. Diagrama de funcionamiento de la trituradora de martillos y tamaños de trituradoras de martillos, potencia nominal y capacidades aproximadas (Denver, 1954). Fuente: autores.

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



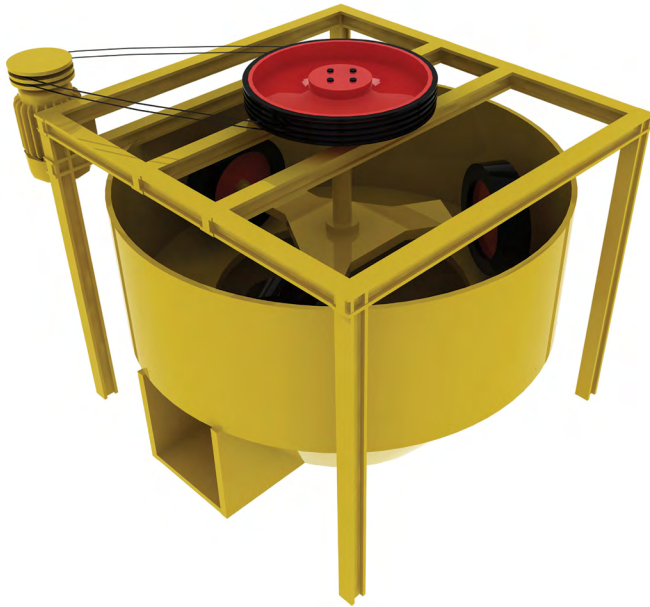
Molino chileno

El molino chileno es la versión moderna del antiguo molino de arrastre (Simonin, 1867). Es una herramienta versátil, pues cumple la función de triturador secundario y molienda. Por ser de fácil limpieza, no retiene material dentro, como sucede con el molino de bolas; además, cumple funciones de concentrador de partículas gruesas y pesadas, como el oro.

El molino consiste esencialmente en discos pesados de acero que giran alrededor de un eje vertical y sobre un anillo con una superficie cóncava. Debido al peso de los discos, estos muelen el material cargado al mismo tiempo que crean corrientes que transportan el producto molido hacia las mallas de descarga. Este diseño (cóncavo y convexo) pre-

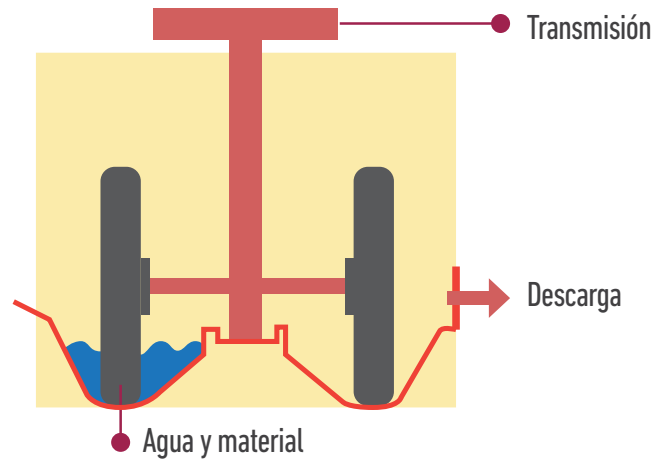
tende mantener el mineral siempre dentro del área de molienda, evitando así la dispersión o derrame. Esta operación contempla bajos costos de operación y mantenimiento, debido a la larga vida útil de sus componentes y la simplicidad de su funcionamiento (Velásquez, Veiga y Hall, 2010).

Fotografía 6.3. Modelo de un molino chileno. Fuente: autores.



El molino chileno es una máquina versátil que permite triturar, moler y concentrar el oro grueso. Para el caso de las asociaciones es muy útil, debido a que cada minero puede trabajar su material sin que exista mezcla con materiales de diferentes minas.

Figura 6.5. Diagrama de funcionamiento de un molino chileno. Fuente: autores.



MODELO	CAPACIDAD (t/h)	DIÁMETRO DEL MOLINO (m)	POTENCIA DEL MOTOR (HP)	PESO APROX. DE DISCOS DE MOLIENDA (kg)
1	12-30	1,5	6	500
2	30-60	1,8	12	1000
3	70-120	2,5	18	1750

6.1.2.3. MOLIENDA

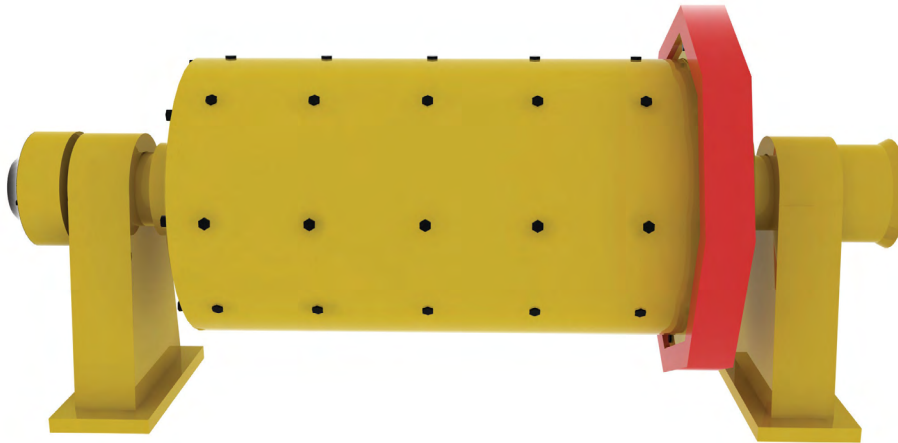
Es la operación final del proceso de conminución y consiste en reducir de tamaño partículas procedentes de la trituración media o fina (con fragmentos menores a 20 mm), hasta un tamaño que se encuentra en el rango de 28 a 200 mallas Tyler en la molienda gruesa, y menores de 325 mallas en la molienda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

En una planta de beneficio de minerales, la molienda es la operación que representa el mayor consumo energético y de elementos consumibles, como revestimientos y medios molidores por tonelada de mineral procesado. Por ese motivo el diseño de los

Se requiere un molino de bolas remolador para reducir el tamaño de los rechazos de los procesos gravimétricos, con el objetivo de obtener una mejor recuperación en los procesos posteriores, como la flotación y cianuración.

equipos y la definición de los parámetros de operación de la molienda son fundamentales para optimizar los costos y la recuperación de minerales valiosos.

Fotografía 6.4. Modelo de un molino de bolas. Fuente: autores.



Objetivos de la operación

Con base en la etapa del proceso de beneficio de un mineral, la molienda puede tener dos objetivos (austin y concha, 1994): primero, liberar el mineral valioso del mineral de 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). Segundo, obtener el tamaño de partícula apropiado para el proceso de concentración por flotación o para los procesos hidrometalúrgicos en los que se requiere que el mineral valioso esté expuesto en la superficie de las partículas, para que así puedan actuar sobre él los reactivos utilizados en los procesos antes mencionados.

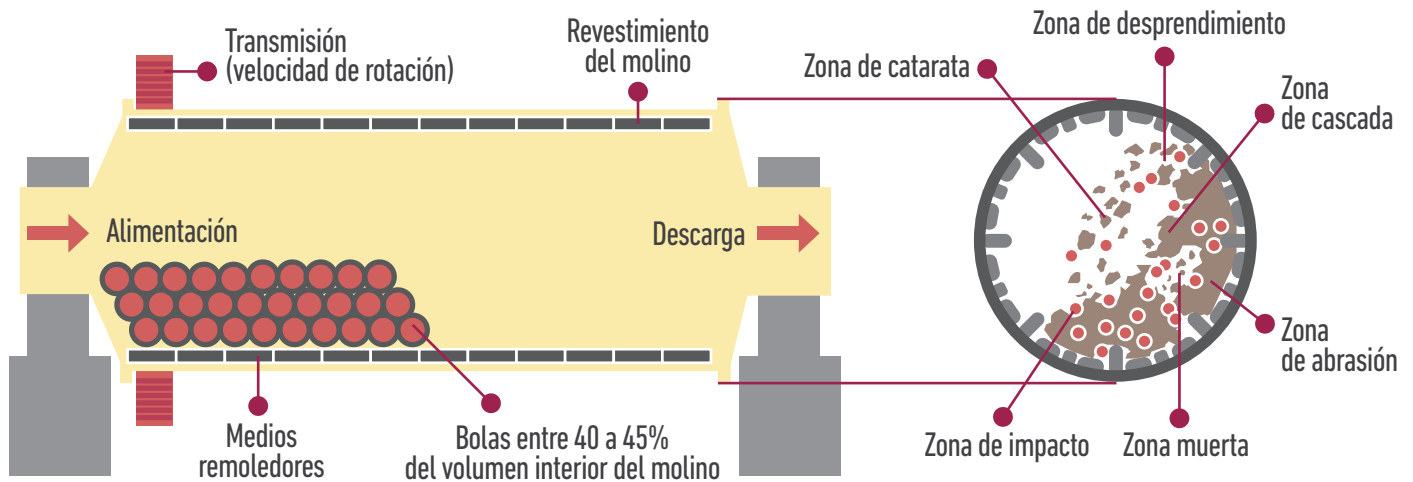
Molino de bolas

Los molinos rotatorios se componen de un tambor cargado con una fracción de entre el 25 % y el 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 y abrasión.

Las bolas (medios moledores) están completamente sueltas, móviles, y son de mayor peso y tamaño que las partículas de mineral que se molerá. Los medios moledores son arrastrados y levantados por la rotación del

VARIABLES DEL EQUIPO	VARIABLES DEL MINERAL	VARIABLES DE OPERACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> · Diámetro x longitud · Fracción de llenado · Porcentaje de la velocidad crítica · Tamaño máximo de cuerpos moledores · Porcentaje de sólidos · Capacidad nominal 	<ul style="list-style-type: none"> · Densidad del mineral · Diámetro máximo de la alimentación · Distribución granulométrica de la alimentación · Índice de Bond molienda 	<ul style="list-style-type: none"> · Flujo de alimentación · Densidad de pulpa · Consumo energético · D80 del producto · Distribución granulométrica del producto

Figura 6.6. Diagrama de funcionamiento de un molino de bolas, tamaños estándar de molinos de bolas, potencia nominal y capacidades aproximadas. Fuente: 911 Metallurgist, 2018.



DIÁMETRO X LONGITUD (m)	ROTACIÓN APROXIMADA (rpm)	VOLUMEN DE CARGA DE BOLAS (t)	CAPACIDAD (t/h)	POTENCIA DEL MOTOR (kW)	PESO DEL MOLINO (t)
0,9 x 1,8	37	1,5	0,65 - 2	18,5	4,6
0,9 x 3	36	2,7	1,1 - 3,5	22	5,6
1,2 x 2,4	36	3	1,5 - 4,8	30	12
1,2 x 3	36	3,5	1,6 - 5	37	12,8
1,2 x 4,5	32	5	1,6 - 5,8	55	13,8
1,5 x 3	30	7,5	2 - 5	75	15,6
1,5 x 4,5	27	11	3 - 6	110	21
1,5 x 5,7	28	12	2,5 - 6	130	24,7
1,83 x 3	25	11	4 - 10	130	28
1,83 x 4,5	25	15	4,5 - 12	155	32
2,1 x 3	24	15	6,5 - 36	155	34
2,1 x 4,5	24	24	8 - 43	245	42

tambor, en un ángulo tal que la fuerza de gravedad (el propio peso de las bolas) 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 continuos y repetidos. Esto se logra cuando el molino gira entre un 50 y un 75% de su velocidad crítica (Wills y Finch, 2016).

La velocidad crítica es la velocidad en la cual la fuerza centrífuga, por efecto de 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.

Ecuación de velocidad crítica fuente (Austin y Concha, 1994):

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_m - D_b}}$$

siendo V_c la velocidad crítica del molino en rpm, D_m el diámetro del molino en m y D_b el diámetro mayor de los cuerpos moledores en m.

6.1.3. CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA

Clasificación por cribado

El proceso de separación de 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).

La función de la criba es dividir la corriente de alimentación en fracciones por tamaño, independientemente de su composición química o mineralógica. Las operaciones de cribado a seco generalmente están asociadas a los equipos de trituración, siendo estas las responsables del control del tamaño del producto final y del porcentaje de recirculación de los circuitos de trituración (Austin y Concha, 1994).

Variables que afectan la operación

La eficiencia del cribado o la probabilidad de que una partícula determinada de la alimentación vaya al rechazo R o al bajo tamaño B depende de la posibilidad que tenga de pasar a través de la abertura del tamiz.

Las partículas sobre la superficie de trabajo se obstaculizan unas a 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 una abertura, una vez llegue a la superficie, depende de tres factores:

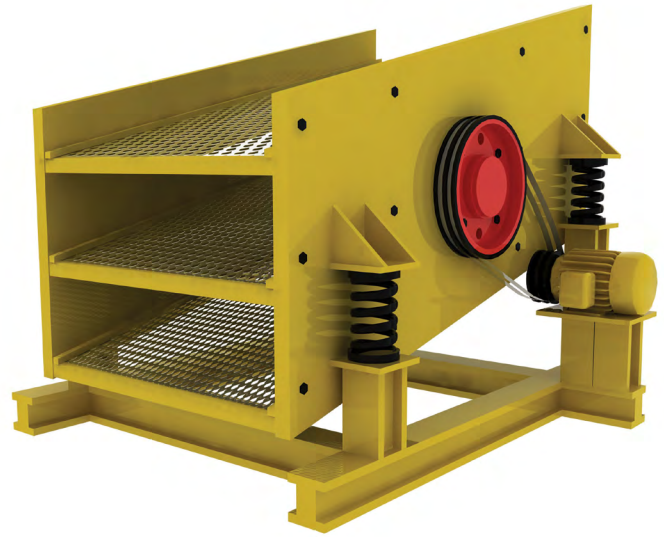
1. De las dimensiones de las partículas y del orificio del tamiz.
2. De la forma de alimentación y de la posición de llegada a la superficie.
3. De la inclinación de la superficie.

6.1.4. CLASIFICACIÓN HIDRÁULICA

La 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 de corriente horizontal accionados mecánicamente, y los hidrociclones.

Fotografía 6.5. Modelo de un criba. Fuente: autores.



Las cribas son útiles principalmente durante las etapas de trituración, en tamaño inferiores a 1/16", pierden su eficiencia debido al taponamiento.

Fotografía 6.6. Modelo de un hidrociclón. Fuente: autores.



Hidrociclón

El hidrociclón es un equipo que se emplea, entre otras cosas, para clasificar partículas de tamaños entre 300 y 5 micrones (Wills y Finch, 2016).

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

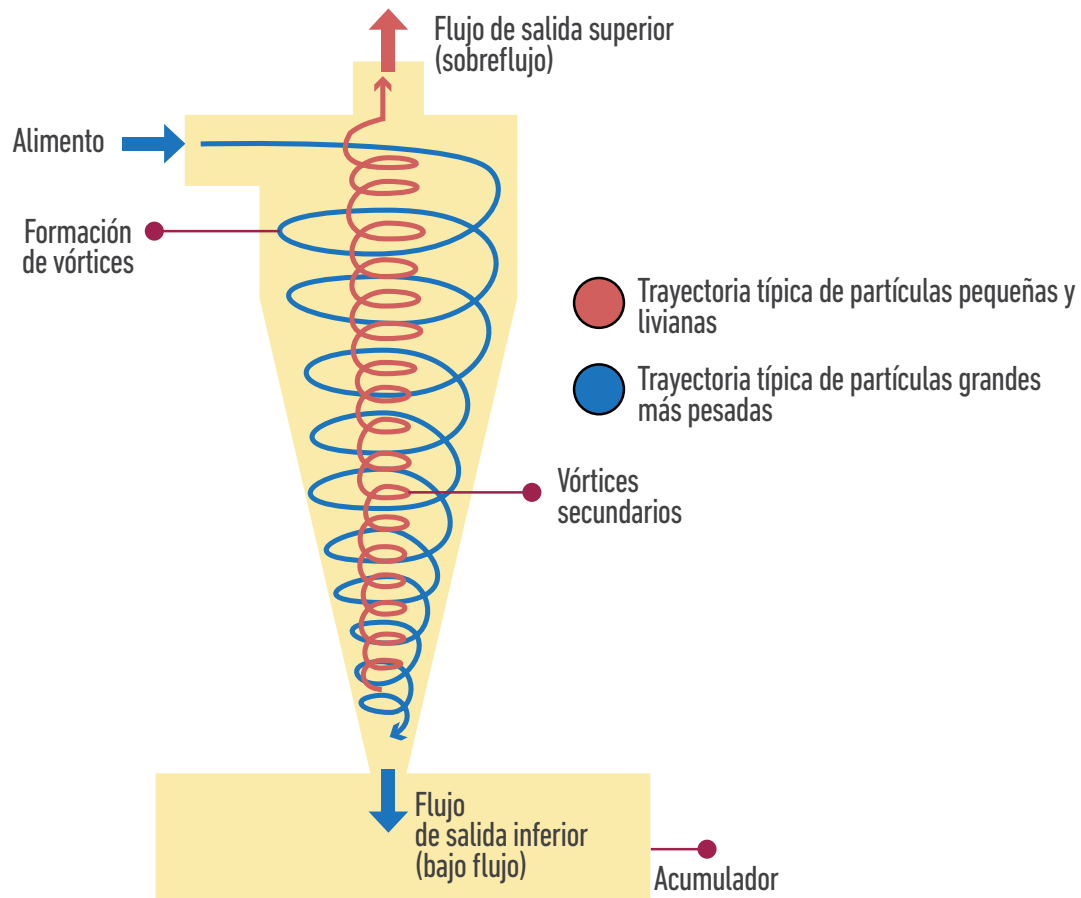
Aunque el hidrociclón es un equipo bastante simple en su forma, su funcionamiento es muy complejo.

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

La diferencia de presión entre el vórtice y su centro origina una fuerza que trata 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 del hidrociclón, por él va a evacuarse el material fino que sale por el rebalse, mientras que por la descarga saldrán las partículas más gruesas de la distribución granulométrica que ingresó al equipo y que generalmente son retornadas al equipo de molienda.

Figura 6.7. Diagrama de funcionamiento de un hidrociclón, tamaños de hidrociclones, presiones y capacidades aproximadas. Fuente: Denver, 1954.



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

Clasificador de espiral

En este tipo de clasificadores hidráulicos, las partículas de mineral con baja velocidad de sedimentación son arrastradas por el fluido y descargadas por rebalse; las partículas de mineral con velocidad de sedimentación alta se depositan en el fondo del equipo y son transportadas a la parte superior por una espiral (Wills y Finch, 2016).

VARIABLES DE OPERACIÓN

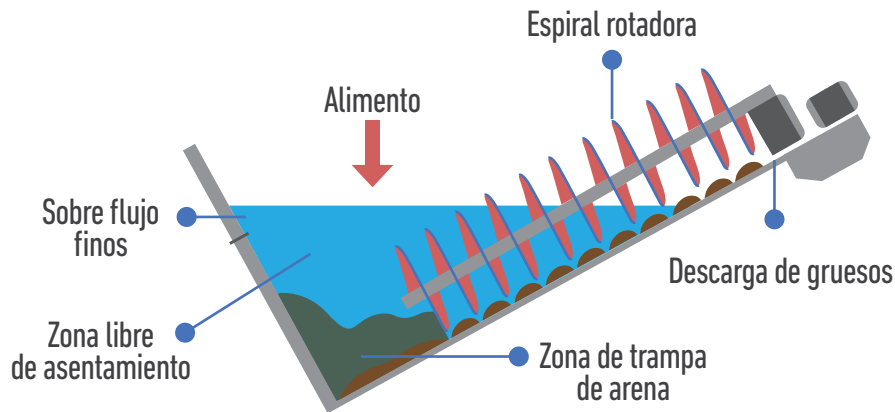
- Peso de la pulpa
- Densidad de la pulpa
- Caudal de pulpa
- Diámetro cilíndrico
- Diámetro rebosadero
- Diámetro de alimentación
- Diámetro de descarga

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 rebalse (Overflow)

Generalmente, los clasificadores en espiral son utilizados para cerrar los circuitos de molienda. Estos tienen la capacidad de absorber con relativa facilidad perturbaciones en el circuito, como variación del flujo o de la distribución de tamaño de partícula de la alimentación. Las principales variables que influyen en la eficiencia de la clasificación y el tamaño de corte son el nivel de pulpa en la zona de sedimentación, la velocidad de la espiral, el porcentaje de sólidos de la pulpa, el flujo y la distribución de tamaño de partícula de la alimentación.

Figura 6.8. Diagrama de funcionamiento de un clasificador de espiral. Fuente: autores.



6.1.5. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR GRAVIMETRÍA

El objetivo principal de la concentración es enriquecer el mineral valioso eliminando los minerales de ganga y minimizando, en lo posible, las pérdidas de mineral.

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

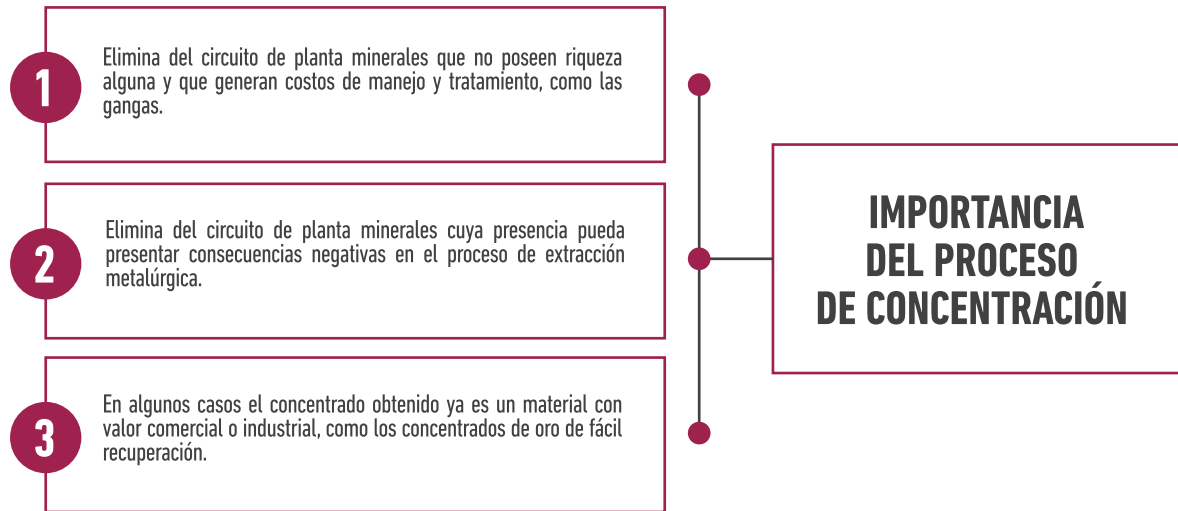
$$\text{TENOR} = \frac{\text{CANTIDAD DE MINERAL ÚTIL}}{\text{CANTIDAD DE MINERALES EXTRAÍDOS}}$$

másica o volumétrica de mineral de interés o valioso (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 mineral total (g/ton, g/m³).

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.

Figura 6.9. Importancia del proceso de concentración. Fuente: autores.



6.1.5.1. 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, centrífugas, de arrastre y empuje (Cetem, 2010).

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.

VALOR DE CC	SEPARACIÓN	TAMAÑO (mm)
> 2,5	Fácil	Hasta 0,075
1,75 – 2,50	Posible	Hasta 0,150
1,50 – 1,75	Difícil	Hasta 1,7
1,25 – 1,50	Muy difícil	
< 1,25	No posible	

$$CC = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

D_h : Densidad del mineral pesado
 D_f : Densidad del medio fluido
 D_l : Densidad del mineral liviano
 CC: Criterio de concentración

Canalones

Los canalones son medios concentradores sencillos que constan de canales rectangulares ligeramente inclinados, de fondo plano, cubiertos por bayetas (láminas de tejidos que retienen las partículas pesadas), o canales transversales denominados rifles.

Por estos canales pasa una corriente con un flujo de pulpa (25-30% sólidos) descendiente. Las partículas de minerales más gruesas son atrapadas en el fondo de la bayeta o entre los rifles, y las partículas más finas siguen su curso descendiente sin ser recolectadas por el canalón; posteriormente el material retenido es recolectado en tanques para su tratamiento.

Para este tipo de minería, los canalones son generalmente construidos con concreto, aunque también se encuentran fabricados de madera, aceros convencionales o aceros inoxidable.

Las partículas en el fondo de la película de agua se ven afectadas por los siguientes factores (Cetem, 2010):

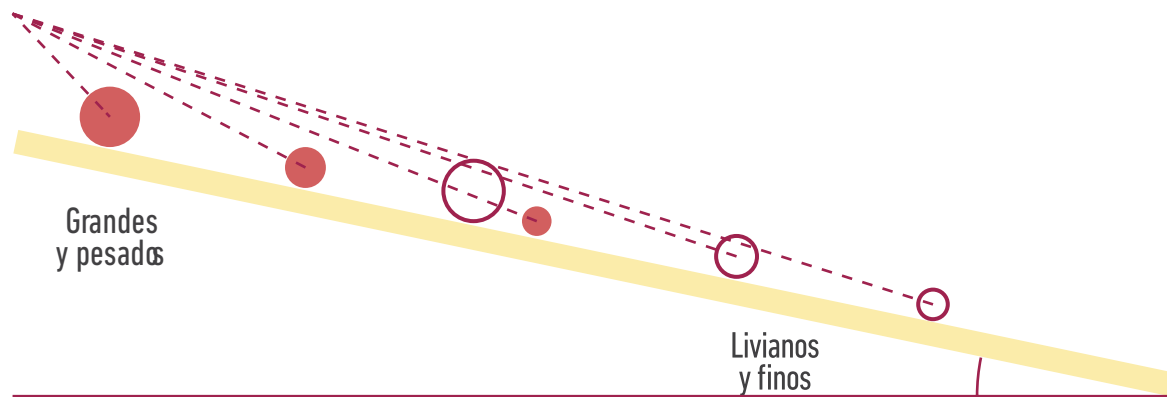
- Pendiente del canalón.
- Espesor de la película de agua (caudal).
- Los coeficientes de fricción entre las partículas y la superficie.
- La gravedad específica de las partículas
- La forma de las partículas.
- La rugosidad de la cubierta.

Fotografía 6.7. Modelo de canalón. Fuente: autores.



Variables de diseño de los canalones

Figura 6.10. Diagrama de principio funcionamiento de los canalones. Fuente: autores.



Ancho: es una de las dos variables más importantes. Existen dos problemas en la escogencia del ancho ideal. En el primero, es deseable tener un ancho angosto para disponer de películas de fluido profundas y permitir la evacuación de partículas grandes, pero genera la pérdida de oro fino. La segunda es que un ancho mayor genera películas poco profundas, lo cual mejora la recuperación del oro, pero la capacidad de arrastre es baja.

Esto indica que es necesario realizar una clasificación previa al proceso y que los anchos más comunes y efectivos son de 42" a 40".

Longitud: la longitud del canalón depende de la cantidad de finos presentes en la alimentación. La mayoría de partículas gruesas se recupera en los primeros metros, mientras que los finos requieren de mayor longitud.

Inclinación: las pendientes de los canalones se expresan en porcentajes. Las pendientes más usadas están entre el 4 % y el 5%.

Mesas de concentración (mesa Wilfley)

Este concentrador consiste en una mesa ligeramente inclinada con canales o rifles transversales. Se alimenta con una pulpa cuyo peso está constituido en un 25% por sólidos. La pulpa se introduce en la caja de alimentación y se distribuye por medio del agua de lavado que entra 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 6.8. Modelo de mesa Wilfley. Fuente: autores.

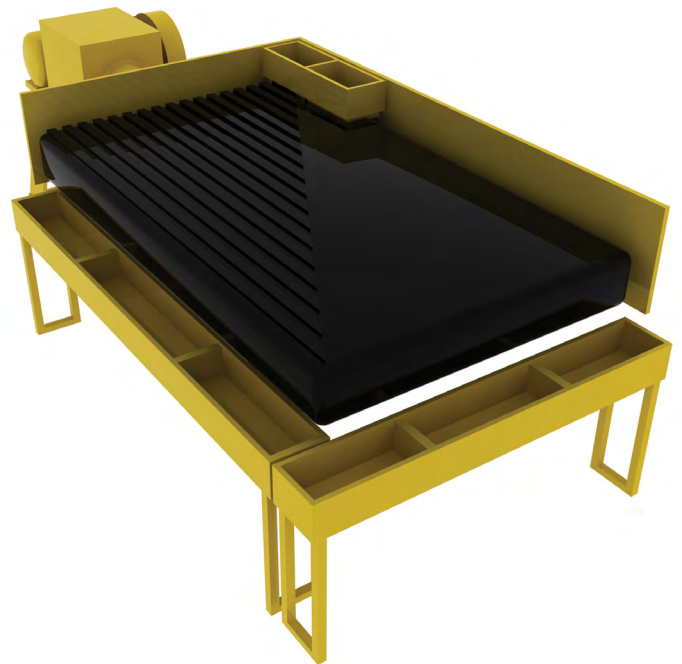
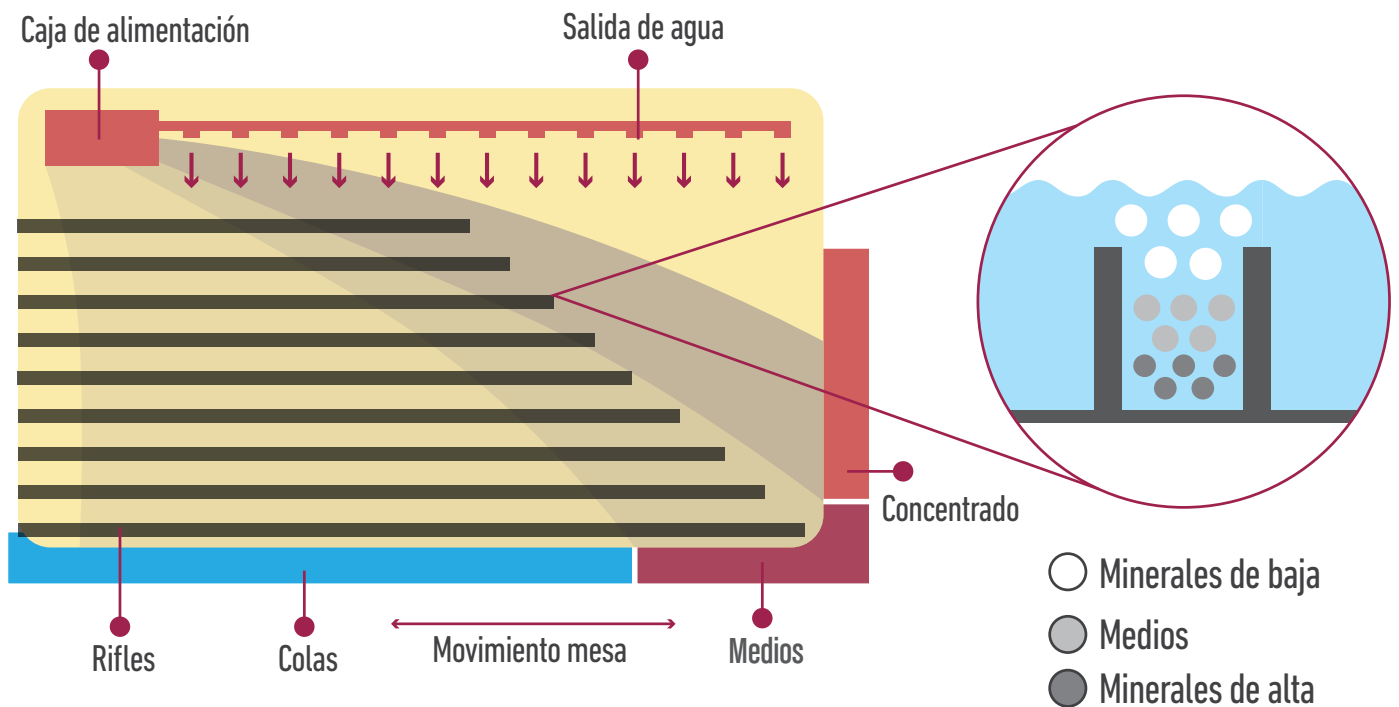


Figura 6.11. Diagrama de funcionamiento de una mesa de concentración gravimétrica. Fuente: autores.



VARIABLES DE DISEÑO
· Geometría de la mesa
· Material de la superficie
· Rifles (forma y distribución)
· Aceleración de sacudidas
· Velocidad del motor

VARIABLES DE OPERACIÓN
· Inclinación e la mesa
· Densidad de la pulpa alimentada
· Caudal de agua de lavado
· Ubicación del punto de alimentación

TAMAÑO EN MICRONES	CAPACIDAD (t/h)
750-250	1.5-3
400-150	1-2
200-75	0.5-1
100-40	0.2-0.5

Fotografía 6.9. Modelo de un concentrador centrífugo. Fuente: autores.



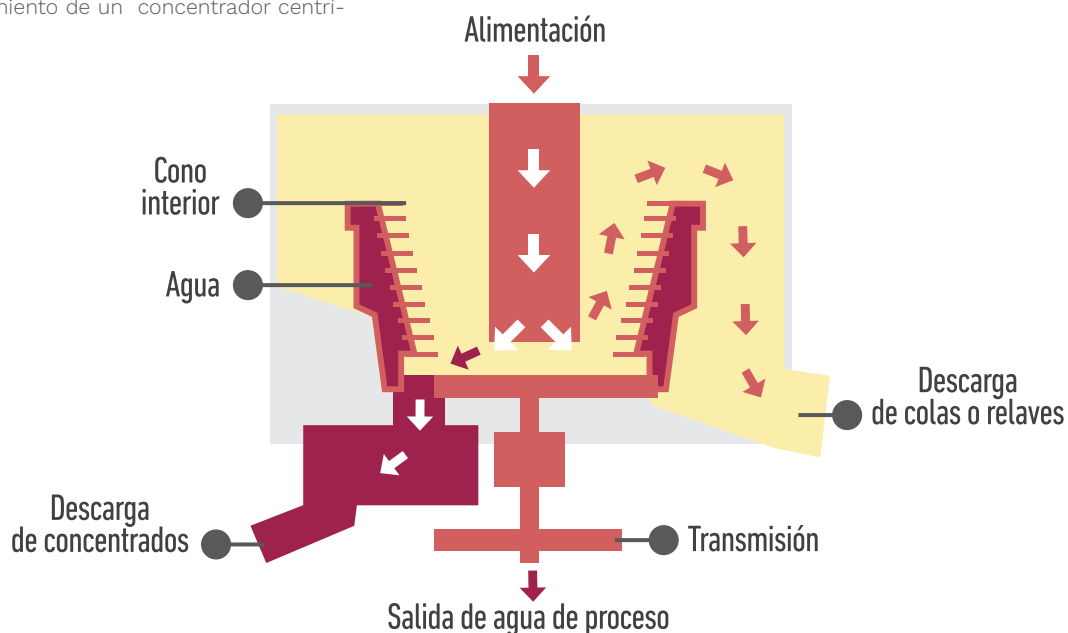
Concentradores centrífugos (tipo Knelson o Falcon)

Los concentradores centrífugos son un tipo de concentrador gravimétrico que hace uso de la fuerza centrífuga y que tienen la ventaja de recuperar partículas finas. La capacidad de dichos equipos para cambiar el campo gravitatorio aparente es una alternativa importante en la recuperación de minerales finos como el oro (Wills y Finch, 2016).

Los concentradores centrífugos más utilizados en la industria mineral son los de tipo Knelson y tipo Falcon. Estos equipos tienen la ventaja de ser compactos, su funcionamiento consiste en la formación de un lecho fluidizado activo en su interior para capturar minerales pesados (Knelson y Jones, 1994). Una fuerza centrífuga de hasta 60 veces la de la gravedad actúa sobre las partículas, atrapando las partículas más densas en una serie de anillos (rifles) ubicados en el compartimiento interior del equipo, mientras que las partículas de baja densidad son descargadas al producto de cola. Las capacidades de las unidades

van desde la escala de laboratorio (0,03 ton/h) hasta escala industrial (150 ton/h) para partículas que varían en tamaño desde 10 μm hasta un máximo de 6 mm. Generalmente se usa para alimentos en los que el componente denso a recuperar es una fracción muy pequeña del material total, menos del 0,05 % en peso.

Figura 6.12. Diagrama de funcionamiento de un concentrador centrífugo. Fuente: autores.



Las principales variables operacionales de los concentradores centrífugos son:

- Tasa de alimentación de sólidos.
- Porcentaje de sólidos de la alimentación
- Frecuencia de rotación.
- Caudal de agua
- Caudal de aire.
- Tiempo de formación del lecho fluidizado.
- Tamaño de partícula de la alimentación.

6.1.6. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR FLOTACIÓN

Fotografía 6.10. Modelo de celda de flotación industrial.
Fuente: autores.

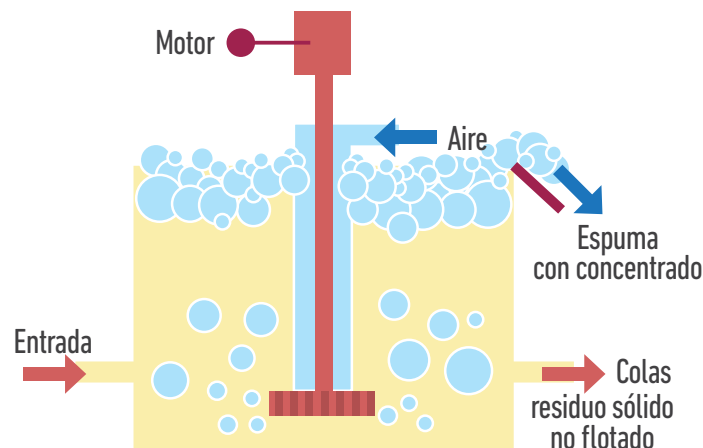


La flotación se basa en la capacidad que tiene la superficie de un sólido de ser o no humectada por el agua.

Cuando dicho sólido se deja humectar, se dice que es hidrófilo (adsorbe agua en su superficie), mientras que, si no se deja mojar, es hidrófobo. Al introducir sólidos hidrófobos en agua, sus superficies no formarán enlaces con los grupos polares; por ende, en presencia de una burbuja que asciende, el mismo 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 (Bulatovic, 2007).

Figura 6.13. Diagrama de funcionamiento de una celda de flotación. Fuente: autores.



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

6.1.7. 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, además de ser más seguro y simple de operar que procesos con cloro o bromo. La barra de oro final resultante de la operación es prácticamente pura.

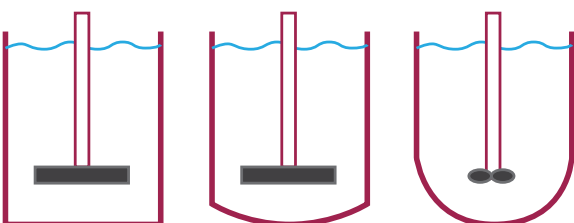
El proceso de cianuración se basa en el hecho de que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial hacia las partículas de oro metálico que hacia otros materiales. La cianuración es fuertemente afectada por el pH de la solución. Es esencial que la solución de cianuro 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 CO₂ presente en el medio ambiente.
- Para neutralizar compuestos ácidos de las menas, tales como sales ferrosas y sulfato de magnesio en las aguas 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.

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



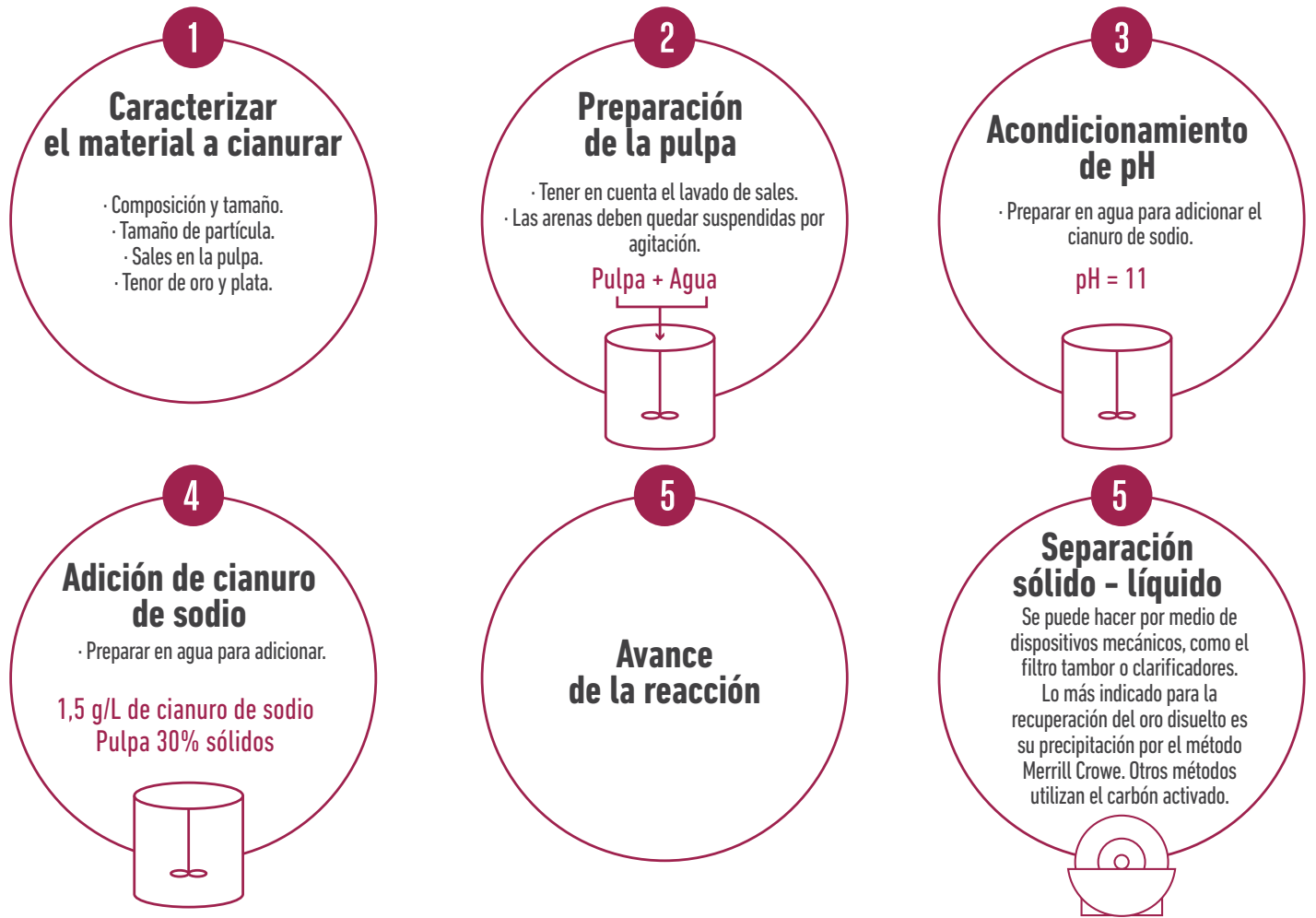
Figura 6.14. Diagrama de tipos de diseño de tanque e impulsores. Fuente: autores.



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)

Figura 6.15. Diagrama del proceso de cianuración. Fuente: autores.



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 al 80%. Esta pulpa puede impulsarse a un filtro prensa o a un filtro de tambor, o llevarse a un tanque percolador para efectos de recuperar una solución rica y descomponer compuestos ambientalmente dañinos.

Fotografía 6.11. Modelo de filtro prensa y filtro de tambor. Fuente: autores.



La cianuración industrial de un material aurífero produce una solución cuya concentración de oro está generalmente por encima de 2 mg 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 que 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:



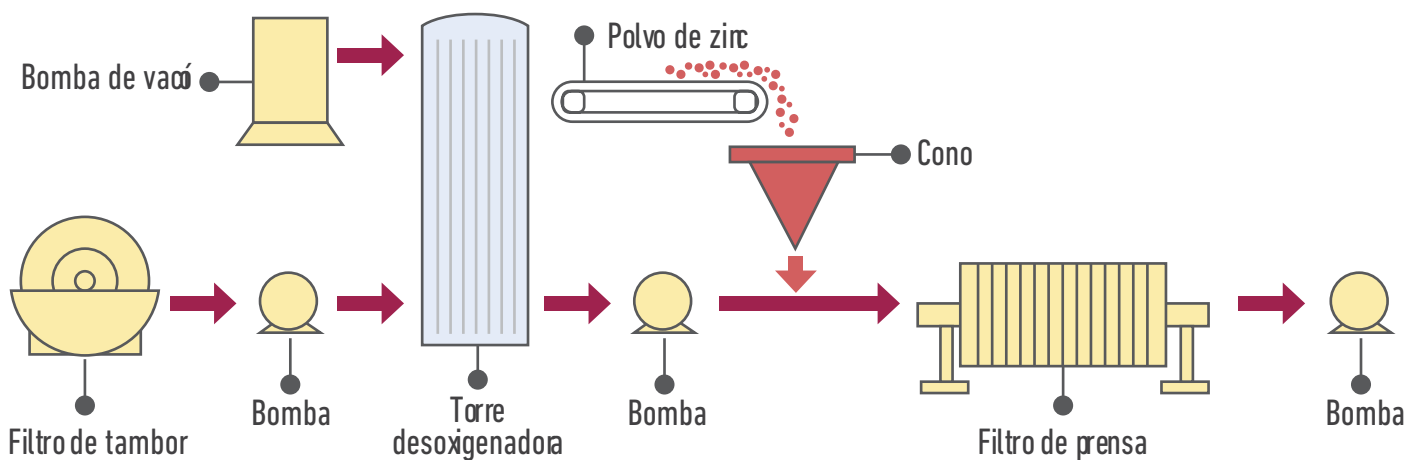
En la práctica se debe adicionar zinc entre cinco y diez veces más que los requerimientos estequiométricos. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto puede provocar la redisolución del oro ya precipitado, por lo que se debe garantizar una condición de vacío para evitarlo. Esto es posible utilizando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

Figura 6.16. Diagrama del proceso de Merrill Crowe. Fuente: autores.



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/ton de oro; 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.

6.1.8. 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.

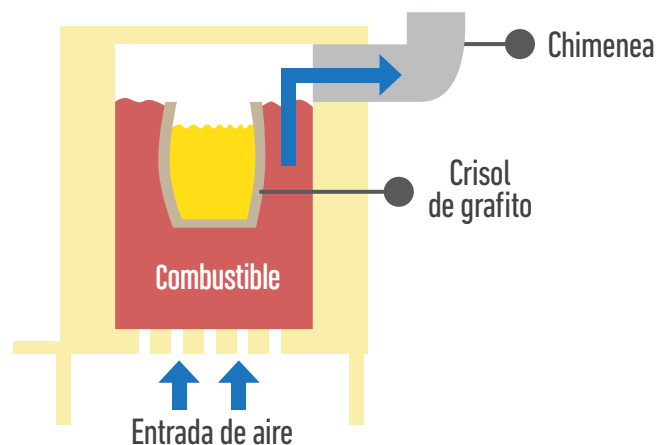
Fundición directa

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

Figura 6.17. Diagrama de horno y crisol. Fuente: autores.

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.

Fotografía 6.12. Modelo de horno con crisol. Fuente: autores.



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 1.100 °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.

6.1.9. TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS EN AGUAS

Para que exista un proceso de beneficio de oro sostenible es importante llevar a cabo el tratamiento de las soluciones resultantes de la cianuración con los métodos presentados en el punto 6.1.7 y una recirculación de las aguas que salen como rechazo en las colas de los procesos de concentración.

Debido a que en las operaciones de concentración es muy poco o nulo el uso de reactivos químicos, es ideal poder separar los residuos líquidos de los sólidos, para llevar el agua recuperada de nuevo al circuito de beneficio y las colas sólidas a disposición en el patio de relaves. Para este fin, el uso de tanques espesadores es el método óptimo y comúnmente empleado para llevar a cabo dicha separación.

Tanques espesadores

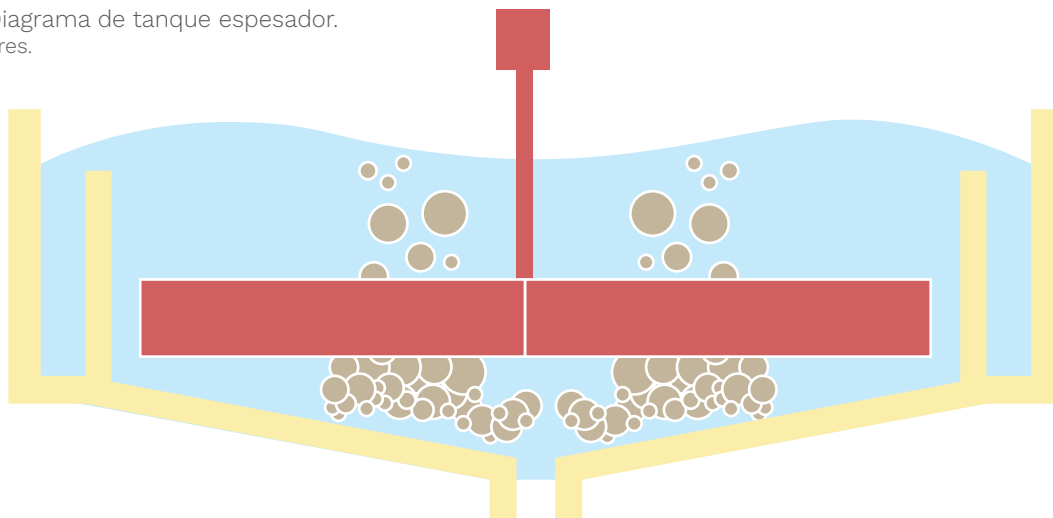
Los tanques espesadores son usados para ampliar la concentración de sólidos de un fluido con el fin de realizar una separación sólido-líquido. El principio básico de operación de un espesador es el proceso de sedimentación, en el que las partículas suspendidas en un líquido van cayendo directamente hacia la parte inferior del tanque por efecto de la fuerza de gravedad, con lo cual se clarifica el líquido sobrenadante, que es descargado por rebose en la parte superior del tanque.

La velocidad de asentamiento es directamente proporcional al tamaño y densidad de las partículas, como también de la densidad y viscosidad del fluido. Cuando las partículas suspendidas son muy pequeñas, se da una suspensión estable. Entonces se utilizan coagulantes o floculantes para romper esta estabilidad de suspensión, a raíz de lo cual las partículas pequeñas se aglomeran y descienden.

Un espesador convencional está compuesto por tanques cilindro-cónicos que constan de un mecanismo que hace girar las hélices que facilitan la descarga del producto por la parte inferior. La alimentación del material (pulpa) llega a un pozo circular en el centro del espesador, que minimiza la agitación. Así se obtiene el líquido claro, que es descargado por rebose en la parte superior de dicho tanque.

El sistema de hélices consiste normalmente en dos brazos radiales unidos a un eje central que, por medio de un motor instalado en la parte superior del eje, mueve lentamente las hélices con el fin de promover la colisión y adhesión de las partículas, que son arrastradas hacia el punto de descarga situado en la zona cónica.

Figura 6.18. Diagrama de tanque espesador.
Fuente: autores.



Fotografía 6.13. Modelo de tanque espesador. Fuente: autores.



6.2. PLANTAS DE BENEFICIO EN LA ZONA DE ZARAGOZA (ANTIOQUIA)

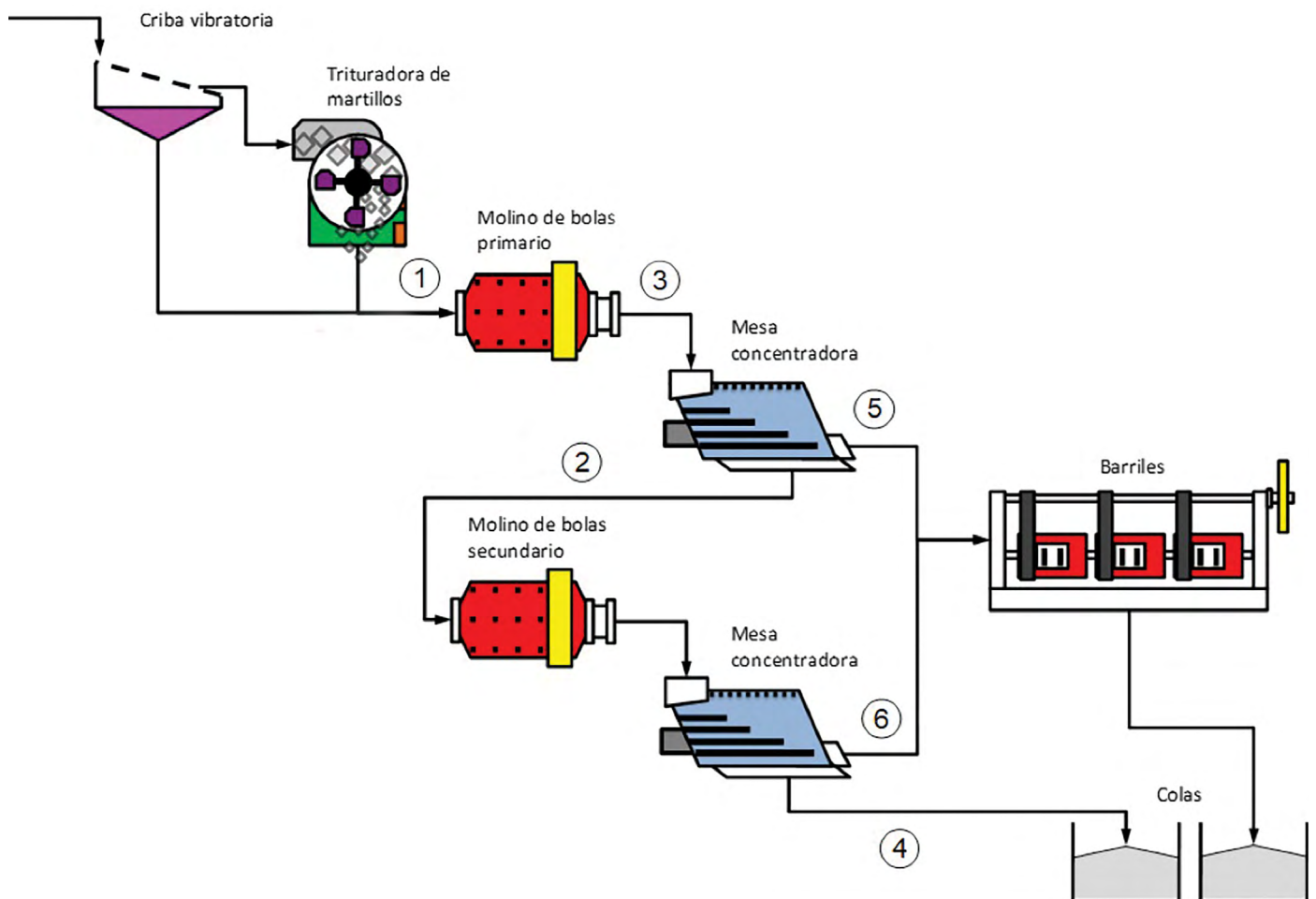
Para efectos del desarrollo de la presente guía metodológica, el equipo técnico del SGC selecciona las plantas de beneficio que engloban las características generales comunes en las plantas de la zona minera de estudio, esto permite enfocarse en la construcción de una propuesta de beneficio aplicable a la mayoría de plantas de la comunidad minera de Zaragoza (Antioquia); para conocer el detalles de la caracterización de las demás plantas de beneficio visitadas se debe realizar la revisión del informe que apoya la publicación.

6.2.1. PLANTA DE BENEFICIO DE LA MINA LA PRIMAVERA

La mina la Primavera explota y procesa su propio mineral aurífero, trabajan 2 turnos al día en turnos de 8 horas. La producción de la mina esta entre 20 – 25 ton/día.

La planta de beneficio dispone una zaranda vibratoria que es alimentada con mineral de frente de mina por medio de una banda transportadora, el producto grueso es triturado en una trituradora de martillos y el producto se junta al fino de la zaranda para ser alimentado al molino de bolas primario. El producto de molienda es concentrado en mesa tipo Wilfley, las colas de mesa son alimentadas a un molino remecedor y el producto es concentrado nuevamente en otra mesa. Actualmente los concentrados son procesados en barriles, estos quedaran en desuso, cuando entren en operación los tanques de cianuración, estos se encuentran montados, pero en el momento de la visita no estaban en operación.

Figura 6.19. Diagrama de flujo de la planta de beneficio de la mina la Primavera. Fuente: autores.



En la siguiente figura se encuentran la relación de las muestras colectadas, así como los puntos de colecta en la planta, y la relación de equipos que se componen la planta de la mina la Primavera, especificando algunas características como potencia de los motores, dimensiones, velocidades de rotación, caudal de pulpa de producto (capacidad) y porcentaje de sólidos del producto.

Figura 6.20. Tablas de relación de muestra y equipo de la mina La Primavera. Fuente: autores.

PUNTO DE COLECTA	DESCRIPCIÓN
1	Cabeza de proceso – Tolva molino
2	Colas de concentración – Mesa Wilfley 1
3	Producto de molienda – Molino de bolas 1
4	Colas de concentración – Mesa Wilfley 2
5	Concentrado – Mesa Wilfley 1
6	Concentrado – Mesa Wilfley 1
7	Colas de barriles – Pila de almacenamiento

EQUIPO	# DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Trituradora de martillos	1	Diámetro del rotor: 0,5 m Potencia nominal: 15 hp
Zaranda vibratoria	1	Área de la malla: 2,5 m ² Aberturas de las mallas: 1/2 pulgada Potencia nominal: 3 hp
Molino de bolas	2	Diámetro x longitud: 1,2 x 2,5 pies. Revestimiento: Caucho Potencia nominal: 30 hp. Tamaño máximo de bola: 2 pulgadas Porcentaje de sólidos del producto: 70%
Mesa de concentración	3	Diámetro x longitud: 0,5 x 1,0 pies. Potencia nominal: 7,5 hp
Barriles	3	Dimensiones: 1,8 x 4,0 m. Inclinación: 4°
Tanques de cianuración	8	Capacidad de los tanques: 10 m ³



Fotografía 6.14. Trituradora de martillos. Fuente: autores.



Fotografía 6.15. Zaranda. Fuente: autores.



Fotografía 6.16. Molino de bolas. Fuente: autores.

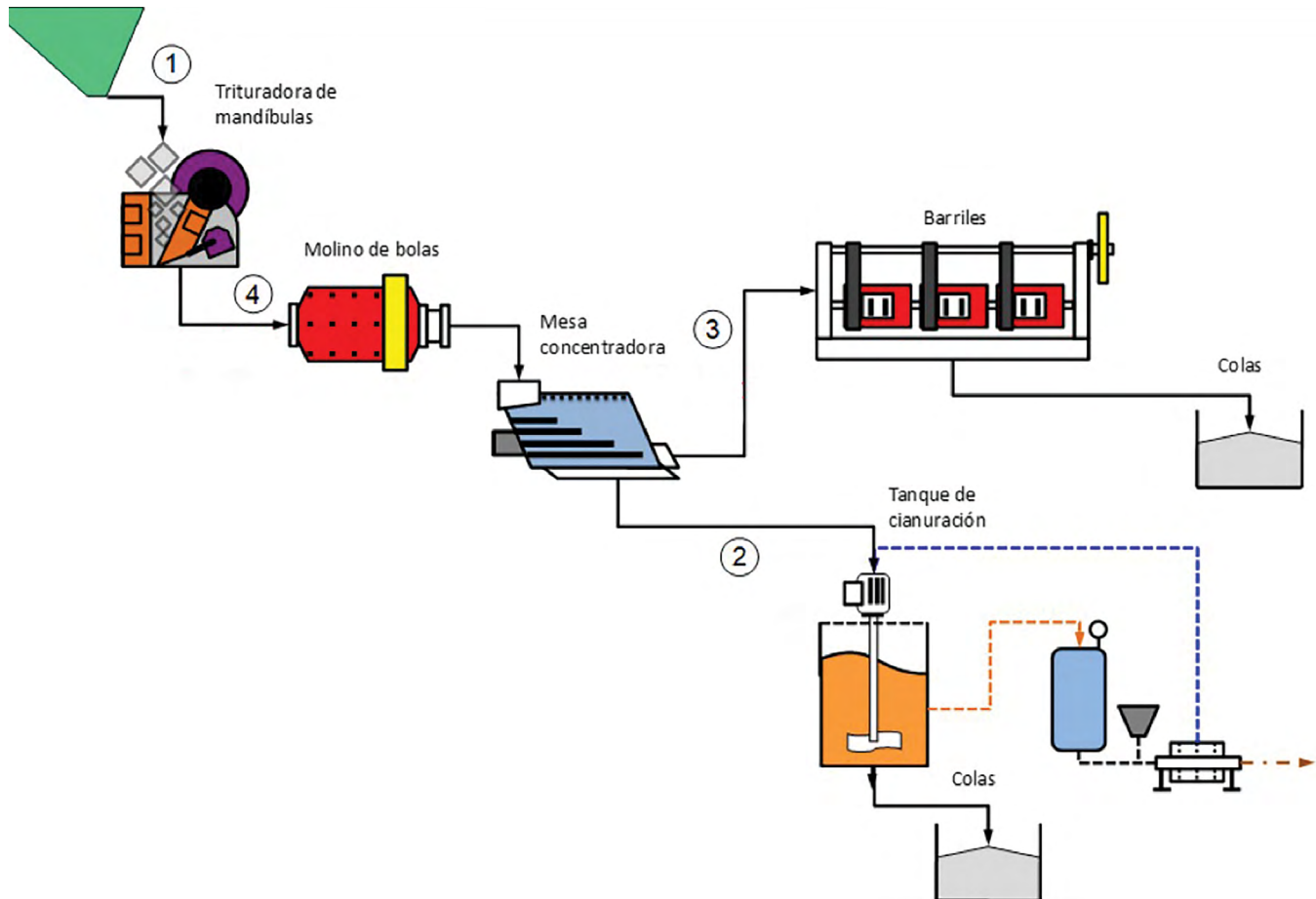


Fotografía 6.17. Mesa Wilfley. Fuente: autores.

6.2.2. PLANTA DE BENEFICIO DE LA MINA ORO VERDE

En la mina Oro Verde se observaron dos frentes de explotación, en el primero se encuentra una pequeña planta de beneficio con barriles, que no se encontraban en operación y en el segundo una planta de beneficio con trituradora de mandíbulas, molino de bolas, mesa de concentración y tanques de cianuración. El diagrama de flujo del proceso de beneficio se muestra en la figura 6.21.

Figura 6.21. Diagrama de flujo de la planta de beneficio de la mina Oro verde. Fuente: autores.



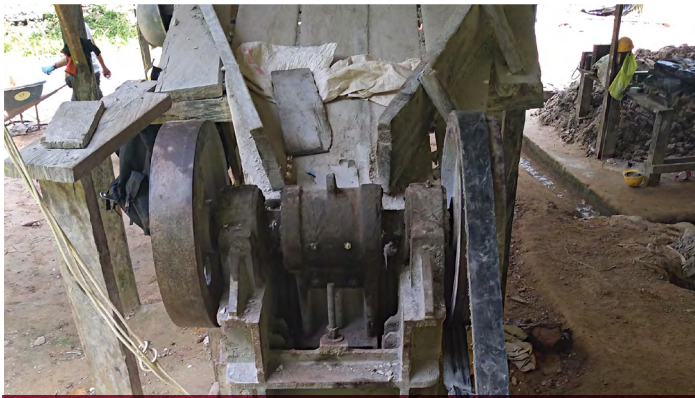
En las siguientes figuras se relacionan las muestras colectadas, así como los puntos de colecta en la planta, y el listado de equipos que componen la planta de la mina Oro Verde, especificando algunas características como potencia de los motores, dimensiones, velocidades de rotación, caudal de pulpa de producto (capacidad) y porcentaje de sólidos del producto.

Figura 6.22. Relación de las muestras colectadas en la planta de beneficio de la mina Oro verde. Fuente: autores.

PUNTO DE COLECTA	DESCRIPCIÓN
3	Concentrado – Mesa tipo Wilfley
2	Colas – Mesa tipo Wilfley
1	Cabeza frente de proceso – Veta de frente de mina
4	Cabeza de proceso – Tolva de alimentación del molino

Figura 6.23. Descripción de los equipos de la planta de beneficio de la mina Oro verde. Fuente: autores.

EQUIPO	# DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Trituradora de mandíbulas	1	Abertura: 0,15 m. Potencia nominal: 10 hp
Molino de Bolas	1	Diámetro x longitud: 1,1 x 1,5 m. Potencia nominal: 25 hp Tamaño máximo de bola: 3 pulgadas
Barriles	15	Diámetro x longitud: 0,5 x 0,5 m. Potencia nominal: 7,5 hp
Mesa concentradora	1	Tipo de mesa: Wilfley. Ancho x longitud: 2,0 x 4,3 m
Tanques de cianuración	3	Capacidad de los tanques: 12 m3. Potencia nominal del agitador: 15 – 30 hp



Fotografía 6.18. Trituradora de mandíbulas. Fuente: autores.



Fotografía 6.19. Barriles. Fuente: autores.



Fotografía 6.20. Vista general de la planta. Fuente: autores.



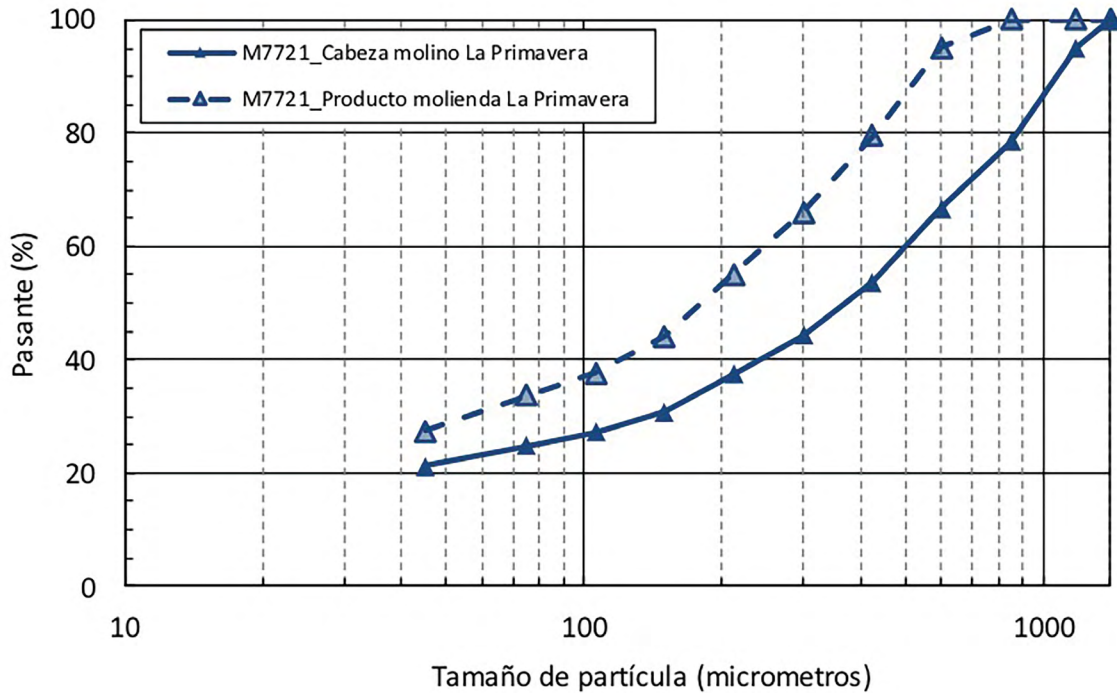
Fotografía 6.21. Detalle de una bola usada en el molino y barriles. Fuente: autores.

6.3. PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO

6.3.1. PLANTA LA PRIMAVERA

Acondicionamiento de la muestra para realizar el proceso de concentración gravimétrica.

Figura 6.24. Distribución de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto de molienda (alimentación de la mesa Wilfley) para la muestra de la mina La Primavera. Fuente: autores.



Concentración en mesa del mineral de cabeza de la mina La Primavera.

Cabeza: Cabeza de molino La Primavera
 Molienda hasta d80 =425 µm
 Tiempo de concentración: 10 minutos
 Agua de fluidización: 7.5 L/m

Figura 6.25. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina La Primavera. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza La Primavera	3463.20	100%	4.08	14125,51		
Concentrado	90,9	2,62%	98,90	8990,01	63,64	24
Medios	2204	63,64%	1,73	3967,2	28,09	
Colas	1168,3	33,73%	1	1168,3	8,27	

Refinación en batea

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley La primavera
 Molienda hasta d80 =425 µm
 Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 6.26. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina La Primavera. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza (concentrado de mesa)	59	100%	98,9	5835,1		
Concentrado	2,8	4,75%	1458	4082,40	69,96%	14,74
Colas	56,2	95,25%	31,1	1747,82	30,03%	

Concentración por flotación

Medios y colas de Mesa
 Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley La primavera
 Molienda hasta d80 =75 µm

Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos
 Tiempo de espumación: 8 minutos

Figura 6.27. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta La Primavera. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN		Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Medios de mesa	Cabeza	1052,8	100,00%	1,73	1825,1		
	Concentrado	147,2	13,98%	6,80	1001,0	54,85%	3,93
	Colas	905,6	86,02%	0,91	824,1	45,15%	
Colas de mesa	Cabeza	1050	100,00%	0,96	1007,0		
	Concentrado	58	5,52%	7,10	411,8	40,89%	7,4
	Colas	992	94,48%	0,60	595,2	59,11%	

Cianuración

Figura 6.28. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta La Primavera. Fuente: autores.

MUESTRA	CONSUMO DE CIANURO DE SODIO (kg/t)	CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO (kg/t)	TIEMPO DE CIANURACIÓN Y RECUPERACIÓN DE ORO (HORAS)	TAMAÑO DE PARTÍCULA d80 (µm)
Concentrados de flotación	5,47	2,62	25	75
Colas de batea	13,78	1,75	6	75

Figura 6.29. Lixiviación de oro por cianuración para los concentrados de flotación planta La Primavera. Fuente: autores.

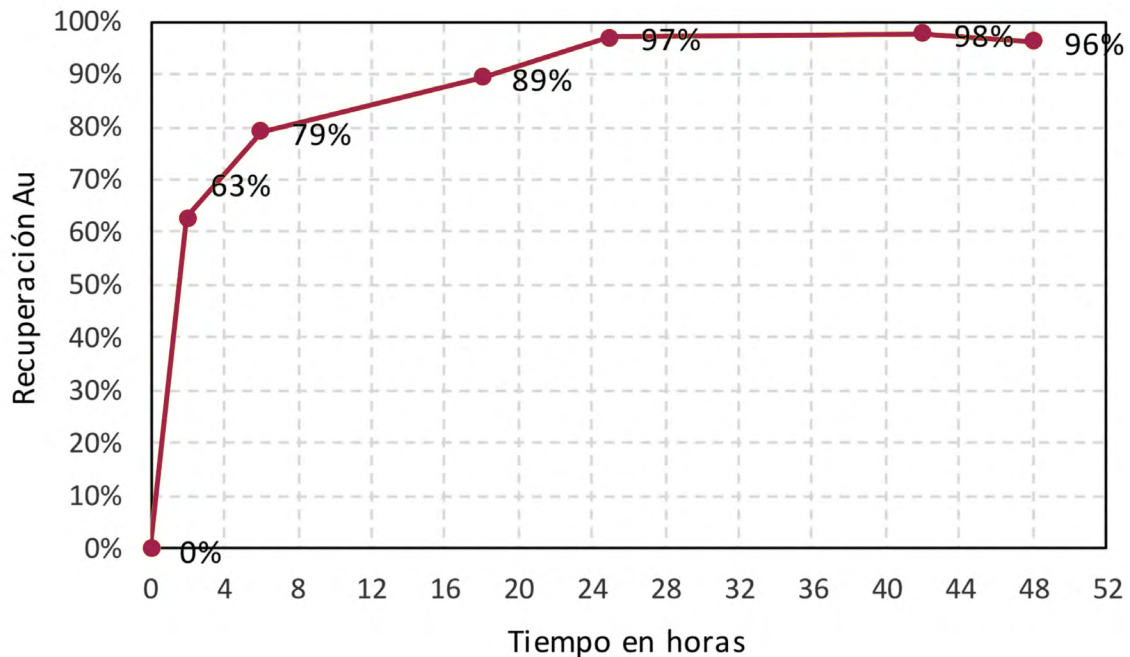
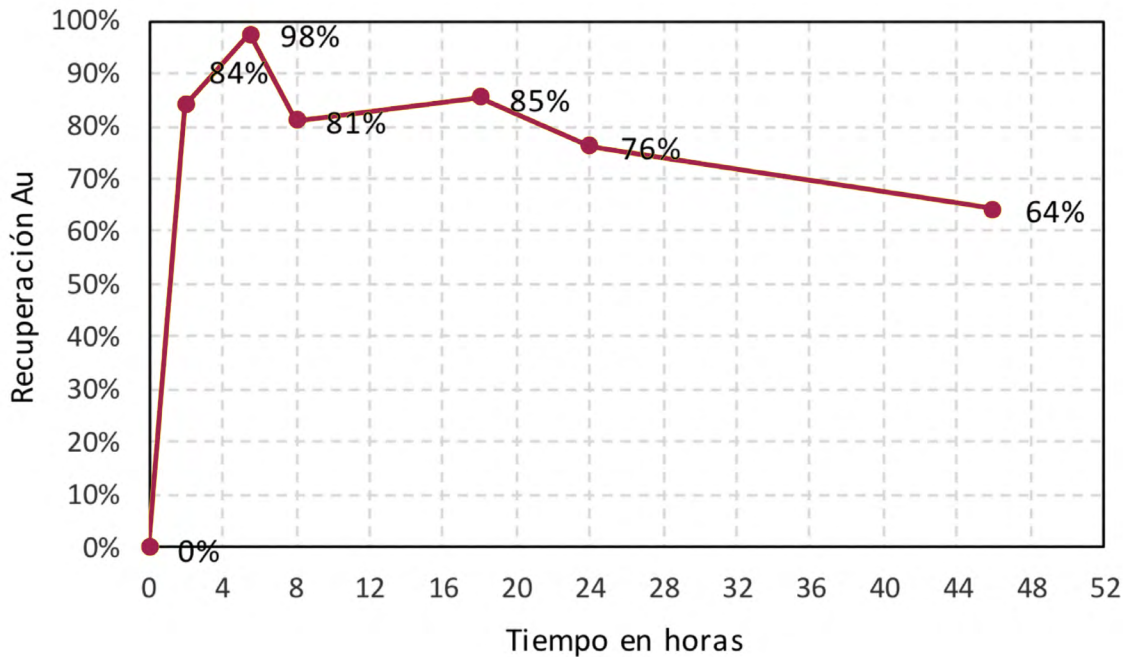


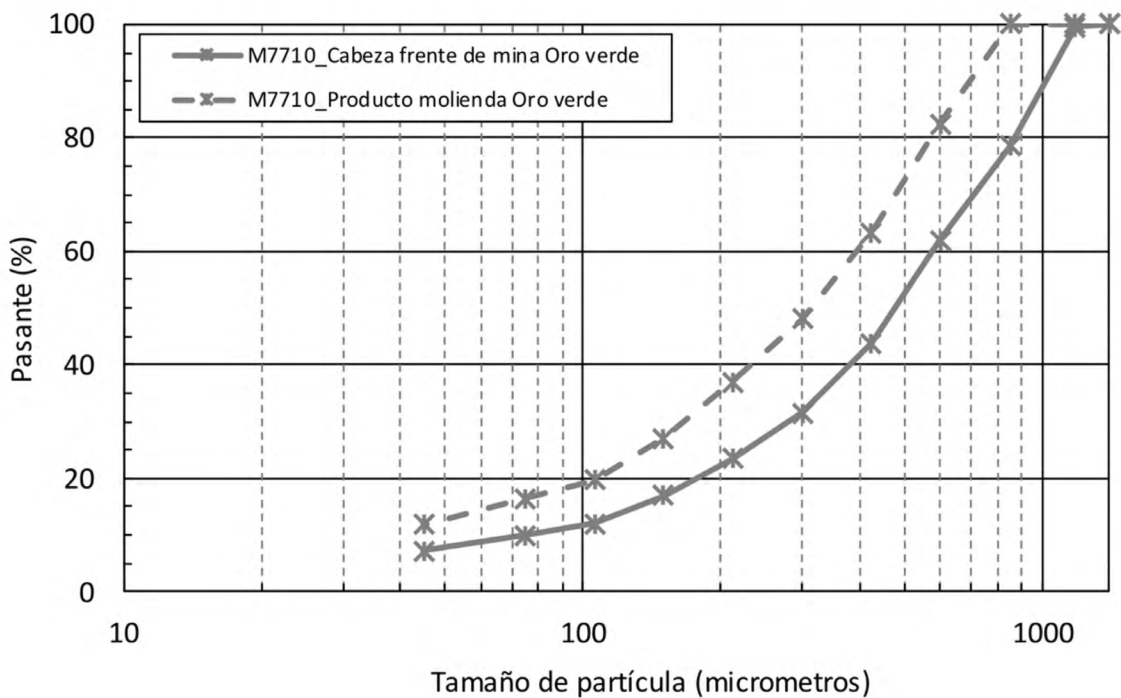
Figura 6.30. Lixiviación de oro por cianuración para las colas de batea planta La Primavera. Fuente: autores.



6.3.2. PLANTA ORO VERDE

Acondicionamiento de la muestra para concentración gravimétrica

Figura 6.31. Distribución de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto de molienda (alimentación de la mesa Wilfley) para la muestra de la mina la Oro verde. Fuente: autores.



Concentración en mesa del mineral de la Mina Oro Verde

Cabeza: Cabeza proceso Oro Verde

Molienda hasta $d_{80} = 600 \mu\text{m}$
 Tiempo de concentración: 7 minutos
 Agua de fluidización: 6.9 L/m

Figura 6.32. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina Oro Verde. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (μg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza	3490,5	100%	41,40	144512,2		
Concentrado	178,8	5,12%	525,40	93941,52	65,01	12,69
Medios	1793,7	51,39%	21	37667,7	26,07	
Colas	1518	43,49%	8,5	12903	8,93	

Refinación en batea

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley Oro Verde
 Molienda hasta $d_{80} = 600 \mu\text{m}$
 Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 6.33. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina Oro Verde. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (μg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza (concentrado de mesa)	178,8	100%	525,33	93928,80		
Concentrado	3,45	1,93%	8928,34	30802,80	32,79%	17
Colas	175,35	98,07%	360	63126,00	67,21%	

Concentración por flotación

Medios y colas de Mesa
 Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley Oro Verde
 Molienda hasta $d_{80} = 75 \mu\text{m}$
 Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos
 Tiempo de espumación: 8 minutos

Figura 6.34. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta Oro Verde. Fuente: autores.

	IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (μg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Medios de mesa	Cabeza	1072	100,00%	21,00	22512,0		
	Concentrado	82	7,65%	255,22	20928,0	92,96%	12,15
	Colas	990	92,35%	1,60	1584,0	7,04%	
Colas de mesa	Cabeza	993,2	100,00%	8,50	8442,2		
	Concentrado	68,2	6,87%	110,77	7554,2	89,48%	13,03
	Colas	925	93,13%	0,96	888,0	10,52%	

Cianuración

Figura 6.35. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta Oro Verde. Fuente: autores.

MUESTRA	CONSUMO DE CIANURO DE SODIO (kg/t)	CONSUMO DE HIDRÓXIDO DE CALCIO (kg/t)	TIEMPO DE CIANURACIÓN Y RECUPERACIÓN DE ORO (HORAS)	TAMAÑO DE PARTÍCULA d_{80} (μm)
Concentrados de flotación	5,95	2,18	6	75
Colas de batea	10,00	1,95	2	75

Figura 6.36. Lixiviación de oro por cianuración para los concentrados de flotación planta Oro Verde. Fuente: autores.

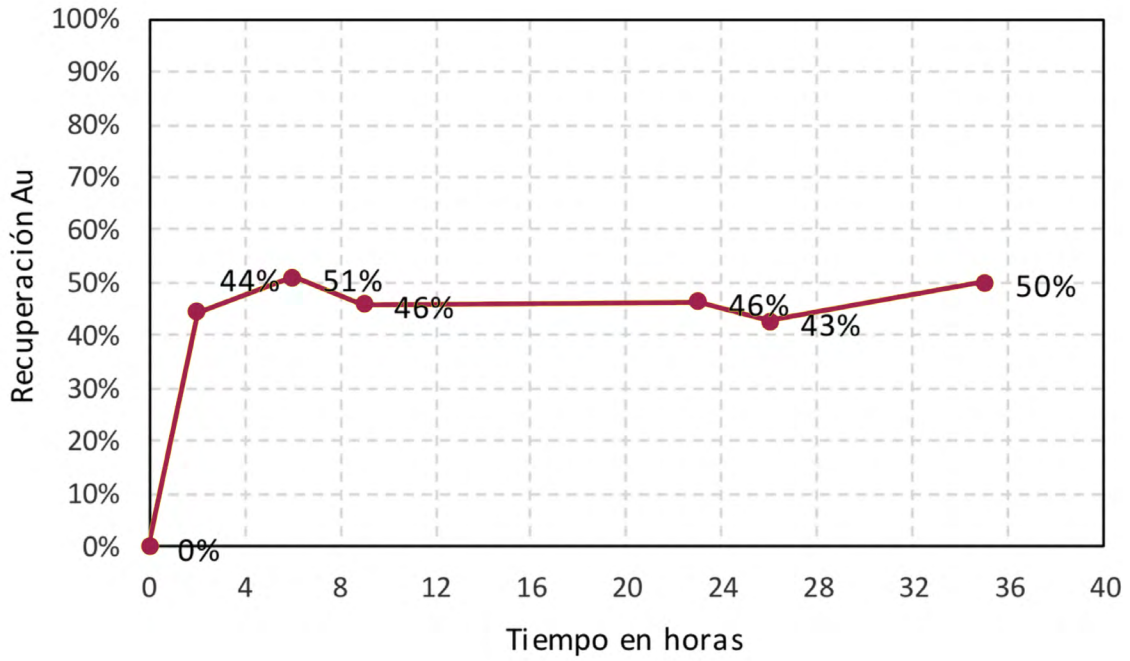


Figura 6.37. Lixiviación de oro por cianuración para las colas de batea planta Oro Verde. Fuente: autores.

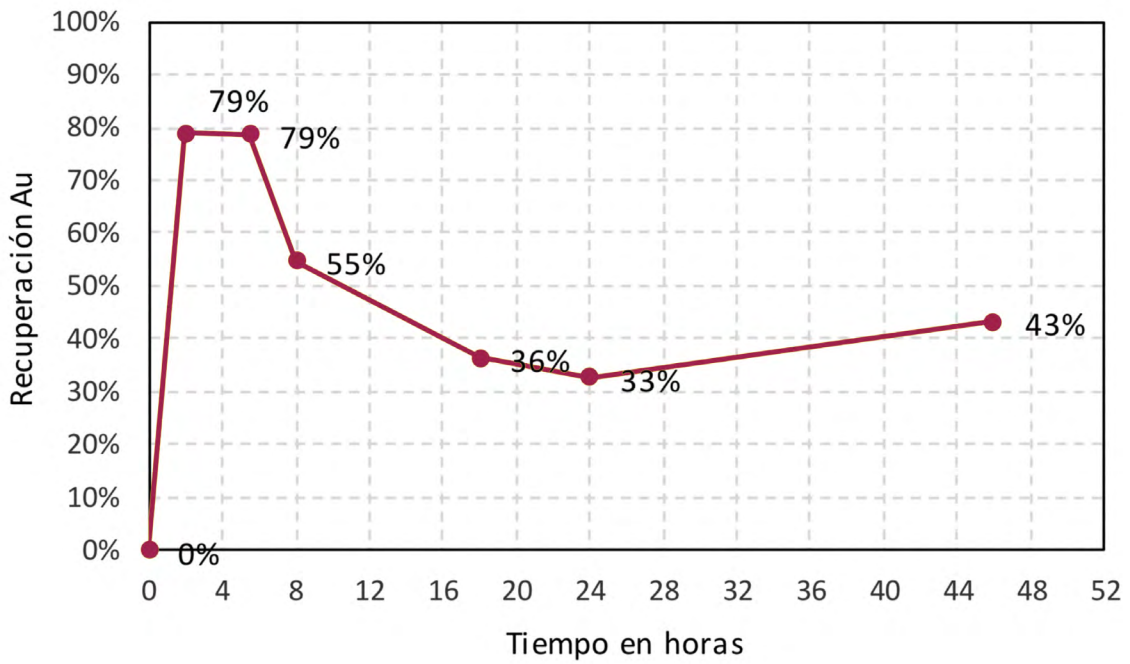


Figura 6.38. Tenores de oro en las plantas visitadas. Fuente: autores.

MUESTRA	TENOR ORO (g/t)	TENOR PLATA (g/t)
Planta Oro Verde		
Concentrado de mesa oro verde 2	4,65	<5
Colas de mesa oro verde 2	2,32	<5
Cabeza frente de mina veta oro verde 2	44,14	88,96
Mina El Cristo		
Cabeza el Cristo 1	0,58	62,85
Planta Pisones		
Cabeza trituradora de martillos Los Pisones	22,75	79,3
Arenas cocos Hg Los Pisones	10,6	10
Remuele cocos Hg Los Pisones	37,9	29
Colas cocos Hg Los Pisones	6,61	11
Planta El Limón		
Cabeza molino El Limón	1,35	11,78
Colas de cianuración filtro de banda el Limón	0,71	<5
Colas de flotación patio de relaves El Limón	0,44	<5
Colas de cianuración patio de relaves El Limón	0,29	<5
Grueso del tromel molienda 1 El Limón	1,62	9
Planta La Primavera		
Cabeza molino 1 La Primavera	4	16
Colas mesa 1 La Primavera	1,12	<5
Producto molino 1 La Primavera	1,52	25
Colas mesa 2 La Primavera	0,69	13
Concentrado mesa 1 La Primavera	43,1	38
Concentrado mesa 2 La Primavera	26,6	35
Colas cocos Hg La Primavera	8,4	8
Planta Mineros		
Cabeza molino Mineros	3,68	23,9
Colas de Flotación Mineros	0,36	12
Colas de cianuración Mineros	1,97	12
Planta La Gallineta		
Cabeza de Planta La Gallineta	2,32	14
Relave canalón cola proceso La Gallineta	0,84	<5
Mina La Silva		
Veta La Silva	1,39	24

6.4. CONSIDERACIONES MINERALÓGICAS EN EL PROCESO METALÚRGICO

- Los análisis mineralógicos de la muestra de cabeza de proceso de la mina Oro Verde indican que cerca del 80 % de la mena corresponde a ganga de cuarzo de la mena y de fragmentos líticos derivados de la roca encajante, una proporción baja de sulfuros inferior al 7 % y el resto en carbonatos, esto facilitaría un proceso de cianuración y la neutralización en las pilas de relave.
- La cabeza de proceso de la planta de beneficio de Oro Verde en la liberación de minerales metálicos indica que el 80 % de estos minerales se encuentran libres, por debajo de un tamaño de 1,18 mm. Para la planta de beneficio de La Primavera, en este mismo tamaño de partícula, se tiene el 86 % de los minerales metálicos libres; el restante se encuentra asociado o incluido.

Presencia de minerales cianicidas, minerales consumidores de oxígeno y de minerales generadores de acidez.

- Las condiciones mineralógicas arrojan que no hay inconveniente para la cianuración. Relativamente no hay minerales cianicidas ni consumidores de oxígeno en proporciones importantes.

Grado de liberación de los minerales metálicos

- En la mina La Primavera el tamaño de partícula para una liberación superior al 80 % fue de 425 μm y a 75 μm sería del 95% de partículas metálicas libres.
- Para la mina Oro Verde y Los Pisones, el tamaño de partícula para una liberación superior al 90% fue de 600 μm (ver Gráfico XXXX cap 4) y a 75 μm sería el 98 % de partículas metálicas libres.
- Por debajo de 1,4 mm de tamaño de partícula, se determinó que en las minas El Cristo y El Limón se encuentra más del 90 % de los minerales metálicos en estado libre. Por otro lado, la mina La Ye tiene un d80 de 150 μm y en un tamaño menor a los 75 μm solo se obtiene en el 85 % libre.

Grado de liberación de oro

Competencia del material

- De las características físicas y mineralógicas (competencia) se evidencia que las cabezas de procesos de las plantas de beneficio del municipio de Zaragoza tienen un porcentaje de composición mineralógica mayor al 70 % compuesto por ganga, lo que indica que son materiales que consumen energía considerable a la hora de triturarlos y molerlos. Cabe resaltar que el material de la liberación de minerales metálicos no necesita ser molido a tan bajo tamaño, ya que los minerales metálicos son liberados a rangos de tamaños entre 600 y 425 μm .

7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

Aunque es bien sabido que el oro es uno de los metales más atractivos y de gran valor comercial, es un metal al que en determinados círculos, se le atribuyen descripciones negativas debido a que los procesos de beneficio deben afrontar el tratamiento de enormes sustancias químicas tóxicas que pueden acumularse, generando grandes cantidades de desechos difíciles de controlar.

Por ejemplo, la minería que usa la amalgamación, así como los modelos rudimentarios faltos de personal competente y comprometido con el medio ambiente, dejan en evidencia marcados impactos medioambientales tanto en zonas rurales como urbanas del municipio de Zaragoza. Esto ocurre debido a que el modelo extractivo genera vertimientos sobre las fuentes hídricas, permitiendo la movilidad no solo de mercurio sino también otro tipo de contaminantes químicos que son perjudiciales para la naturaleza y ponen en riesgo los ecosistemas. De ahí las estrictas normas y regulaciones ambientales enfocadas a la prevención y cuidado, no solo del medio ambiente, sino también de la salud pública, por lo que se debe orientar a la comunidad minera el desarrollo de modelos de extracción alternativos en el municipio de Zaragoza.

Dicho objetivo se puede lograr partiendo de información actual sobre el impacto directo e indirecto de los procesos extractivos en el municipio, así como de las características fisicoquímicas del suelo, subsuelo, sedimentos activos de quebradas, y aguas superficiales, propias de la zona, tales como composición elemental, pH, potencial de acidez y contenido de metales pesados, entre otras. A partir de estas características es posible aplicar metodologías y procesos más favorables, de modo que se logre controlar el vertimiento de sustancias tóxicas de origen antropogénico y geogénico.

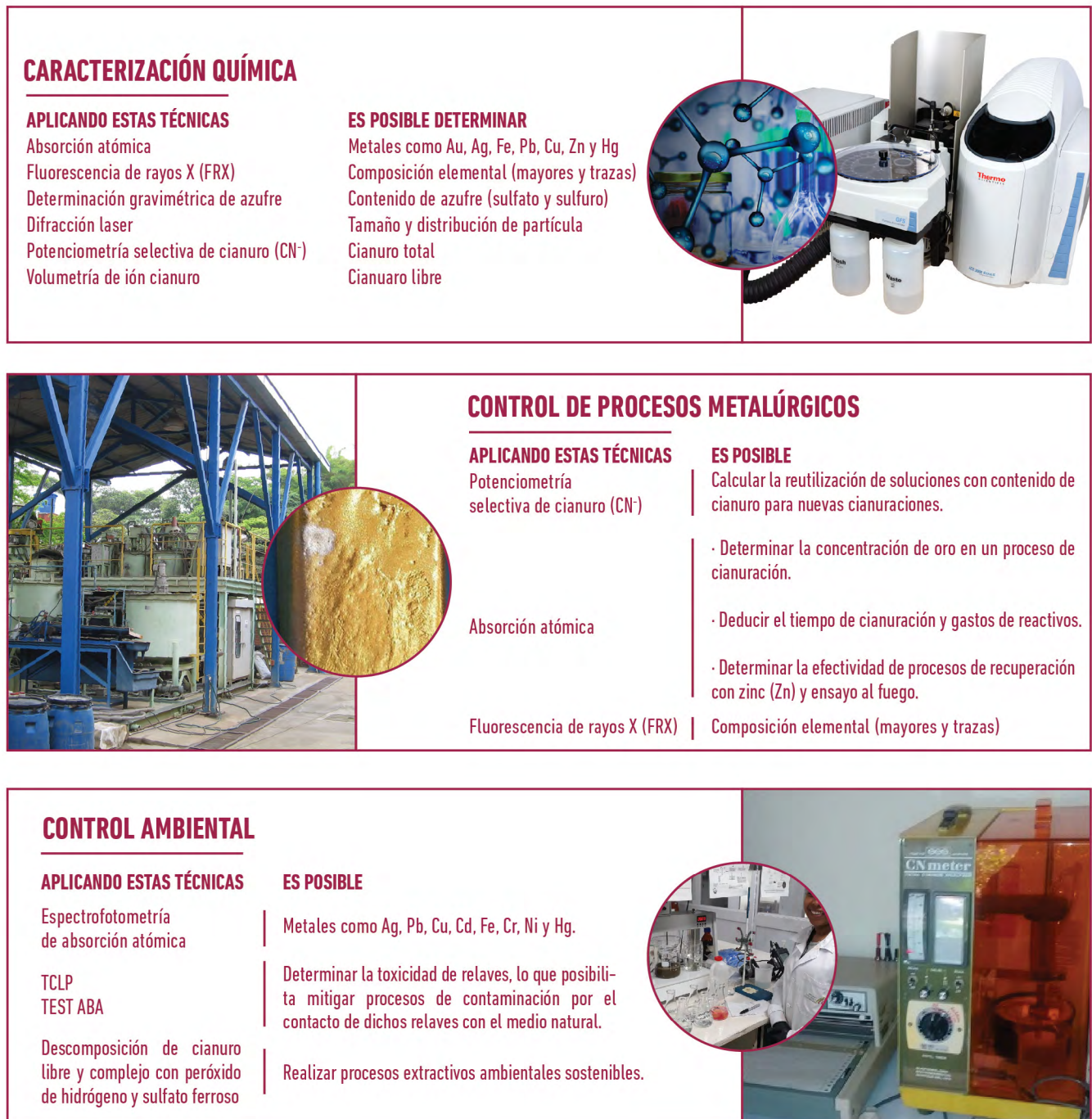
Panorámica de la quebrada San Pedro, cercana a la planta de beneficio de Minereros (La Ye), municipio de Zaragoza (Antioquia).. Fotografía tomada por Oscar González, Servicio Geológico Colombiano



7.1. CONTRIBUCIÓN QUÍMICA A LA CARACTERIZACIÓN, CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS Y AMBIENTALES

A partir de los análisis químicos de los materiales de mina, planta de beneficio y relaves es posible obtener la siguiente información:

Figura 7.1. Diagrama de contribución química y ambiental. Fuente: autores.



El reconocimiento de la importancia de los recursos ambientales, precisamente, permite evaluar la dimensión del impacto que genera la actividad minera en su entorno y el manejo inadecuado de este. Esto deriva en la necesidad de realizar una estructura particular de estudios químicos y ambientales que, con los aportes metalúrgicos y geológicos, permitan identificar si los efectos producidos por agentes contaminantes pueden ser atribuidos a las actividades mineras de beneficio o a la naturaleza de la formación geológica de los depósitos.

Fotografía 7.1. Panorámica del patio de colas de cianuración en la planta de beneficio El Limón. Fuente: autores.



7.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MÉTODOS Y APLICACIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

7.2.1. CONTAMINACIÓN POR MERCURIO

El mercurio, por ser líquido a temperatura ambiente y por tener una presión de vapor baja, tiene una movilidad significativa en el aire. Su valor de solubilidad en agua, entre de 0,02 mg/L a 25 °C, indica que es de mediana movilidad en el agua, y su valor $\log K_{ow}$ 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 no solo acumularlo, sino biomagnificarlo en su organismo.

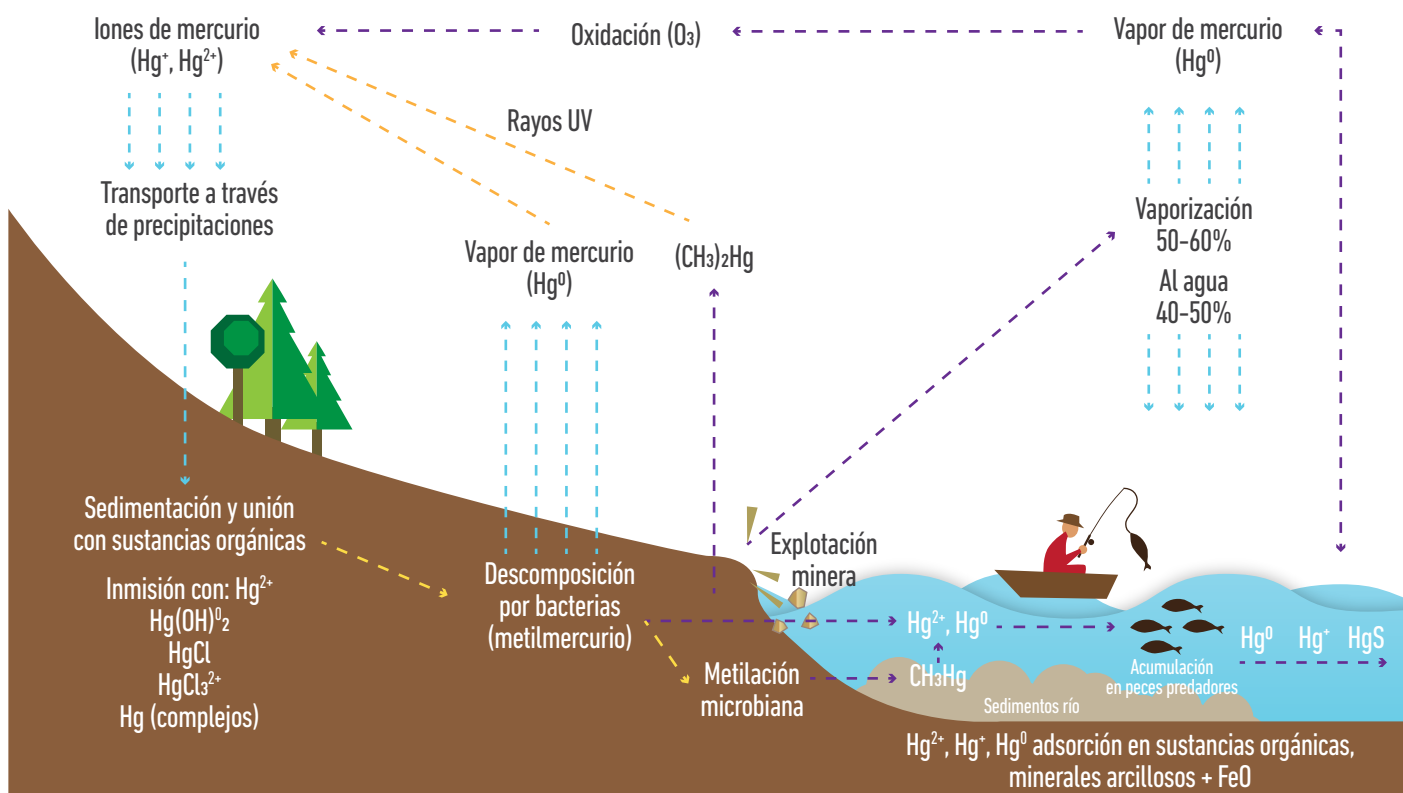
El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental (Hg_0), las de tipo inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}) y las orgánicas. El metilmercurio ($HgCH_3$) y el dimetilmercurio ($Hg(CH_3)_2$) son las formas orgánicas más tóxicas que afectan el sistema inmunológico, alteran los sistemas genéticos y enzimáticos, a la par que dañan el sistema nervioso, incluyendo la coordinación y los sentidos del tacto, el gusto y la vista.

Las principales manifestaciones de intoxicación con mercurio en el organismo humano son los daños al sistema nervioso, daños cerebrales, daño al ADN y a los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza, defectos de nacimiento y abortos.

El mercurio en estado cero es móvil en el ambiente debido a que es ligeramente soluble en el agua (56 µg/L); por lo tanto, la disposición de colas de procesos de amalgamación puede contaminar las aguas subterráneas y las fuentes superficiales. No todos los acuíferos resultan 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 de proceso se lixivió y contaminó las aguas subterráneas, donde alcanzó concentraciones de hasta 15 µg/L (Foucher et al., 2012).

Otro riesgo es la práctica de cianuración de arenas previamente usadas en amalgamación: 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 de cianuro-mercurio (usualmente en forma Hg^{+2}), incrementa la concentración de mercurio en las aguas subterráneas (Coles y Cochrane, 2006).

Figura 7.2. Diagrama de ciclo del mercurio (Hg). Fuente: autores.

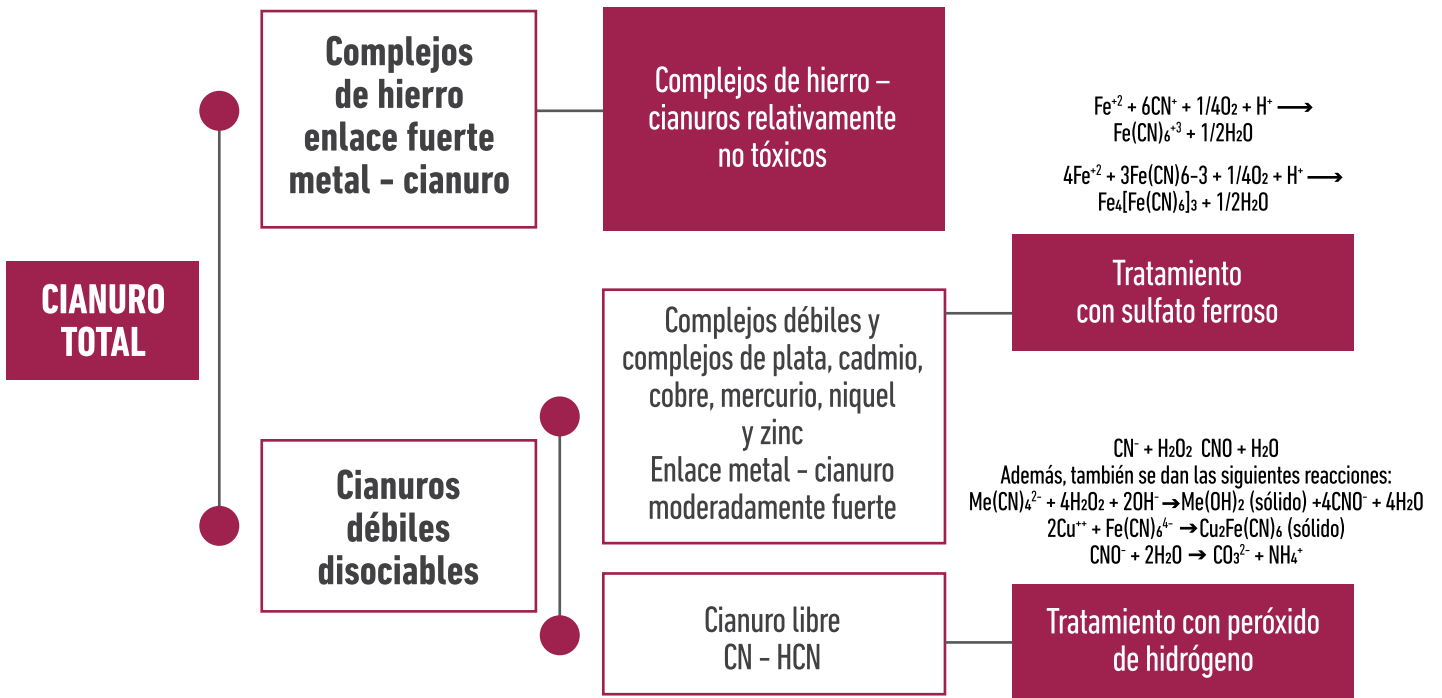


La Ley 1658 de 2013 desarrolla el marco legal “por medio del cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones”. Los ministerios 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)

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 para 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 las tecnologías limpias en los procesos de beneficio de oro y demás procesos industriales y productivos asociados que requieren la utilización.

7.2.2. CIANURO EN MINERÍA

Figura 7.3. Clasificación de los compuestos de cianuro en la minería de oro y el tratamiento de descomposición aplicado. Fuente: autores.

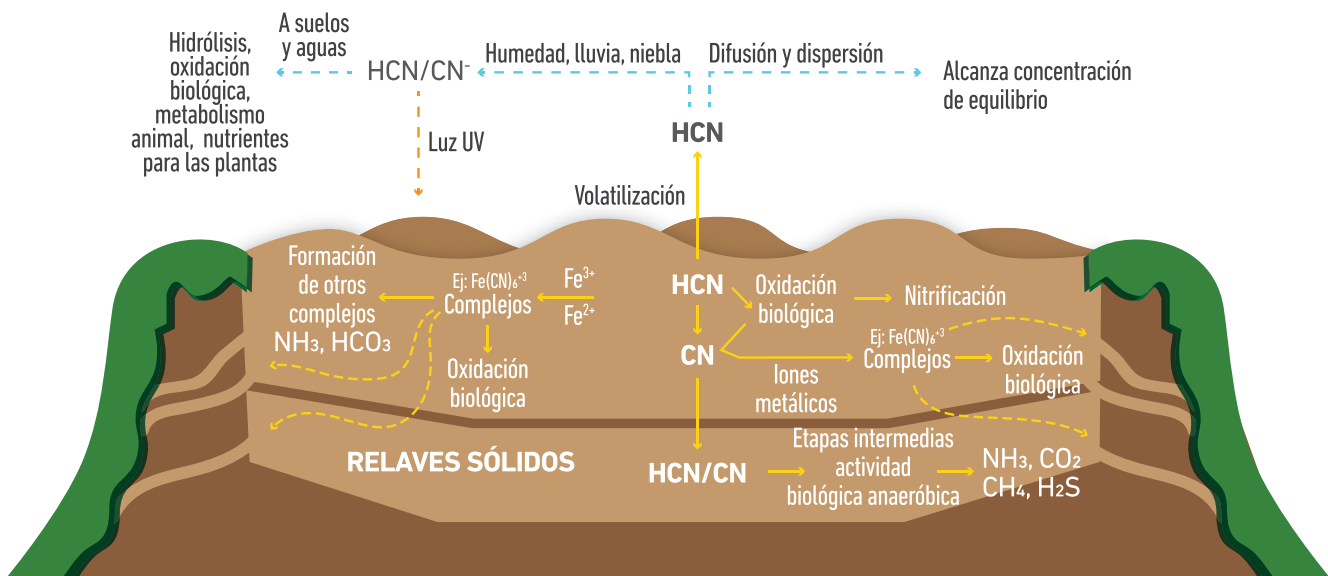


Los compuestos de cianuro presentes en la minería del oro y en las soluciones y efluentes de cianuración comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino-térreos, así como complejos de cianuros metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre, níquel, hierro y cobalto, elementos que componen los minerales procesados para obtener el oro. Los compuestos de cianuro que se forman en un proceso de cianuración se pueden observar en la figura 7.3.

7.2.2.1. DINAMICA DEL CIANURO EN UN RELAVE DE RESIDUO MINERO

Debido a las muchas reacciones y transformaciones que experimenta naturalmente, el cianuro no persiste en el ambiente. Los procesos de descomposición y transformación del cianuro son muy efectivos para reducir las concentraciones de cianuro tanto en el agua del estanque de decantación como en los propios relaves.

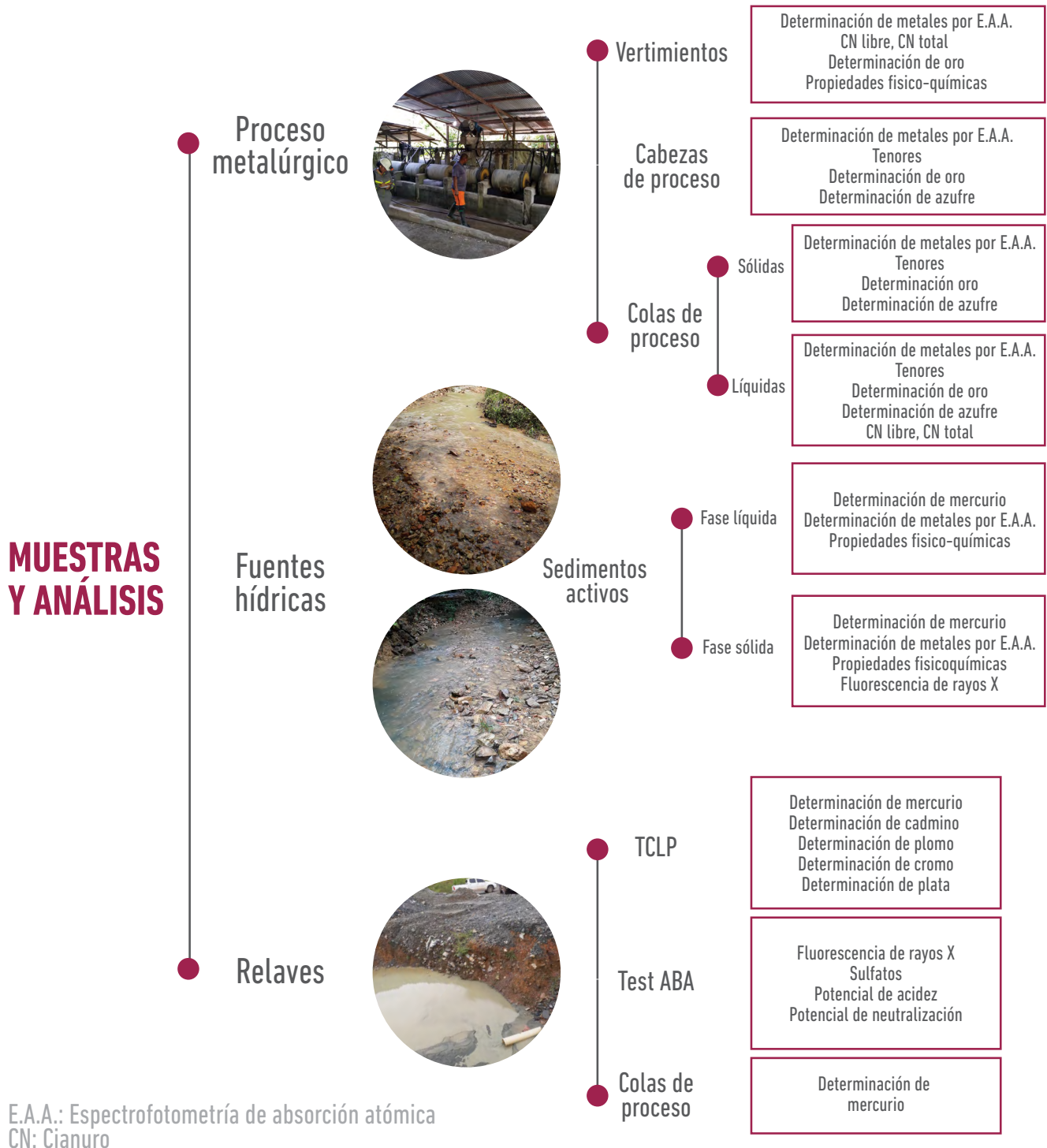
Figura 7.4. Reacciones bioquímicas del cianuro en un material residual de la cianuración. Fuente: Modificado Cáceres, 2001.



Estudios han realizado perforaciones para investigar los niveles de cianuro en profundidad dentro de las áreas de almacenamiento de relaves. También han realizado un muestreo lateral en el almacenamiento de relaves para determinar cómo varían las concentraciones de cianuro desde el punto de depósito. Dependiendo de la profundidad y el tiempo de acumulado de los relaves, el cianuro dentro del agua de poro de los relaves puede sufrir muchas transformaciones.

La perforación muestra que la concentración de cianuro disminuye significativamente con la profundidad, debido a los procesos de descomposición y transformación. En los 4 a 6 m superiores de un estanque de relaves activo, el cianuro libre se descompone rápidamente.

Figura 7.5. Diagrama de flujo para toma de muestras y análisis químico-ambiental. Fuente: autores.



Sin embargo, por debajo de esa profundidad, el cianuro WAD restante está presente principalmente como complejos de cianuro de cobre. Los procesos de transformación convierten el cianuro de cobre en la forma no tóxica de cianuro de hierro y CuCN insoluble. El cianuro de hierro es un complejo muy estable.

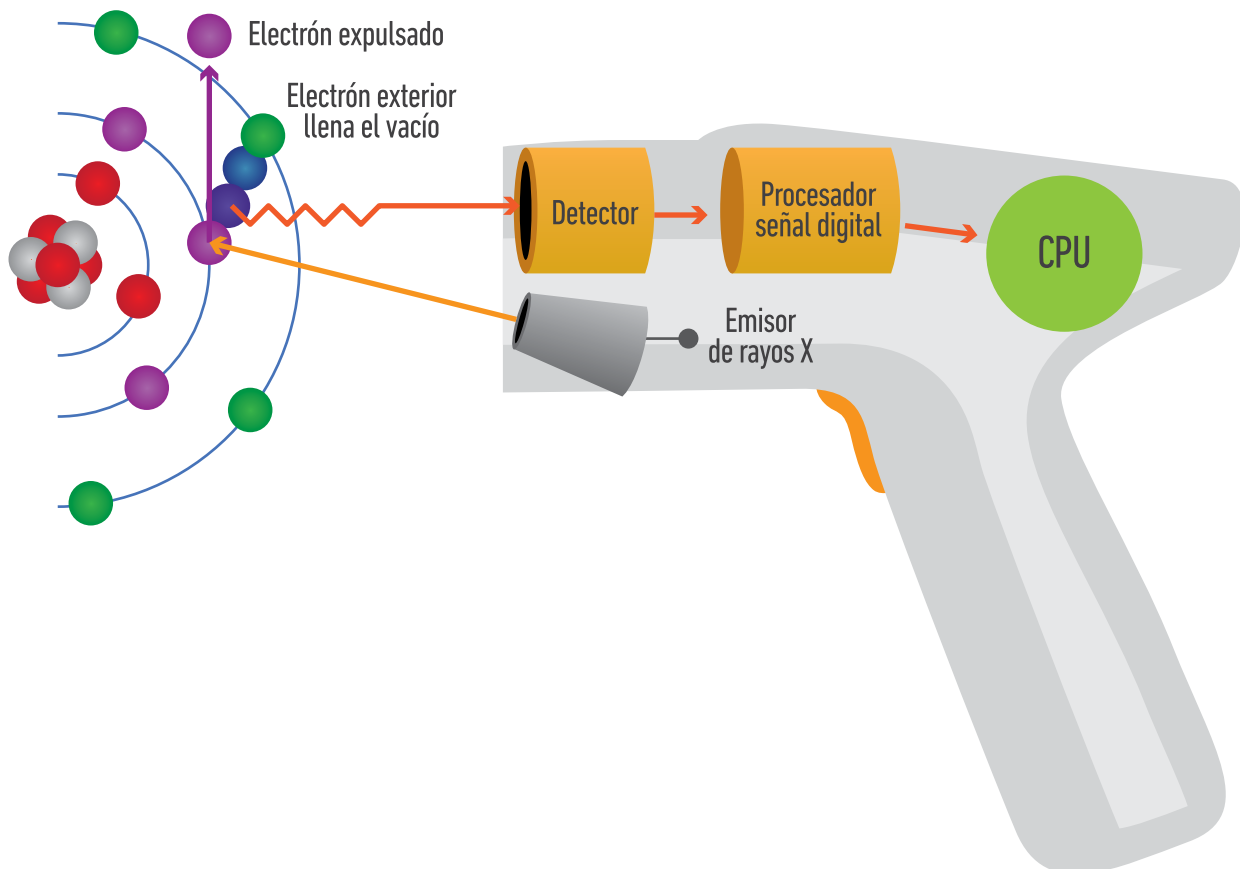
El ciclo de la figura 7.4. se presenta un esquema simplificado del ciclo del cianuro mostrando las diversas especies que se forman a partir del cianuro libre en tanques de relaves.

7.2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AMBIENTAL

Diferentes técnicas analíticas, instrumentales y gravimétricas, como la fluorescencia de rayos X (FRX), espectrofotometría de absorción atómica (EAA), potenciometría (ion CN), determinación de azufre por gravimetría y pruebas ambientales de TCLP (lixiviación característica de toxicidad) y Test ABA se aplican a la caracterización de la composición físico-química de muestras representativas de las etapas de procesamiento de minerales que inciden en el equilibrio del medio ambiente. Para ello se hace una comparación de las muestras tomadas antes y después de dichos procesos. Los tipos de muestras recolectadas son relaves, sedimentos, rocas y vertimientos, a las que se les aplica, como estudio prioritario, la cuantificación y movilidad de mercurio, por ser un metal pesado de alta toxicidad.

Además, el análisis químico se interrelaciona con el marco geológico para obtener información útil para determinar la composición elemental de los minerales formadores de roca encajante y los minerales de mena que componen las unidades geológicas presentes en la zona estudiada. A su vez, se correlaciona con el marco metalúrgico para generar información técnica que permita el seguimiento analítico de las diferentes pruebas realizadas, en el control de unidades metalúrgicas para desarrollar procesos de beneficio más eficientes. Como información base para la aplicación y el desarrollo de las metodologías químicas y ambientales enfocadas en cada zona estudiada, se estructuró un diagrama de flujo que contiene específicamente los análisis realizados a las plantas y fuentes hídricas visitadas

Figura 7.6. Fluorescencia de rayos X. Fuente: modificado Thermo, 2015.



7.2.3.1. APLICACIÓN DE LA ESPECTROMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Es una técnica no destructiva que emplea una cantidad pequeña de muestra sólida (suelos, sedimentos activos, rocas, arenas, metales, entre otros), lo que permite determinar el contenido de varios elementos en una misma lectura. Genera una especie de mapa de la composición química del material en fase sólida. La espectrometría de FRX tiene su fundamento en la interacción existente entre los rayos X y la materia, específicamente debida a la respuesta de un material que luego de ser irradiado y excitado por rayos X se reordena emitiendo una radiación llamada FRX, que aporta información del contenido de elementos en cada una de las muestras analizadas (Skoog, Holler y Nieman, 2001) (figura 7.6.).

Las muestras sólidas pueden ser rocas, sedimentos activos, relaves, cabezas de proceso, productos intermedios y material de rechazo, de tal modo que en el momento del análisis dichas muestras deben estar pulverizadas (por debajo de los 75 micrones) para adicionar de 2 a 5 g y depositarlas en un portamuestras. Posteriormente se realiza el análisis haciendo uso del equipo de FRX. Existen dos formas de realizar el análisis: en modo minería, en caso de que se deseen determinar elementos que se encuentren mayoritariamente, por lo general por encima del 1% másico, y en modo suelos, para analizar trazas o elementos minoritarios en partes por millón.

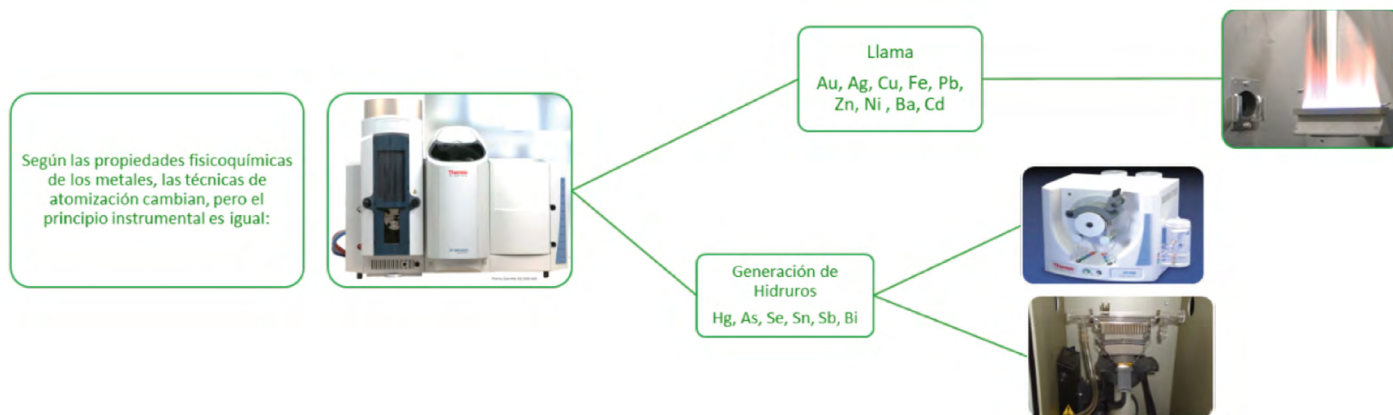
7.2.3.2. APLICACIÓN DE LA ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Para realizar la determinación de metales (Au, Cu, Zn, Ag, Cr, Pb, Cd, etc.) por absorción atómica de llama es necesario tener las muestras 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 realizar el tratamiento previo de las muestras; 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 este análisis se realiza en ausencia de llama, debido a la fácil volatilidad del elemento cuantificado. Esta metodología se denomina absorción atómica-generación de hidruros.

Generalmente, las muestras provienen de diversos orígenes; 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.

Figura 7.7. Técnica de EAA. Fuente: modificado Thermo, 2015.



La siguiente ecuación engloba la reacción de la cianuración y el compuesto de oro en matriz líquida proveniente de procesos de control metalúrgicos, que es cuantificado por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica:



7.2.3.3. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA ESPECTROFOTOMETRÍA DE ULTRAVIOLETA VISIBLE

El principio de la espectrofotometría ultravioleta visible involucra la absorción de radiación ultravioleta visible por una molécula, lo cual causa la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, con la liberación del exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda (λ) comprende entre 160 y 800 nm.

Método colorimétrico para la determinación de oro en campo (púrpura de Cassius)

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 la determinación de microcantidades de oro en soluciones cianuradas se realiza la precipitación con zinc para eliminar interferencias. Esta precipitación se realiza con soluciones cianuradas que contengan una concentración de cianuro mayor que o igual a 1 g/L, y cuyos valores de pH sean mayores de once 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.

7.2.3.4. APLICACIÓN DE LA POTENCIOMETRÍA DE 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. El procedimiento 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 M), 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 abarca desde 5 ppb a 260 ppm. Puede ser aplicado en análisis de aguas residuales, aguas procedentes de procesos metalúrgicos y actividad minera. El equipo utilizado en esta metodología es el cianurómetro.

Figura 7.8. Proceso de titulación de cianuro libre y cianurometro utilizado en el laboratorio del SGC sede Cali. Fuente: autores.

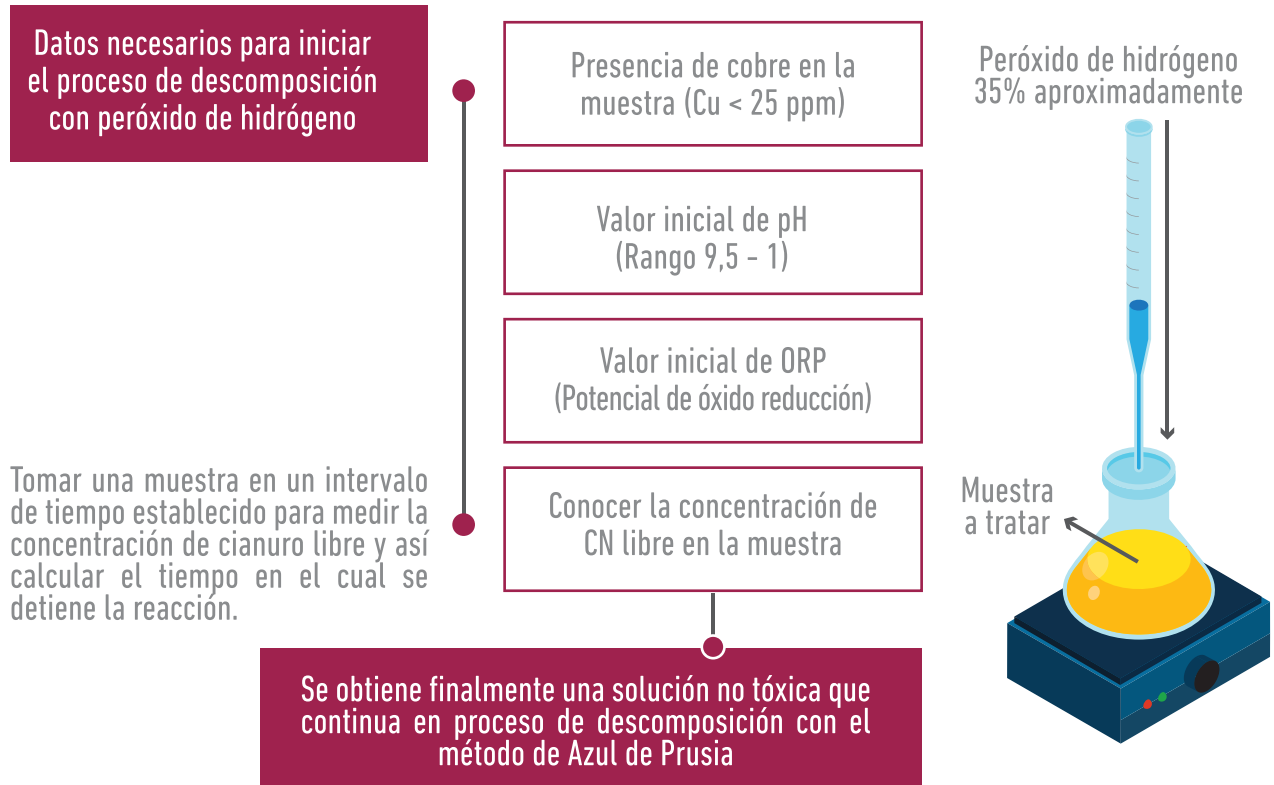


7.2.3.5. TRATAMIENTOS DE DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO

De acuerdo con lo expuesto, existen dos formas principales de cianuro: libre y compleja. 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 con el cálculo de reacción. La figura 7.9. evidencian los parámetros físico-químicos que se deben tener en cuenta en el proceso y los equipos que se requieren.

Método para descomponer el cianuro complejo presente en la solución pobre

Figura 7.9. Tratamiento método peróxido de hidrógeno - descomposición cianuro libre. Fuente: autores.



CÁLCULO PARA DOSIFICACIÓN DE PERÓXIDO

- Concentración de cianuro libre, mediante la titulación con nitrato de plata
- Tomar el volumen (mL) de muestra a tratar para escalar en litro en planta
- Conocer la concentración y la densidad del peróxido de hidrógeno (H₂O₂)

Por medio de la ficha técnica o titulación con permanganato de potasio y ácido sulfúrico

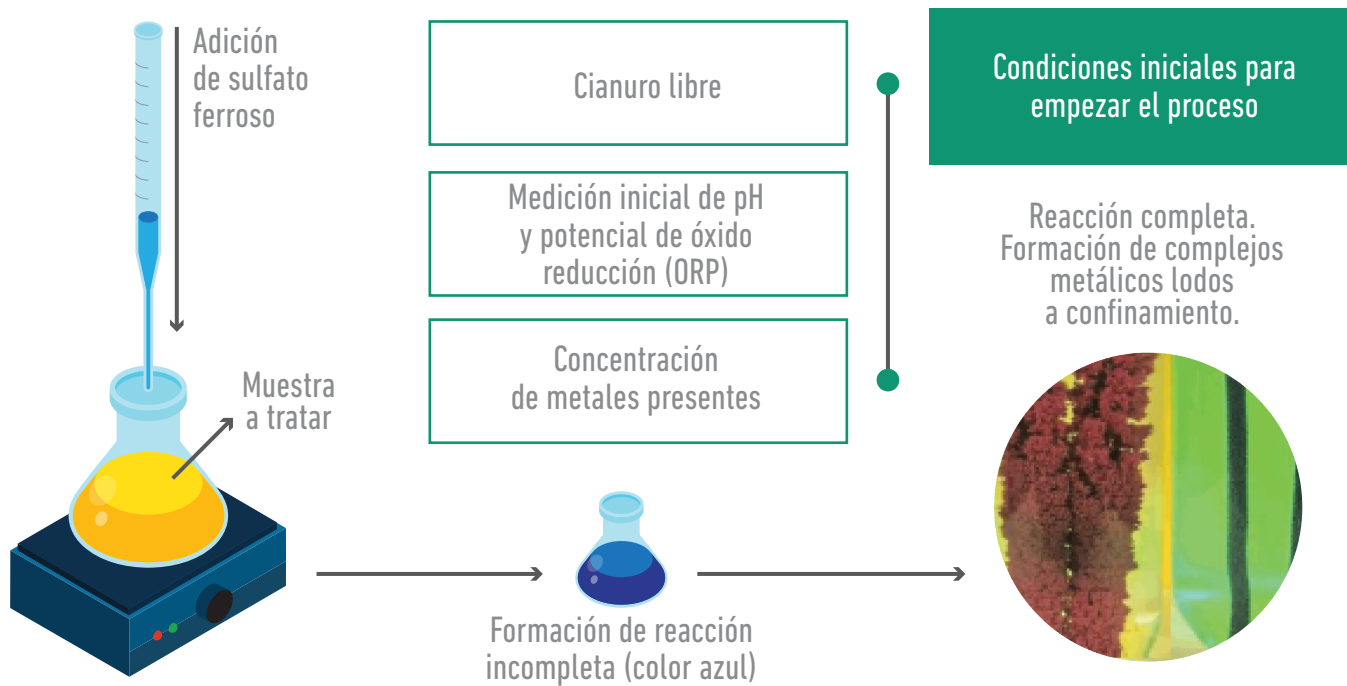
- $$\text{g/L NaCN libre} = \frac{(10 \frac{\text{mg NaCN}}{\text{mL AgNO}_3}) * (\text{volumen (mL) AgNO}_3)}{\text{volumen (mL) de muestra a tratar}}$$

Varía dependiendo de la concentración, para este caso es de 0.1 molar
- $$\left(\frac{0.1 \text{ mol AgNO}_3}{\text{L}} \right) * 1 \times 10^{-3} = 1 \times 10^{-4} \text{ mol AgNO}_3 * \left(\frac{1 \text{ mol Ag}^+}{1 \text{ mol AgNO}_3} \right) * \left(\frac{2 \text{ mol CN}^-}{1 \text{ mol Ag}^+} \right) * \left(\frac{1 \text{ mol NaCN}^-}{1 \text{ mol CN}^-} \right) * \left(\frac{49.01 \text{ g NaCN}^-}{1 \text{ mol NaCN}^-} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right) = \text{g } \frac{\text{CN}^-}{\text{L}}$$
- $$\frac{\text{Xg CN}^-}{\text{L}} = \left(\text{X } \frac{\text{g NaCN}^-}{\text{L}} \text{ libre de muestra a tratar} \right) * \left(0.53 \frac{\text{g CN}^-}{\text{g NaCN}^-} \right)$$
- Fórmula para el consumo de peróxido de hidrógeno, relación 5 a 8 veces para poder escalar la cantidad de H₂O₂ en planta:**

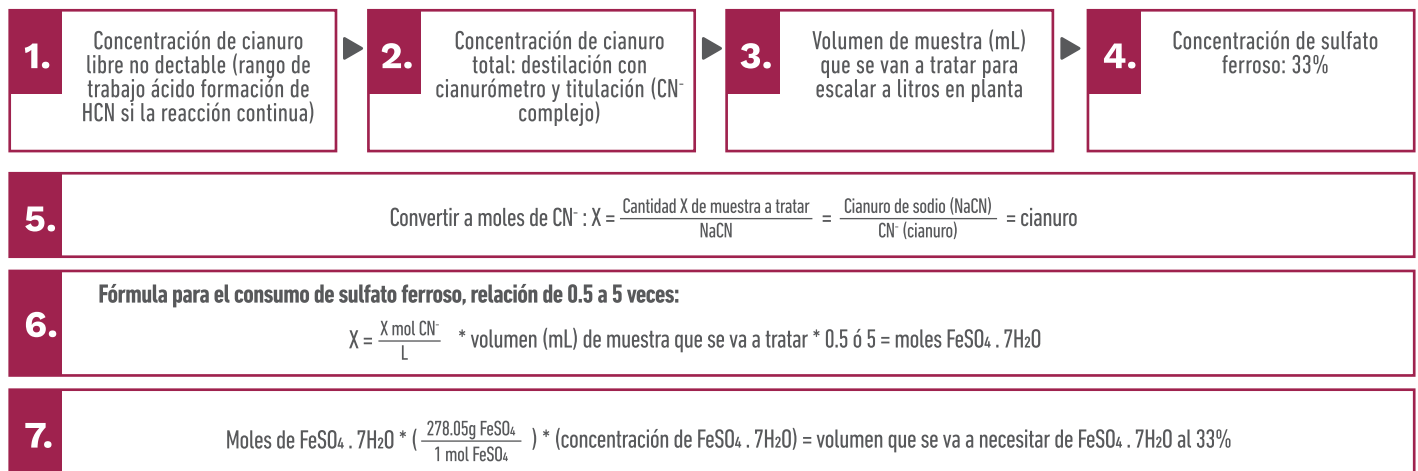
$$\text{X mL H}_2\text{O}_2 \text{ para descomposición de CN}^- = \left(\frac{\text{Xg CN}^-}{\text{L}} \right) * \left(1.45 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \right) * 5 \text{ ó } 8 \text{ X mL H}_2\text{O}_2 = \left(\frac{\text{Xg CN}^-}{\text{L}} \right) * \left(1.45 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \right)$$

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 (figura 7.10.). El material (lodo) producto de este proceso es llevado a confinamiento.

Figura 7.10. Diagrama de descomposición de cianuro complejo mediante el método azul de Prusia. Fuente: autores.

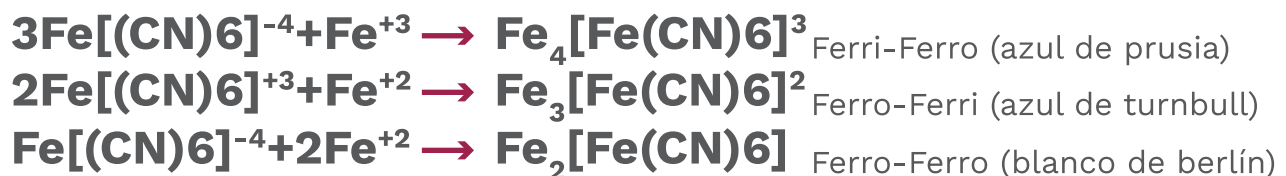


CÁLCULO PARA DOSIFICACIÓN DE PERÓXIDO



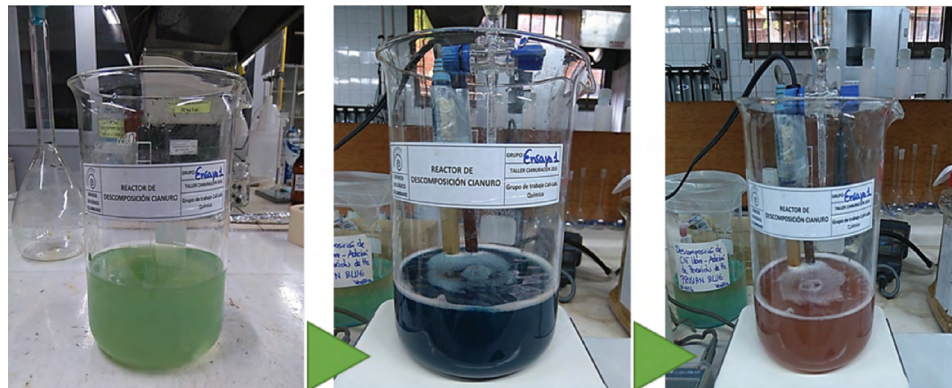
7.2.3.6. ENSAYO EN LABORATORIO DE LA DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO LIBRE Y COMPLEJO A FORMAS ESTABLES

La concentración de Cianuro total puede disminuir en el transcurso del tiempo y llegar al valor mínimo o no detectable. Los colores producidos con estas reacciones son azul, verde y marrón (figura 7.11.), típicos de la precipitación de cianuro. El exceso de hierro a pH ácido promueve la formación de las siguientes sales complejas y muy estables:



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

Figura 7.11. Característica física (color) de las etapas de la descomposición de cianuro libre y complejo. Fuente: autores.



7.2.3.7. PRUEBAS AMBIENTALES PARA RELAVES

Prueba de toxicidad TCLP (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 que se aplican a residuos de beneficio de minerales auríferos, junto con las pruebas de reactividad de cianuros y sulfuros.

Balance ácido base (Test ABA) para la predicción del drenaje ácido de minas (DAM)

El drenaje ácido de rocas o de minas (DAM) es un proceso natural producto de la oxidación atmosférica (por ejemplo, por la acción del agua, oxígeno y dióxido de carbono) de los minerales de sulfuro de hierro, pirita y pirrotita en la presencia de oxígeno, agua y bacterias como la *Thiobacillus ferrooxidans*. La exposición de minerales sulfurados al ambiente ocurre cuando se hace apertura de túneles, remoción de material estéril de una mina y disposición de residuos producto del proceso de beneficio del mineral de interés (Leal, 2015).

Los minerales, al entrar en contacto con el aire, pueden sufrir procesos de oxidación química y lixiviación de metales, metaloides y aniones. Posteriormente, al interactuar el agua del ambiente con los óxidos formados, se produce agua ácida, que contiene iones de metales pesados; estos, al ser arrastrados a fuentes de agua superficial o subterránea, terminan contaminándola. En la figura 7.13 se muestra el proceso de generación de drenaje ácido. Estas reacciones geoquímicas se aceleran en áreas mineras debido a que el aire entra en contacto con mayor facilidad con los sulfuros a través de las labores de acceso y la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos; a ello se une el cambio de composición química y el incremento de la superficie de contacto de las partículas (Aduvire, 2006).

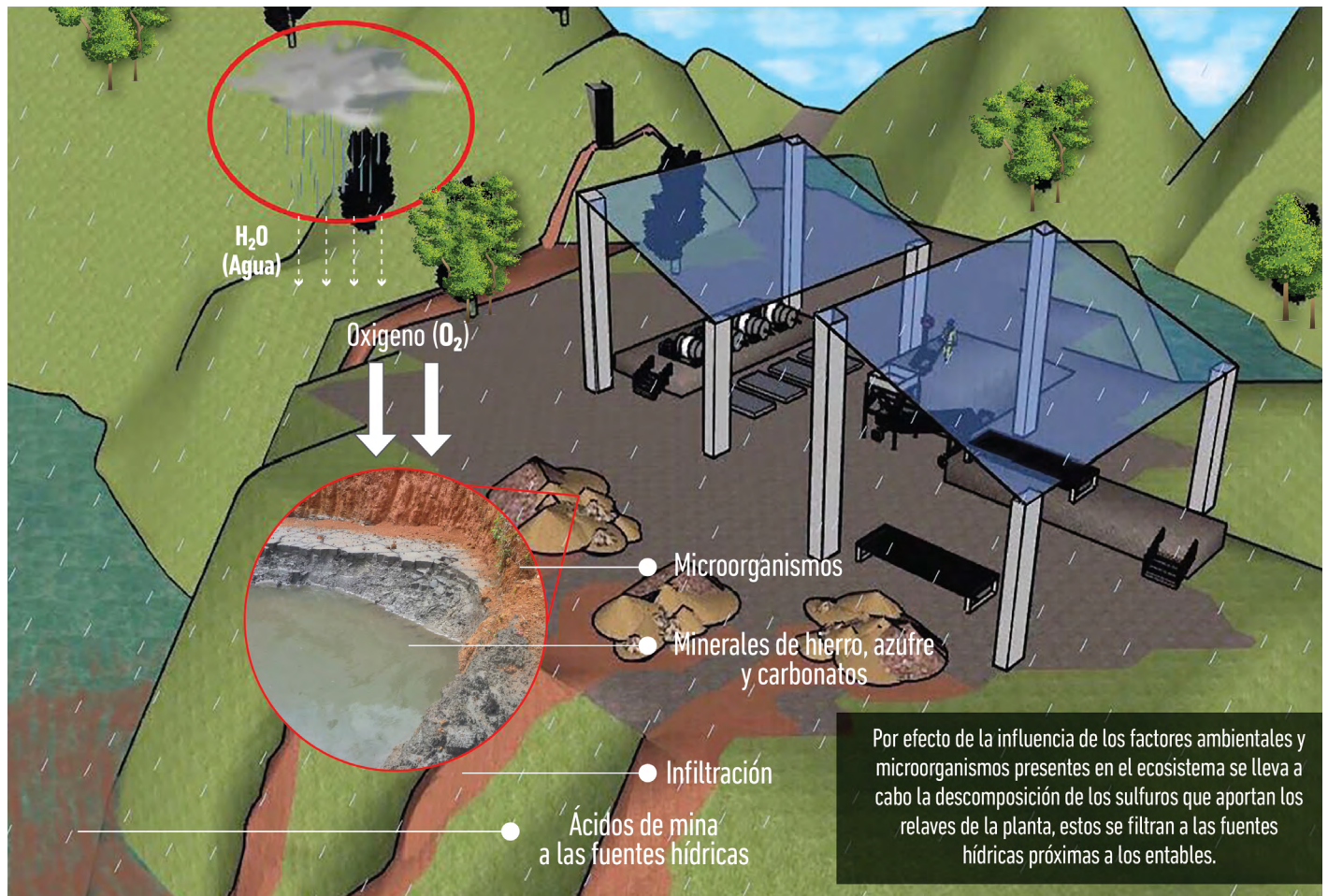
Figura 7.12. Concentraciones máximas permitidas para prueba de TCLP. Fuente: autores.

ELEMENTO	PERMISIBLE EN EL LIXIVIADO* mg/L
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.

La prueba de TCLP clasifica si el residuo es peligroso o no, 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.

Figura 7.13. Proceso de generación de DAM. Fuente: autores.



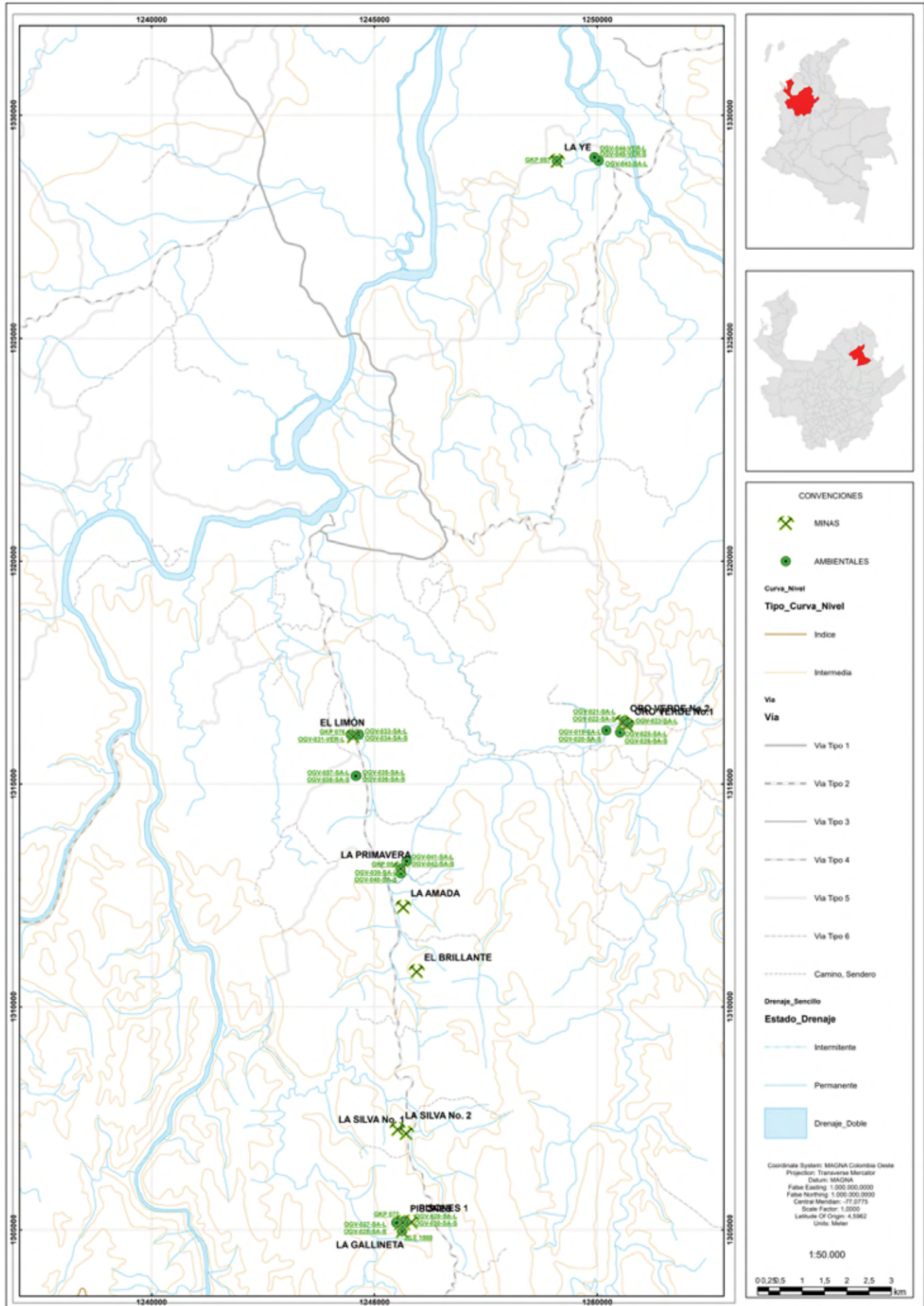
Los DAM, además de un bajo pH contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión, con un alto contenido en sulfato y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni), que son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cursos de agua y pueden llegar a causar daños a las estructuras construidas por el hombre (Çelebi, Öncel y Kobya, 2018). Generalmente, la producción de ácido de un material se mide en función de la presencia de azufre en el mineral.

7.3. PUNTOS DE MUESTREO VISITADOS Y MUESTRAS PUNTUALES ANALIZADAS

En la zona visitada del municipio de Zaragoza, se tomaron cinco puntos de referencia para el estudio ambiental (figura 7.14.).

El primero fue en el sector de los entables Oro Verde 1 y 2, los cuales no presentaban ningún sitio destinado para el almacenamiento de relaves, dejando así que las colas finales de su proceso de beneficio del oro se dirigieran hacia la quebrada aledaña a dicho entable. Se colectaron muestras de agua superficial y sedimentos activos de las quebradas, tanto aguas arriba, como aguas abajo de la actividad minera de los entables (fotografías 7.2 a 7.5).

Figura 7.14. Muestras para estudio químico-ambiental tomadas en el municipio Zaragoza. Fuente: autores.





Fotografía 7.2. Sedimento activo sólido muestreado. Fuente: Autores.



Fotografía 7.3. Entable Oro Verde 1. Fuente: Autores.



Fotografía 7.4. Entable Oro Verde 2 . Fuente: Autores.



Fotografía 7.5. sedimento activo muestreado aguas abajo . Fuente: Autores.

El segundo punto de referencia fue el entable Los Pisones, donde se muestreó agua superficial y sedimentos activos aguas arriba y aguas abajo de la actividad de beneficio de oro en el entable. También se colectó muestra de colas de proceso (relave) (fotografías 7.6. a 7.8.).



Fotografía 7.6. Quebrada Pisones aguas arriba. Fuente: Autores.



Fotografía 7.7. Entable Pisones junto a la quebrada. Fuente: Autores.



Fotografía 7.8. quebrada Pisones aguas abajo del entable y tanques de almacenamiento de colas. Fuente: Autores.

El tercer punto fue en la planta El Limón, donde se muestrearon relaves de las colas de cianuración, así como sedimento activo y agua superficial de la quebrada Valdez, junto a la carretera y planta El Limón. Dicha quebrada es caudalosa y recibe las descargas de los procesos de beneficio minero presentes a lo largo de la vía hacia el municipio de Zaragoza. También se muestrearon sedimentos activos aguas arriba y aguas abajo de la quebrada El 7, que desemboca en la quebrada Valdez y que se encuentra al norte, cerca de la planta de beneficio El Limón. La planta interviene en dicha quebrada por la presencia de unas colas de relaves ubicadas en lo alto y junto a la quebrada (fotografías 7.9. a 7.12.).



Fotografía 7.9. Tanque de proceso de la planta el Limón. Fuente: Autores.



Fotografía 7.10. Patio de colas de cianuración de la planta El Limón. Fuente: Autores.



Fotografía 7.11. Quebrada el siete antes de vertimientos de las colas. Fuente: Autores.



Fotografía 7.12. Quebrada el siete después de las colas de relaves. Fuente: Autores.

El cuarto punto fue en la planta de La Primavera, donde se inició muestreando relaves, los cuales se almacenan en un área pequeña al final del proceso. También se colectaron muestras de agua superficial y sedimentos activos de la quebrada La Primavera, aguas arriba y aguas abajo de la actividad minera de la planta (fotografías 7.13. y 7.14.) .



Fotografía 7.13. Piscinas de residuos del proceso La Primavera. Fuente: Autores.



Fotografía 7.14. quebrada la Primavera aguas abajo La Primave. Fuente: Autores.

El quinto y último punto de referencia fue en la planta de beneficio Mineros (La Ye), donde se muestrearon las fases sólida y líquida de un vertimiento que se encontraba después de los relaves almacenados a la intemperie, y que desembocaba a la quebrada San Pedro; esta pasa contigua a dicho punto y de allí se colectó agua superficial (fotografías 7.15 a 7.17.).



Fotografía 7.15. Quebrada San Pedro. Fuente: Autores.



Fotografía 7.16. vertimiento después del patio de relaves. Fuente: Autores.



Fotografía 7.17. Planta de proceso de beneficio del oro.. Fuente: Autores.

7.4. ANÁLISIS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

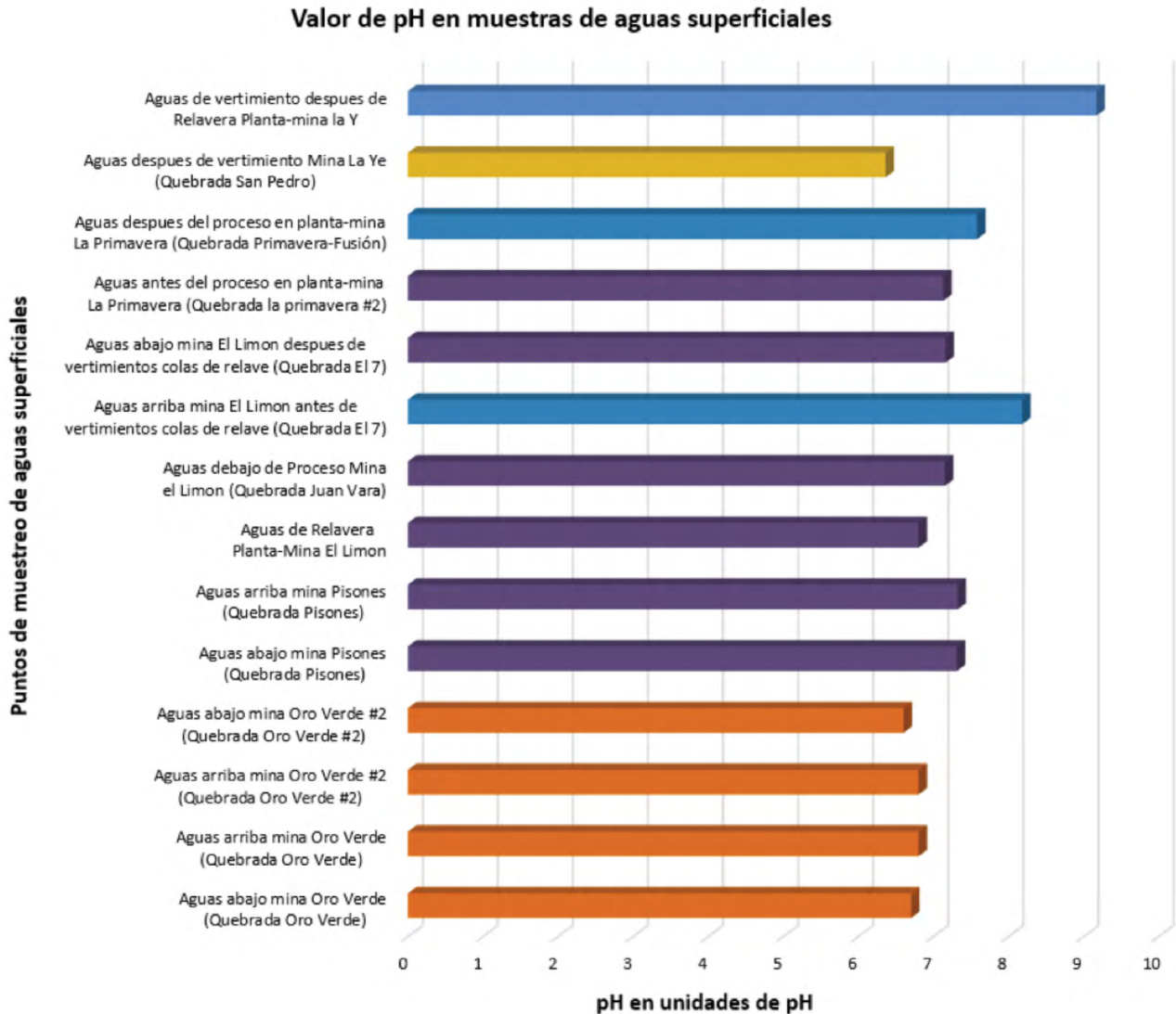
La aplicación de los ensayos químicos y ambientales a través de los diferentes métodos analíticos y técnicas instrumentales, se realiza con la finalidad de hacer una apreciación de las posibles fuentes que influyen en la estabilidad ambiental del entorno donde se están desarrollando las actividades de metalurgia extractiva. Los resultados obtenidos de estas evaluaciones, permiten hacer una aproximación del grado de contaminación al que se está exponiendo el medio y así tener la base para generar acciones de remediación, control y futura eliminación del efecto negativo en el medio ambiente.

7.4.1. DETERMINACIÓN DE PH

Esta propiedad fisicoquímica brinda un indicador de la presencia de compuestos que afectan la estabilidad del medio, ya sea con la generación de los drenajes ácidos (ácido $\text{pH} < 7$ hasta 1 unidades de pH), la movilidad de metales o la presencia de compuesto altamente alcalinos (básico $\text{pH} > 7$ hasta 14 unidades de pH), características que se pueden presentar debido a la formación mineralógica propia de la zona o al desarrollo de la actividad minera. El valor de pH en las muestras de aguas superficiales tomadas nos facilita el direccionamiento del estudio ambiental en la zona. En general, el comportamiento de las muestras líquidas tomadas en los sectores de estudios en el municipio de Zaragoza oscilaron en un rango de 6,36 a 9,17 unidades de pH (figura 7.15.).

En un panorama general, las mediciones de pH realizadas para las muestras líquidas en la zona de Zaragoza presentan tendencia básica. Los puntos visitados, en su mayoría, exponen valores entre 7,13 y 9,17 unidades

Figura 7.15. Valores de pH tomados in situ en muestras líquidas municipio de Zaragoza. Fuente: autores, 2019. Medición de pH Thermo Scientific Orion Star.



de pH; solamente el 36 % reportó pH menores a 7, con determinaciones en un rango de 6,36 a 6,80 (ver figura 7.15.). Como factor principal del estudio, se evidencia que los pH mencionados en los afluentes son una característica que desfavorece la movilidad del mercurio en las aguas influenciadas por la actividad metalúrgica, motivo por el cual, de las muestras líquidas tomadas para la caracterización ambiental de Zaragoza, ninguna presentó concentración de mercurio (determinación de mercurio por EAA, con generador de hidruros GH-AAS, límite menor 2 ppb, equivalente a 0,002 ppm).

El pH es un análisis que brinda una perspectiva in situ de las posibles características que presenta el sector en su composición química, del cual se pueden considerar: altos contenidos de compuestos alcalinos, como los carbonatos; baja movilidad de metales, tanto en las aguas influenciadas por la actividad metalúrgica, como en los vertimientos del material procesado del sector; y una leve presencia de sulfuros, que son compuestos que aportan acidez al medio. Respecto a las normas ambientales, se debe considerar que valores menores a 6 unidades de pH o mayores a 9 unidades de pH están fuera del límite permisible (Resolución n.º 631 de 2015).

En el sector de Oro Verde, las aguas en contacto con los sedimentos activos de los puntos muestreados presentan valores de pH muy similares, tomando como referencia la planta de Oro Verde n.º 1, aguas arriba y aguas abajo, se tienen datos de pH de 6,80 y 6,70 (ver figura 7.15.), respectivamente. Para las aguas relacionadas con la planta de Oro Verde n.º 2 se midieron valores de pH aguas arriba de 6,80 y aguas abajo de 6,60; estos valores indican un posible proceso de neutralización entre especies alcalinas y ácidas (Aduvire,

2006). El sector, según la descripción mineralógica, presenta sulfuros (principalmente, sulfuros de hierro y plomo) aportantes de acidez, pero que logran ser atenuados por las especies alcalinas como los carbonatos que también se reportan en la caracterización mineralógica y se evidencia el contenido por los porcentajes de potasio y calcio determinados por FRX.

Para las aguas tomadas en la zona relacionada con la planta Los Pisones, el comportamiento del pH es neutro con leve indicación alcalina, las muestras tomadas aguas arriba y aguas abajo de la planta de beneficio tienen valores de 7,32 y 7,31 (ver figura 7.15.). La neutralidad del medio se puede relacionar con la composición química de los sedimentos mencionados y la mineralogía del sector, las cuales indican alto contenido de hierro —principalmente, como óxidos que no favorecen la acidez— y la presencia de sulfuros —principalmente, la pirita, que sí genera acidez pero no es tan reactiva. Adicionalmente, en las caracterizaciones se menciona el contenido de carbonatos (contenidos de calcio y potasio; que permite ajustar el medio (Pinzón, et al.Ospina y Chávez, 2009) y evitar que por la presencia de sulfuros el pH no disminuya y se mantenga cercano a 7 unidades de pH en el afluente antes y después del procesamiento metalúrgico del sector.

Las muestras líquidas tomadas asociadas a la planta de beneficio El Limón tienen pH neutros y alcalinos. Las aguas en contacto con los sedimentos activos aguas abajo de la planta tienen un valor de 7,15 y el pH en el vertimiento generado por las colas ubicadas en el mismo sitio de la planta de beneficio es de 8,68. Estos valores expresan un alto contenido de carbonatos tanto en la mineralogía del sector como en el material procesado, que es respaldado con las caracterizaciones de FRX y análisis geológicos. Adicionalmente, se tiene un muestreo aguas arriba y aguas abajo en relación con los relaves generados por los procesos de beneficio en El Limón que anteceden a la planta de beneficio, donde los datos de pH tienen un comportamiento similar al ya mencionado. Aguas arriba se obtiene un valor de 8,18 y aguas abajo uno de 7,16; estos resultados evidencian que los sedimentos activos que están en contacto con las aguas y que son previos a las diferentes etapas de procesamiento tienen una influencia por el contenido representativo de especies que favorecen la alcalinidad en el medio y que, aun alterándose el afluente por el impacto generado de los relaves que comúnmente presentan cargas ácidas por los sulfuros rechazados en el beneficio, se da la neutralización aguas debajo de los desechos. Este fenómeno ocurre debido a los carbonatos cuantificados en la caracterización mineralógica que predominan en las fuentes hídricas cercanas intervenidas por la actividad metalúrgica de El Limón.

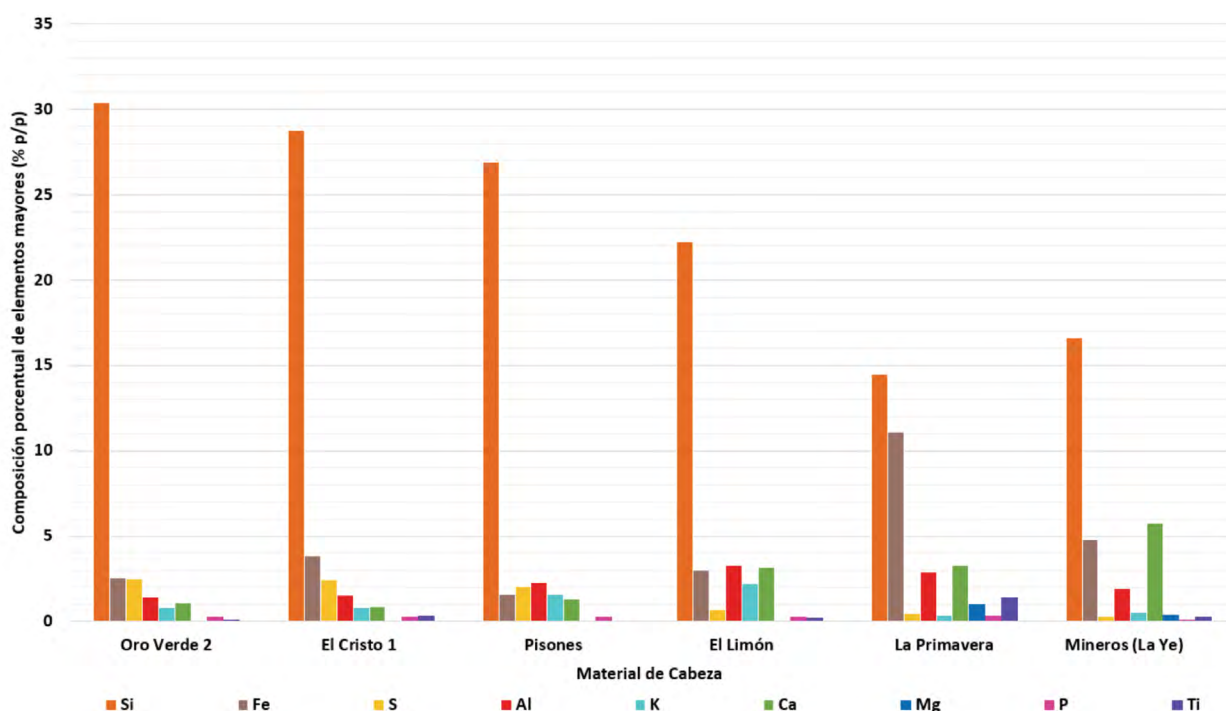
Los valores de pH determinados en los puntos de estudios en el sector de La Primavera presentan un comportamiento neutro para la muestra tomada aguas arriba de la actividad de la planta de beneficio, con un valor de 7,13 unidades de pH; se evidencia una tendencia levemente básica para la muestra tomada aguas abajo con un pH de 7,58, posterior a la actividad metalúrgica (ver figura 7.15.). El comportamiento de estos valores es la evidencia de un proceso de neutralización en el medio respecto a las diferentes especies que se solubilizan a partir del contacto de las aguas superficiales con los sedimentos activos, y entre las cuales son de mayor concentración los carbonatos, ya que se muestra un pH más básico después del procesamiento del material aurífero. Esta aproximación es comparable con la caracterización por FRX realizadas a los sedimentos activos del sector la Primavera y al material de cabeza, en los que se identifican altos contenidos de calcio y potasio como precursores de los carbonatos (especies alcalinas) y muy baja cantidad de azufre, elemento principal de los sulfuros (presente de acidez).

Para el muestreo ambiental en la zona de La Ye se eligió como punto de estudio la relavera de la planta de beneficio, respecto a la cual se hizo una toma aguas abajo del afluente superficial que marcó un pH de 6,36; también se hizo una toma del vertimiento proveniente de las colas de la extracción metalúrgica con una fase líquida que presenta un pH de 9,17 (ver figura 7.15.) y una fase sólida caracterizada por FRX y EAA. Las aguas superficiales presentan un comportamiento levemente ácido que se puede estar generando por la solubilidad de algunas especies aportantes, como los sulfuros (Hinojosa, 2002), los cuales son reportados por los análisis geológicos en la caracterización mineralógica del sector (pirita, calcopirita y galena). Adicional a estos minerales (sulfuros), la presencia de compuestos alcalinos también es alta y se ve reflejada en el pH alcalino del vertimiento —pH que supera lo establecido en los límites ambientales (Resolución n.º 631 de 2015)—. Este factor exhibido por el agua del vertimiento permite identificar un proceso de neutralización de sulfuros (porcentaje de azufre) por carbonato (porcentaje de calcio). Con respecto a tal reacción, en la matriz sólida del vertimiento, las colas y el material de cabeza procesado, en la caracterización por FRX, el material de cabeza presenta azufre en un 0,32 % y calcio en el 5,75 %; las colas contienen un 1,60 % de azufre y un 5,55 % de calcio. Por su parte, la fase sólida del vertimiento aumenta el contenido de azufre al 5,31 % y disminuye el porcentaje de calcio al 2,54 %; como resultado, la fase líquida del vertimiento —que es el medio de solubilidad— presenta un pH alcalino, neutralizando la actividad de los sulfuros, aunque estos presenten una alta concentración.

7.4.2. ANÁLISIS ELEMENTAL MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN MATERIALES DE CABEZA

Los resultados generados por esta técnica permiten hacer una caracterización elemental en relación con la composición mineralógica de los depósitos, que es contribuyente para la determinación de las condiciones de formación mineralógica, así como para su clasificación. Además, posibilita el análisis de las muestras sólidas colectadas en campo, por los diferentes ámbitos de aplicación. Por ejemplo, en el campo metalúrgico sirve de guía para evaluar la eficiencia de las operaciones dentro de proceso de beneficio. En el campo químico y ambiental brinda un indicador de la movilidad de elementos, tanto de origen geogénico como antropogénico, en relaves y sedimentos activos; son de principal interés aquellos elementos como los metales pesados, así como los elementos tóxicos y generadores de drenaje ácido. Los resultados del análisis elemental por la técnica de FRX para las muestras de cabeza de proceso del municipio de Zaragoza se presentan en las figuras 7.16. y 7.17.

Figura 7.16. Composición de elementos mayores en el material de cabeza de las plantas visitadas en el municipio de Zaragoza, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



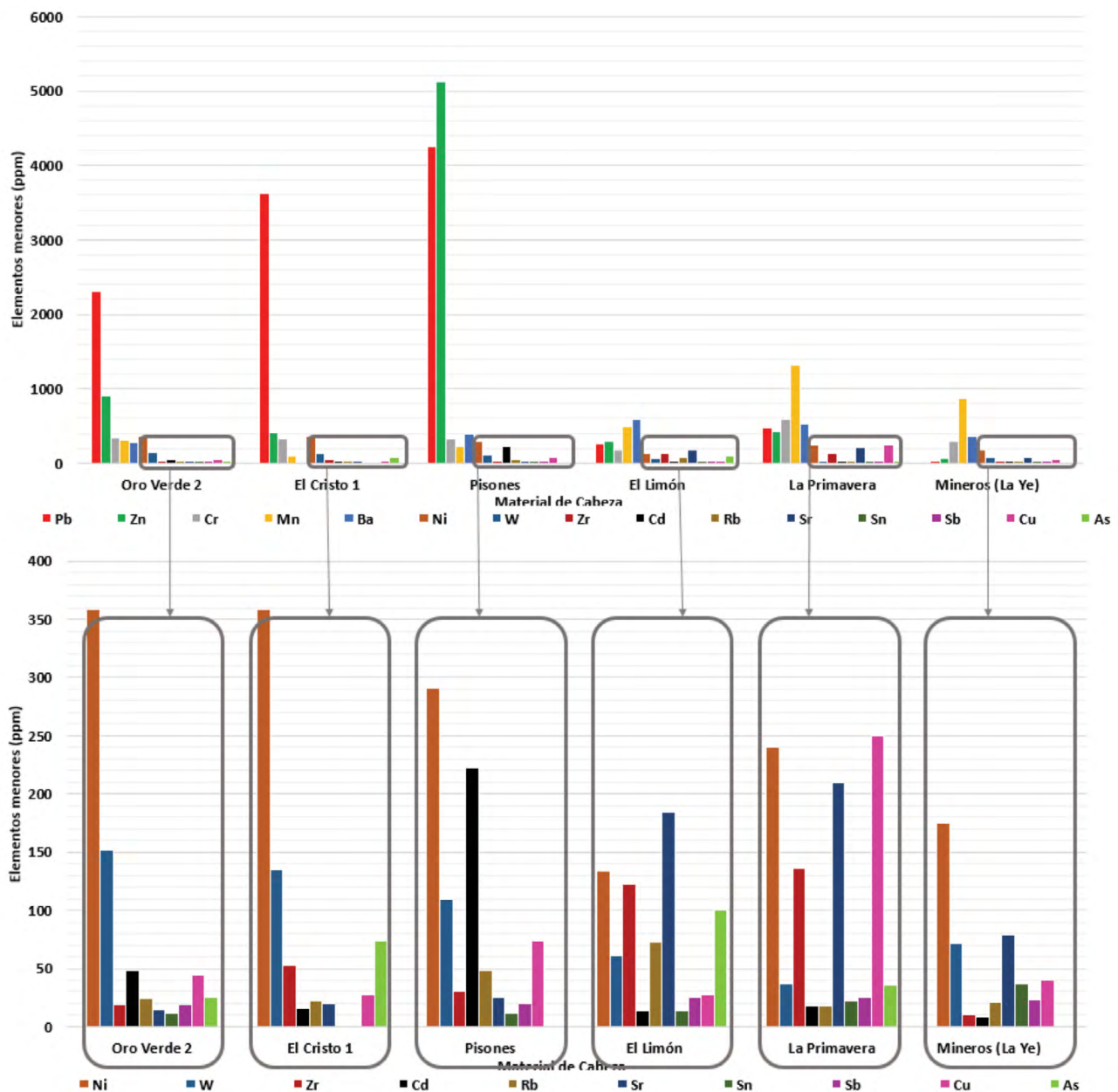
Estos resultados permitieron dilucidar que el material de cabeza actual trabajado en la plantas visitadas en el municipio de Zaragoza contienen silicio en mayor proporción, encontrándose en un rango de 14,47 % a 30,42 %, debido a que este tipo de material provenía principalmente de vetas de cuarzo. También se logró observar un contenido de hierro que osciló entre el 1,62 % y el 11,11 %, siendo La Primavera la planta que más presentó este elemento, seguida por la planta Mineros (La Ye) con un 4,79 %, que se le puede atribuir a la presencia de óxidos, silicatos y sulfuros de hierro incluidos en veta y roca hospedante. En este último caso, dichos sulfuros estarían relacionados con el contenido de azufre que varía entre el 0,32 % y el 2,50 %, donde el mayor valor corresponde a las plantas de beneficio de Oro Verde 2 (2,50 %), El Cristo 1 (2,46 %) y Los Pisones (2,05 %) (ver figura 7.16.).

Por otra parte, los resultados de FRX permitieron comprobar el contenido de elementos mayores como el potasio (K) entre un 0,33 % y un 2,23 %, y aluminio (Al) entre el 1,44 % y el 3,28 % (ver figura 7.16.). Estos datos se relacionan principalmente con los feldespatos característicos de la roca hospedante y la presencia de minerales arcillosos derivados de su alteración, como micas ricas en potasio o caolinitas ricas en aluminio. También se cuenta con un contenido de calcio (Ca) del 0,87 % al 5,75 %, por lo que se puede sugerir la presencia de carbonatos de calcio (CaCO_3), como calcita; esto indica, además, que hubo procesos de alteración

hidrotermal durante el proceso de mineralización. En cuanto al contenido de magnesio (Mg), se presentó en un 0,40 % en la planta de Mineros (La Ye) y en un 1,02 % en La Primavera; posiblemente, es aportado por minerales ferromagnesianos de las rocas hospedantes, cuya alteración genera arcillas cloríticas ricas en magnesio. Un resultado interesante en el municipio de Zaragoza es la presencia de fósforo (P) y titanio (Ti) en cantidades que oscilan entre el 0,12 % y el 0,32 % para el primero, y entre el 0,09 % y el 1,41 % para el segundo.

Con respecto al contenido de elementos menores presentes en el material de cabeza y determinados por la técnica de FRX (ver figura 7.17.), contenidos en partes por millón (ppm) en el material de cabeza de las plantas de beneficio del municipio de Zaragoza, se pudo observar que en general el plomo y el zinc están presentes en cantidades relevantes con contenidos entre 28,14 ppm y 4251,67 ppm, y entre 61,73 ppm y 5120,69 ppm, respectivamente. Estos resultados se pueden relacionar con el azufre presente como elemento mayor (ver figura 7.16.), para indicar la presencia de esfalerita (ZnS) y galena (PbS). Además, se resalta que el mayor contenido de azufre se presentó en el material de cabeza de las plantas Oro Verde 2, El Cristo y Los Pisones, donde también se presentó el mayor contenido tanto de plomo como de zinc.

Figura 7.17. Contenido de elementos traza en el material de cabeza de las plantas visitadas en el municipio de Zaragoza, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



Otros de los elementos traza representativos en el material de cabeza de las plantas visitadas en el municipio de Zaragoza son el cromo, el manganeso y el bario, que comúnmente se encuentran presentes en la roca hospedante y asociados, entre ellos, al hierro y al arsénico (Ye y Wu, 2018). Por otra parte, Railsback (2012), en su tabla periódica de los elementos y sus iones para ciencias de la tierra, sugiere que el manganeso presente como elemento traza puede estar estrechamente relacionado con la presencia de hierro Fe^{3+} , debido a que el Mn^{3+} , el Mn^{4+} y el Fe^{3+} . Se trata de iones ferromangánicos presentes en roca hospedante, especialmente en las minas seleccionadas de Zaragoza, donde se aprecian contenidos de manganeso entre 225,36 ppm y 1317,86 ppm.

El contenido de bario encontrado está relacionado con los procesos hidrotermales tardíos que favorecen la movilización de iones bario y calcio, además de que permiten su precipitación como carbonatos (Aliyari, Rastad, Goldfarb y Sharif, 2014). El níquel comúnmente se localiza asociado al cobre, el cual se encontró en las minas El Cristo (27,00 ppm), El Limón (27,09 ppm), Mineros (La Ye) (40,18 ppm), Oro Verde 2 (43,72 ppm), Los Pisones (73,79 ppm) y La Primavera (249,46 ppm); puede ser atribuido a la presencia de calcopirita.

El tungsteno se encontró en el material de cabeza de las plantas visitadas en Zaragoza en cantidades interesantes: 36,71 ppm en La Primavera, 61,29 ppm en El Limón, 71,94 ppm en Mineros (La Ye), 109,78 ppm en Los Pisones, 134,82 en El Cristo y 151,40 ppm en Oro Verde 2. En ocasiones, el tungsteno es un elemento presente en depósitos de oro; sin embargo, también puede estar relacionado con eventos de flujo de los mismos fluidos de origen de oro, pero no necesariamente directo con la mineralización de oro en concentraciones elevadas (Craw y Mackenzie, 2016). Mientras que el cadmio, que está principalmente asociado con la esfalerita (Zhu, Wen, Zhang, Yin, Cloquet y Zhu, 2018), se encontró por debajo de los 50 ppm en todas las plantas visitadas en Zaragoza, excepto en Los Pisones, donde el contenido para dicho elemento en el material de cabeza fue de 222,67 ppm y que, en relación con el zinc, también se presentó en mayor cantidad: 5120,69 ppm para esta misma planta.

El arsénico, el cual se resalta en las plantas de Oro Verde 2, La Primavera, El Cristo 1 y El Limón, se encuentra entre 25,05 ppm y 100,14 ppm; puede ser atribuido a la presencia de arsenopirita ($FeAsS$) como mineral, tal y como se evidenció en resultados de petrografía.

7.4.3. CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS ACTIVOS

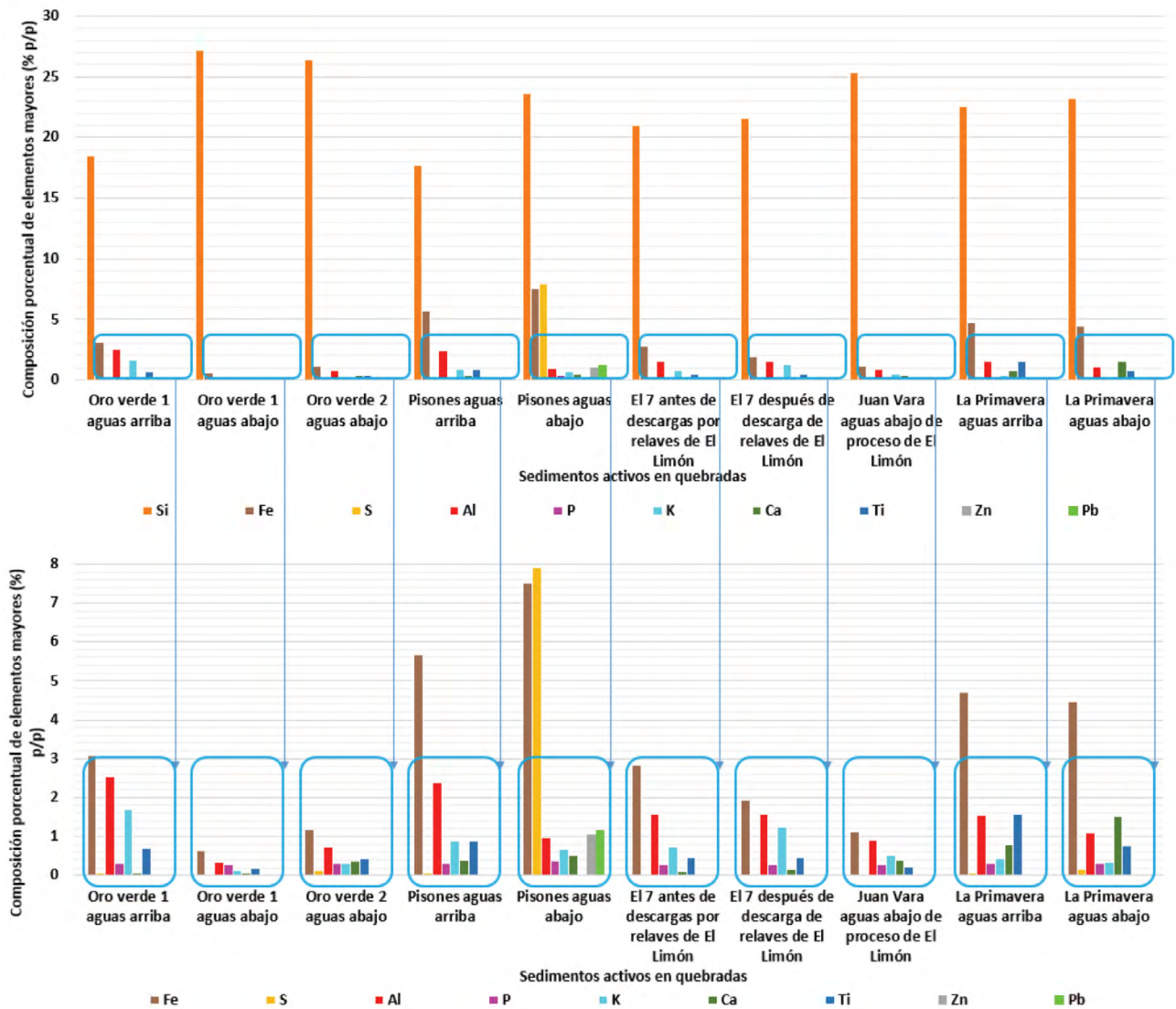
7.4.3.1. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN SEDIMENTOS ACTIVOS

De acuerdo con los resultados encontrados en los sedimentos activos de las quebradas muestreadas en el municipio de Zaragoza (figura 7.18.), se observan principalmente contenidos de silicio, hierro y aluminio como elementos mayores. Estos se pueden relacionar con la presencia de silicatos y aluminosilicatos como grupo de minerales de mayor abundancia, pues constituyen el 95 % de la corteza terrestre y normalmente hacen parte de los sedimentos activos. También se identificaron minerales contenedores de hierro que, para este caso, son propios de la región. Otros de los elementos mayores detectados, aunque en baja proporción, pero no menos interesantes, son potasio y calcio, los cuales son de origen geogénico y gracias a sus características alcalinas pueden favorecer a controlar el pH de los afluentes muestreados. Además, se logró detectar fósforo en cantidades del 0,26 % al 0,36 %, así como titanio entre el 0,20 % y el 1,56 %.

Por último, tres resultados importantes son el contenido de plomo, zinc y azufre, que se evidencia principalmente en la planta Los Pisones y que estaría relacionado con el mal manejo de residuos de proceso. Así, se estaría permitiendo el paso de estos elementos tóxicos a la quebrada aledaña, perjudicando al medio ambiente, mientras que en las demás quebradas cercanas a las plantas estudiadas en este trabajo no se presenta un contenido de azufre elevado como elemento mayor. Por ello, se concluye que existe una mayor contribución por parte de los elementos alcalinos y alcalinotérreos, de modo que puede esperarse encontrar unas aguas con pH básico.

En cuanto al contenido de los elementos menores presentes en los sedimentos activos de las quebradas muestreadas en el municipio de Zaragoza (figura 7.19.), se encontraron metales pesados en mayor abundancia como el manganeso, el bario, el cromo y el zirconio; los demás elementos menores (Sr, Zn, Sb, Pb, Cr, Cd, Sn, Cu y As) presentes como elementos traza se encuentran en menor abundancia. También se debe hacer

Figura 7.18. Composición de elementos mayores en sedimentos activos de quebradas visitadas en el municipio de Zaragoza, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.

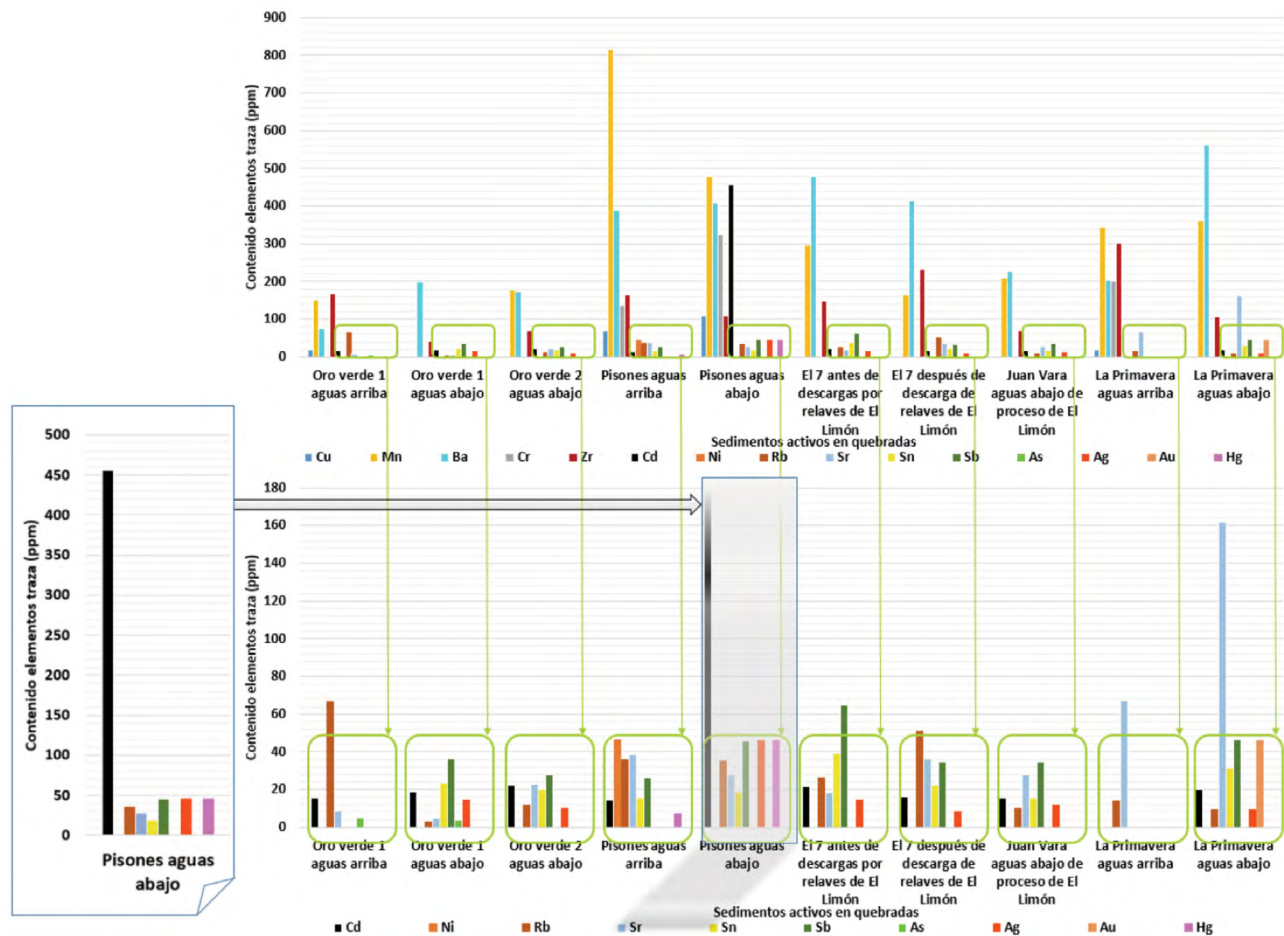


mención de que el zinc y el plomo se reportaron en la figura 7.18. como elementos mayores, principalmente por el alto contenido en los sedimentos de la quebrada Los Pisones; sin embargo, estos dos elementos hacen parte de los elementos traza de los demás sedimentos activos muestreados en este estudio.

En Los Pisones se logró evidenciar dentro de los elementos menores un contenido elevado de cadmio (ver figura 7.19.), lo cual demuestra que los relaves de esta planta no se controlan de manera apropiada, pues este elemento estaría directamente relacionado con esfalerita (ZnS) e indirectamente con PbS, confirmando el paso de sulfuros de metales pesados a los sedimentos de la quebrada Los Pisones.

Referente al contenido de cromo presente como elemento traza determinado por la técnica de FRX, se aprecia que, aguas arriba, la quebrada La Primavera contiene 200,65 ppm; esto representa un contenido de cromo de origen geogénico y que se presenta únicamente aguas arriba de la quebrada, por estar más cerca

Figura 7.19. Contenido de elementos traza en sedimentos activos de quebradas visitadas en el municipio de Zaragoza, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



de la mina. Sin embargo, se debe considerar que la presencia de otros minerales, como óxidos de hierro, inmoviliza el cromo y le da carácter de cromo trivalente no tóxico (Lilli, Nikolaidis, Moraetis, Kalogerakis y Karatzas, 2014); por este motivo, no presenta movilidad aguas abajo.

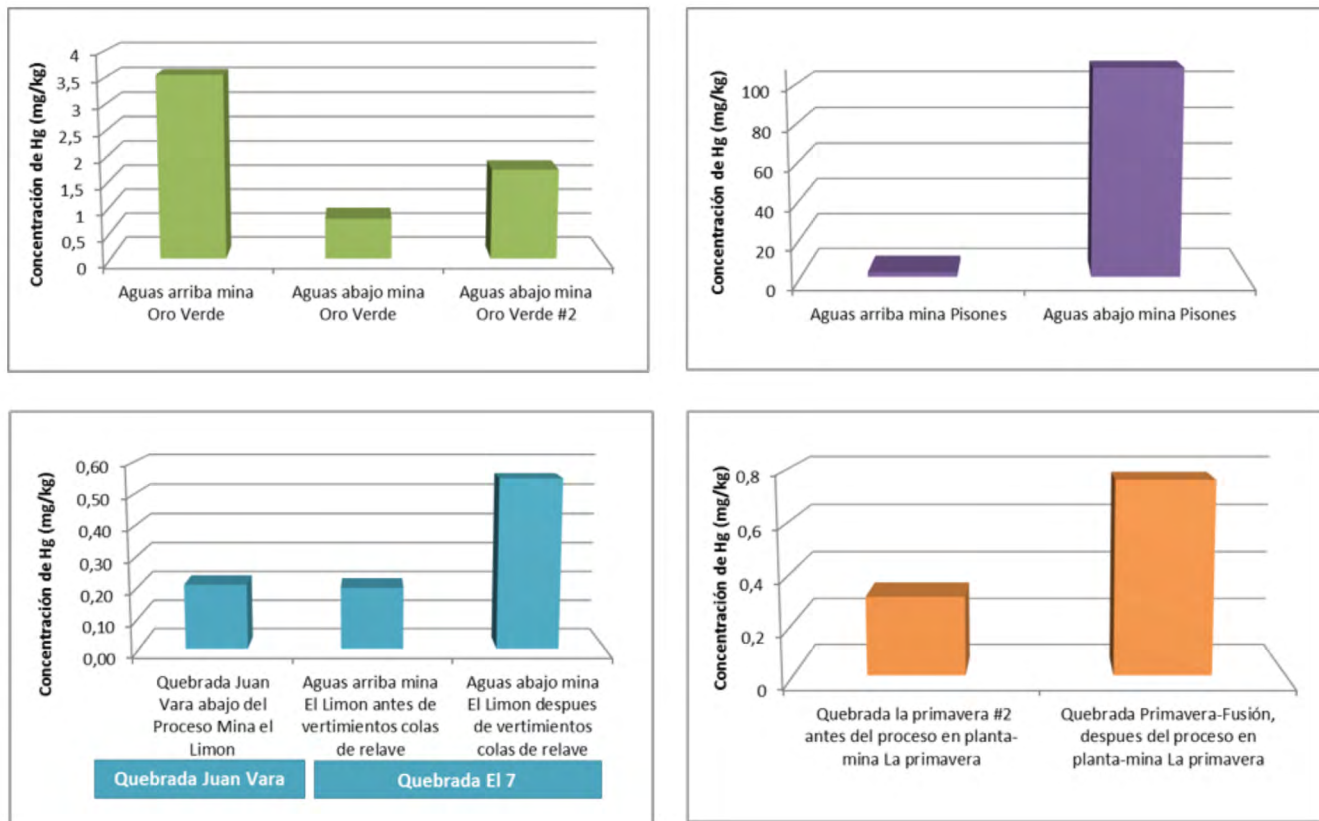
Para finalizar, a excepción de las quebradas muestreadas aledañas a la planta El Limón, al comparar los sedimentos activos de las quebradas muestreadas aguas arriba y aguas abajo de la actividad minera, estas últimas presentan una mayor cantidad de elementos traza característicos de mena. Por lo tanto, se puede decir que dichos elementos en los sedimentos activos de Zaragoza son de origen antropogénico o que, aunque sean de origen geogénico, el personal minero que interfiere en los procesos de extracción y beneficio de oro está contribuyendo a su movilidad como sustancias tóxicas, partiendo desde las mismas menas mineralizadas. Lo anterior quiere decir que, aunque sean característicos de las zonas de estudio en Zaragoza, no se les está dando un control apropiado en relación con el ámbito ambiental, sobre todo al final de los procesos de beneficio.

7.4.3.2. DETERMINACIÓN DE MERCURIO POR EAA EN SEDIMENTOS ACTIVOS

Los sedimentos activos muestreados y los resultados de la cuantificación de mercurio por EAA con generación de hidruros, se presentan en la figura 7.20. Se encontraron valores importantes de este analito en la muestra tomada aguas abajo de la actividad minera de Los Pisones, El limón y La Primavera. A partir de los resultados se puede inferir que las labores de extracción y beneficio de oro tienen efectos negativos asociados al aumento de la concentración de mercurio luego del proceso en planta. Es posible observar que aguas arriba de las plantas El Limón y La Primavera hay mercurio en concentraciones bajas que oscilan entre 0,2

ppm y 2 ppm, de manera que, probablemente, existen otras plantas de beneficio que hacen uso de este metal y que están contribuyendo a su aumento en la zona; o puede ser mercurio geogénico, es decir, propio de la mineralización de la zona.

Figura 7.20. Concentración de mercurio en sedimentos activos. Fuente: autores.



La muestra tomada aguas arriba de la quebrada Oro Verde 1 es comparable con la de Oro Verde 2, dado que, según lo observado en campo, se trata de nacimientos similares. En la figura 7.20 se observa una concentración de aproximadamente 3,6 ppm de mercurio y concentraciones de 0,8 ppm y 1,7 ppm luego de las plantas Oro Verde 1 y Oro Verde 2, respectivamente. A partir de la visita realizada, se infiere que aguas arriba de las plantas mencionadas la concentración de mercurio, superior a la de aguas abajo, es debida a la concentración de este metal en un represamiento de agua formado naturalmente, en el cual el mercurio, que es de origen geogénico, se precipita y se acumula. De manera que aguas abajo de las plantas de beneficio la concentración de mercurio se asocia al proceso antropogénico y a trazas de este elemento de origen natural que fluyen en la quebrada.

Las muestras tomadas en El 7 se analizaron considerando el flujo de agua de esta quebrada y de la quebrada Juan Vara, sobre la cual desemboca. Según información suministrada en campo, la planta El Limón realiza su proceso productivo de manera que no hace vertimientos directos a la quebrada El 7; sin embargo, existen depósitos de relaves cuyos drenajes, probablemente, sean los aportantes de la concentración de mercurio cuantificada.

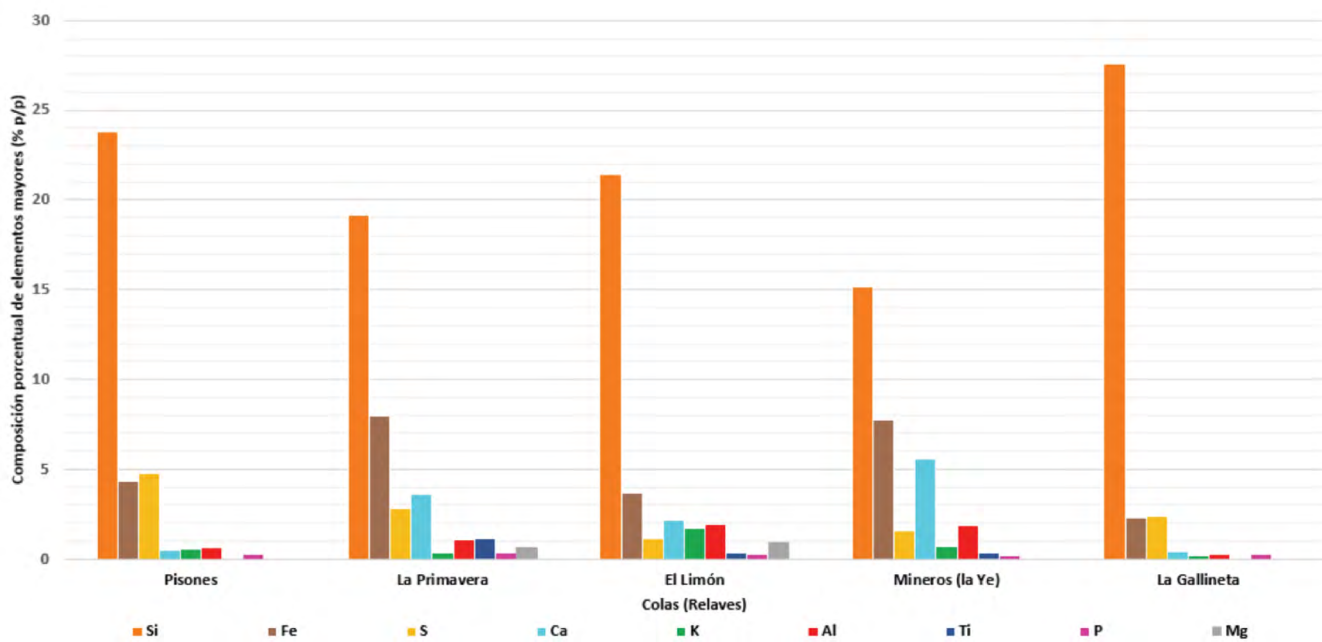
Dado que en Colombia no existe reglamentación de los niveles máximos permisibles de metales pesados en sedimentos activos ni en suelo, en general, los resultados obtenidos se compararon con la legislación canadiense (Gaudet, Lingard, Cureton, Keenleyside, Smith y Raju et al., 1995), la cual establece que un sedimento activo es de calidad apropiada cuando la concentración en mercurio es de 0,17 mg/kg. Según referencia bibliográfica sobre elementos traza en suelo (Kabata, 2001), una concentración de mercurio entre 1 y 3 mg/L es tóxico para la flora y fauna, debido a la alteración de las funciones metabólicas de las plantas. Los sedimentos activos muestreados no superan estos límites, por lo que pueden no ser tóxicos para las especies vivas en el medio.

MacDonald, Ingersoll y Berger (2000) presentan valores de referencia del nivel de efecto umbral de mercurio TEC (por su sigla en inglés, Threshold Effect Concentration), que se define como la concentración que no debería tener efectos dañinos en los microorganismos que viven en contacto con el sedimento, para diferentes metales de interés ambiental. Para el caso del mercurio, se recomienda una concentración de 0,18 mg/kg, que indica ausencia de toxicidad. Dada esta recomendación, se puede decir que es probable que los organismos presentes aguas abajo de la quebrada Los Pisones, El 7, Oro Verde, Juan Vara y La Primavera estén siendo afectados por las concentraciones de mercurio determinadas en laboratorio.

7.4.4. CARACTERIZACIÓN DE RELAVES

7.4.4.1. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN RELAVES

Figura 7.21. Composición de elementos mayores en los relaves visitados en el municipio de Zaragoza, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



De acuerdo con los resultados de FRX ilustrados en la figura 7.21, las colas (relaves) de los entables muestreados en el municipio de Zaragoza presentan dentro de los elementos mayores una acumulación de silicio que oscila entre el 15,15 % y el 27,55 %, proveniente principalmente de vetas de cuarzo que se encuentran en el material de cabeza de cada planta de beneficio visitada.

Por otra parte, se encontraron elementos como hierro, azufre, calcio, potasio, aluminio, titanio, fósforo y magnesio. Al particularizarse el contenido de ciertos elementos en estos relaves, se evidencia congruencia con el contenido de elementos en el material de cabeza; ejemplo de ello es el hierro, que se sigue presentando en mayor proporción (7,98 %) en los relaves de la planta de beneficio La Primavera, seguido de Mineros (La Ye) (7,76 %), Los Pisones (4,37 %), El Limón (3,68 %) y La Gallineta (2,27 %), así como también ocurre con el calcio presente en Mineros (la Ye) (5,55 %), La Primavera (3,60 %), El Limón (2,13 %), Los Pisones (0,50 %) y La Gallineta (0,40 %). Esta misma congruencia la presentan el potasio, que oscila entre el 0,19 % y el 1,71 %; el aluminio, entre el 0,62 % y el 1,92 %; el titanio, entre el 0,35 % y el 1,11 %; el fósforo entre el 0,19 % y el 0,31 %; y el magnesio, entre el 0,65 % y el 0,93 %.

Sin embargo, los resultados para el azufre presente en estos relaves dejan ver un incremento porcentual en comparación con el azufre presente en el material de cabeza. De las figuras 7.16 y 7.21 se logra determinar que, en los relaves de Los Pisones, el contenido de azufre con respecto al material de cabeza subió un 2,75 %, en La Primavera un 2,35 %, en Mineros (La Ye) un 1,28 % y en El Limón un 0,49 %. Por ello, los demás elementos mayores en relaves mostraron una leve disminución en la cantidad porcentual en relaves con

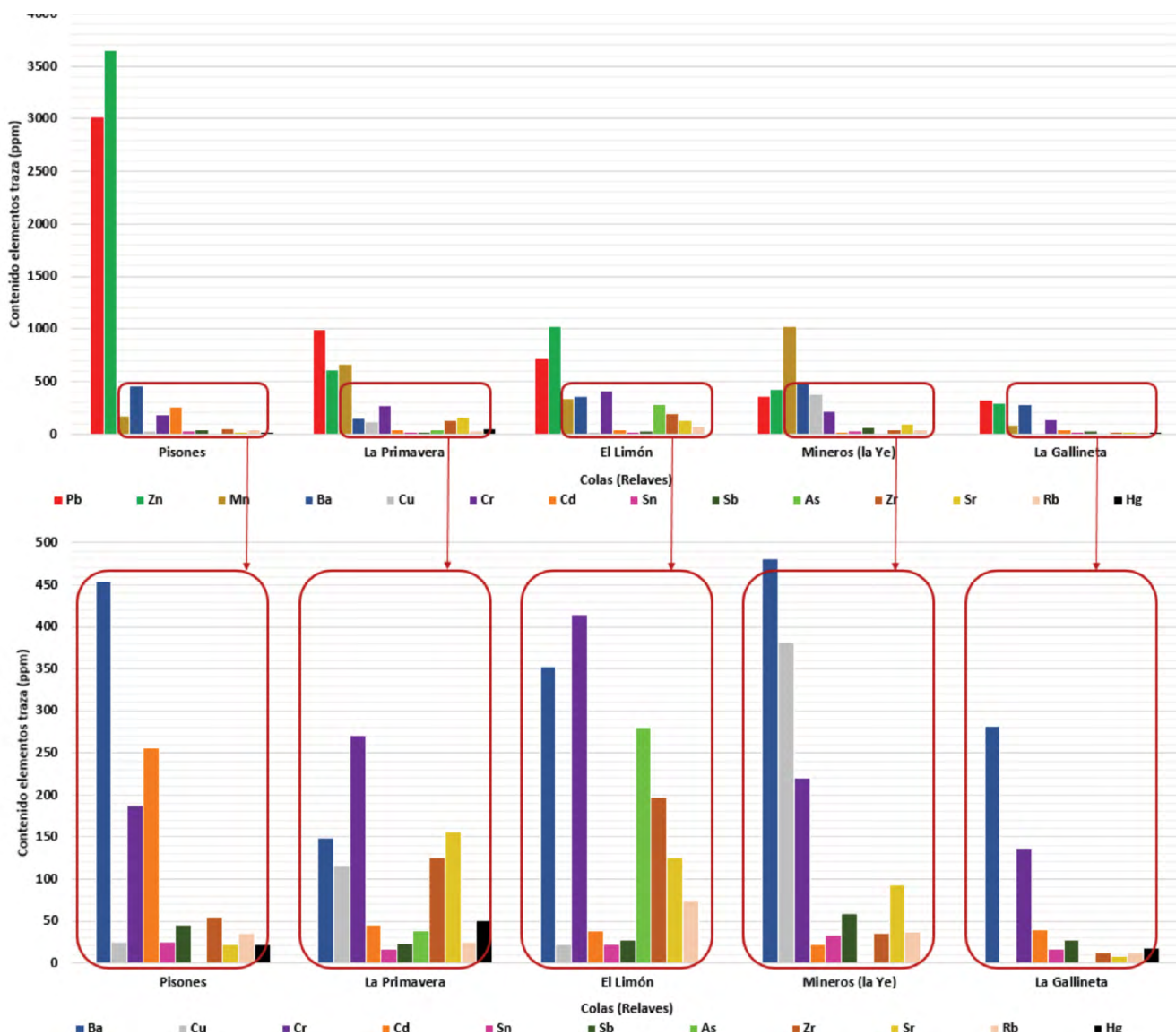
respecto al material de cabeza. No obstante, el contenido de hierro en los relaves de La Primavera disminuyó un 3,13 % en los relaves respecto al contenido en el material de cabeza; dicho resultado se puede relacionar con el contenido de silicio, el cual se incrementa en 4,66 % en los relaves con respecto al material de cabeza, mientras que en las demás plantas el silicio disminuye sutilmente.

Lo anterior demuestra que en los relaves visitados del municipio de Zaragoza se acumulan los elementos provenientes del material de cabeza, pero se nota un incremento principalmente en el contenido de hierro y azufre, a excepción de La Primavera donde el mayor incremento es en silicio y azufre.

En el ámbito ambiental, estos resultados son muy importantes porque la acumulación de azufre en los relaves a mediano plazo conduce a la generación de drenajes ácidos, como consecuencia de la oxidación de sulfuros finos, en condiciones de exposición al agua o aire y catalizada por microorganismos; los drenajes ácidos asociados a la minería se caracterizan por contener hidrógeno, iones metálicos y sulfatos (Çelebi, Öncel y Koby, 2018).

Por otra parte, el contenido de potasio se atribuye a minerales arcillosos y micas que provenían del material de cabeza. Además, este elemento, por ser alcalino, puede contribuir al control de la acidez en el medio de

Figura 7.22. Contenido de elementos traza en los relaves visitados en el municipio de Zaragoza, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



contacto junto con los elementos alcalinos como calcio y magnesio, pertenecientes a calcitas o carbonatos de calcio y magnesio. De otro lado, el aluminio también presente proviene de minerales arcillosos del material de cabeza, mientras que el potasio hace parte de las apatitas que se han acumulado en estos relaves estudiados.

En cuanto a los elementos menores de los relaves visitados en el municipio de Zaragoza (figura 7.22.), se evidenció la acumulación de plomo y zinc, provenientes del material de cabeza como se describió antes (ver figura 7.17.). En este caso se aprecian contenidos que varían desde 326,65 ppm hasta 3020,13 ppm de plomo y desde 291,00 ppm hasta 3645,26 ppm de zinc.

Otro de los elementos menores más representativos en este estudio es el manganeso, el cual hace parte del material de cabeza y se está acumulando en estos relaves con contenidos que oscilan entre 83,97 ppm y 1023,93 ppm. Con respecto al bario, el cobre y el cromo, se observaron en los relaves cantidades que oscilan, respectivamente, entre 149,00 ppm y 481,90 ppm, entre 21,70 ppm y 381,64 ppm, entre 136,78 y 414,85 ppm. Asimismo, se detectó cadmio en cantidades desde 21,83 ppm hasta 255,15 ppm, lo cual está asociado a la presencia de esfalerita (ZnS). Por su parte, el estaño se encuentra por debajo de 33,31 ppm y el antimonio detectado se encuentra entre 22,75 ppm y 58,61 ppm, notándose un leve incremento con respecto al material de cabeza. El arsénico, el cual es uno de los elementos de más cuidado en el ámbito ambiental, se encuentra con 280,56 ppm en los relaves de la planta El Limón, mientras que el zirconio, el estroncio y el rubidio se encuentran por debajo de 12,32 ppm en La Gallineta, 54,16 ppm en Los Pisones, 92,92 ppm en Mineros (La Ye), 155,65 ppm en La Primavera y 196,55 ppm en El Limón.

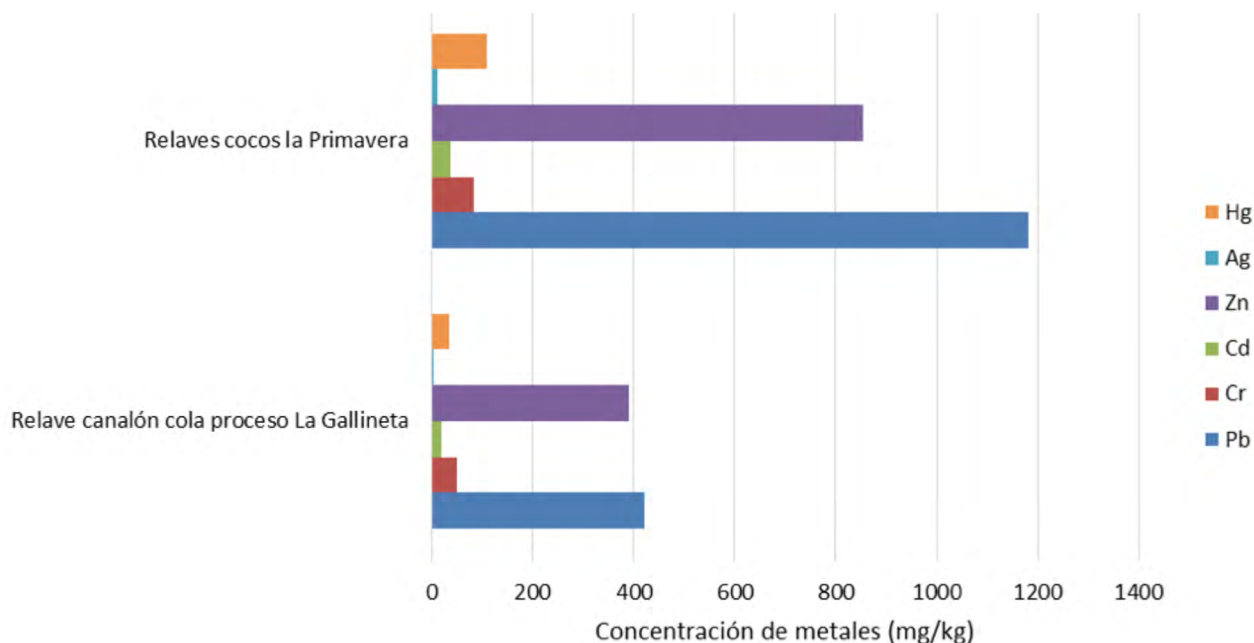
Por último, con la técnica de FRX se logró evidenciar mercurio en los relaves de La Primavera, Los Pisones y La Gallineta, con contenidos de 50,64 ppm, 21,58 ppm y 17,49 ppm, respectivamente.

7.4.4.2. DETERMINACIÓN DE METALES POR EAA EN RELAVES

En la figura 7.23 se presenta la determinación de metales pesados en el material de residuo del proceso de beneficio de las plantas en cuestión.

La determinación de metales, objeto de estudio ambiental, por EAA permitió establecer sus concentraciones y relacionarlos con las consecuencias asociadas a ellos. El plomo se encuentra, en todas las muestras, en concentraciones elevadas que, según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, 1996), pueden ser consideradas como tóxicas, dado que tanto en la muestra del relave de La Gallineta como en el de La Primavera superan los 100 mg/kg. De igual forma, según Kabata Pendías (2001), al exceder las 300 ppm, es probable que exista inhibición del proceso de fotosíntesis y del crecimiento de las plantas que se

Figura 7.23. Resultados de determinación de metales en relaves. Fuente: autores.



desarrollen en este suelo. La presencia de plomo en los relaves se asocia a la presencia de minerales que contienen este elemento, principalmente la galena.

Por su parte, el cromo se encontró en concentraciones de 50,58 ppm y 82,21 ppm para la muestra tomada en La Gallineta y La Primavera, respectivamente. Según la literatura, concentraciones superiores a 30 ppm representan un nivel de toxicidad alto para el desarrollo de la flora, debido a que este elemento puede interrumpir la actividad del suelo, pues inhibe microorganismos presentes en él; puede acumularse en plantas y animales, y limita el crecimiento de algunas especies de plantas, eliminando la diversidad de flora.

Otro elemento analizado fue la plata, la cual se debe a los minerales de este elemento abundantes en la zona. En cuanto al cobre, se puede considerar su ocurrencia debido a la presencia de calcopirita y covelina, principalmente. En La Gallineta se cuantificó 39,43 mg/kg y en La Primavera 225,50 mg/kg, de lo cual se puede inferir una concentración mayor de minerales de cobre. Estos valores podrían ser considerados de riesgo ambiental, en especial en el segundo caso, dado que en especies de plantas puede causar inhibición de síntesis de clorofila. Sin embargo, y al igual que en todos los metales pesados analizados, es necesario analizar su biodisponibilidad basándose en la forma química y física en que se encuentran y en la capacidad de los organismos para absorberlos (Galán y Romero, 2008).

El cadmio cuantificado se debe a su presencia en las rocas madre en las que se formó el suelo; en estas, según el estudio petrográfico de la zona, hay contenidos apreciables de esfalerita (ZnS), un mineral de zinc al que se asocia el cadmio, debido a su afinidad química. Asimismo, en el ambiente, el cadmio genera efectos altamente tóxicos que inhiben los procesos metabólicos de los organismos vivos. En los relaves de La Primavera (37,06 mg/kg), la concentración excede las 30 ppm, por lo que representa un riesgo potencial para la salud y el ambiente.

Con respecto al mercurio, se cuantificaron en La Gallineta 33,9 mg/kg y en La Primavera 109,9 mg/kg; aunque el mercurio se encuentra en menor proporción que metales como el zinc y el plomo, su concentración es altamente tóxica, teniendo en cuenta que, según la literatura, este metal no debe superar los 3 mg/kg en suelos (Acosta, 2007), de lo contrario representa un riesgo para el desarrollo normal de las funciones biológicas de plantas y animales que entren en contacto con él.

Finalmente, en la caracterización de relaves se considera al zinc como un elemento importante a analizar, debido a que es un metal pesado que al presentarse en altas concentraciones tiene efectos negativos en el ambiente. Según los resultados presentados en la figura 7.22, el Zn se encuentra en concentraciones significativas de 389,22 mg/kg en el relave de La Gallineta y en 854,52 mg/kg en La Primavera. En ambos casos se superan las 400 ppm que señalan alta toxicidad para especies de flora, alterando, posiblemente, la permeabilidad de la membrana celular e inhibiendo el proceso de fotosíntesis.

7.4.4.3. PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACIÓN CARACTERÍSTICA DE TOXICIDAD (TCLP)

La prueba TCLP se realizó a 2 muestras correspondientes a relaves de las plantas La Primavera y La Gallineta. A continuación, se presenta la descripción de las muestras tomadas y los resultados de la determinación de plata, plomo, cadmio, cromo y mercurio (Hg) (figura 7.24.), los cuales son metales pesados de interés ambiental que se encuentran en la lista de contaminantes tóxicos en el Decreto 4741 de 2005. La presencia de plata, plomo, cadmio, cromo, mercurio, arsénico y otros metales pesados puede significar un riesgo tóxico al ambiente y a los seres humanos, dada su capacidad de producir efectos biológicos adversos, puesto que son susceptibles de bioacumularse y biomagnificarse en los seres vivos.

Los valores de los metales obtenidos de la prueba TCLP permiten conocer la liberación de estos en el ambiente al entrar en contacto con fases líquidas. Los resultados se comparan con el Decreto 4741 de 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y 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.

De acuerdo con los resultados presentados no existe una concentración detectable por la técnica de EAA de plata, cromo ni cadmio en ninguna de las muestras tomadas en campo de las plantas visitadas. Esto se

Figura 7.24. Concentraciones de elementos con potencial peligroso prueba TCLP. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	Pb (mg/L)	Ag (mg/L)	Cd (mg/L)	Cr (mg/L)	Hg (mg/L)
Colas cocos Hg La Primavera	0,572	D.L.C	D.L.C	D.L.C	0,0023
Relave canalón cola proceso La Gallineta	0,0657	D.L.C	D.L.C	D.L.C	0,0024

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

debe a la baja concentración de estos metales, como se presentó en la caracterización de relaves (ver figura 7.22.), por lo que su lixiviación no es cuantificable por la técnica empleada.

Las concentraciones en el lixiviado de mercurio y de plomo fueron los analitos detectados por el equipo de EAA. Los resultados se compararon con la norma colombiana y se determinó que en ninguno de los casos existe toxicidad asociada a la lixiviación de plomo o mercurio, ya que no exceden 5 mg/L, para el caso del plomo, ni 2 mg/L en el caso del mercurio.

Es posible que la presencia de los metales analizados en el relave no implique su lixiviación, puesto que pueden quedar inmovilizados en las pilas de desechos. Las razones para ello se basan en las características fisicoquímicas del suelo, como el pH. Según la determinación de pH presentada en el numeral 7.4.1. y corroborada en el numeral 7.2.3.7 con el Test ABA, se trata de muestras de carácter básico, lo cual reduce significativamente la movilidad de los metales analizados. Es más factible que este fenómeno se dé en pH inferiores a 6 unidades.

7.4.4.4. BALANCE ÁCIDO BASE (TEST ABA) PARA LA PREDICCIÓN DEL DAM

Uno de los ensayos de laboratorio para predecir el DAM es el Test ABA Modificado, con el que es posible establecer un balance entre los componentes generadores y neutralizadores de drenaje ácido. Es un test estático con el que se obtiene la capacidad de generación de DAM sin indicar la medida en que se genera. La figura 7.25 presenta un esquema del procedimiento experimental que se lleva a cabo para predecir el DAM.

Dentro de la caracterización química ambiental, se determinó la capacidad de generación de drenaje ácido de los relaves pertenecientes a las diferentes plantas de beneficio visitadas. En la tabla 28 se consignan los códigos de identificación de las muestras, la descripción de estas, el valor de pH inicial de cada una medido en el laboratorio y el porcentaje de carbonatos determinado por titulación volumétrica.

Figura 7.25. Procedimiento Test ABA Modificado. Fuente: autores.



Figura 7.26. Determinación de pH y carbonatos totales en muestras de relaves de las plantas de beneficio de Zaragoza. Fuente: autores.

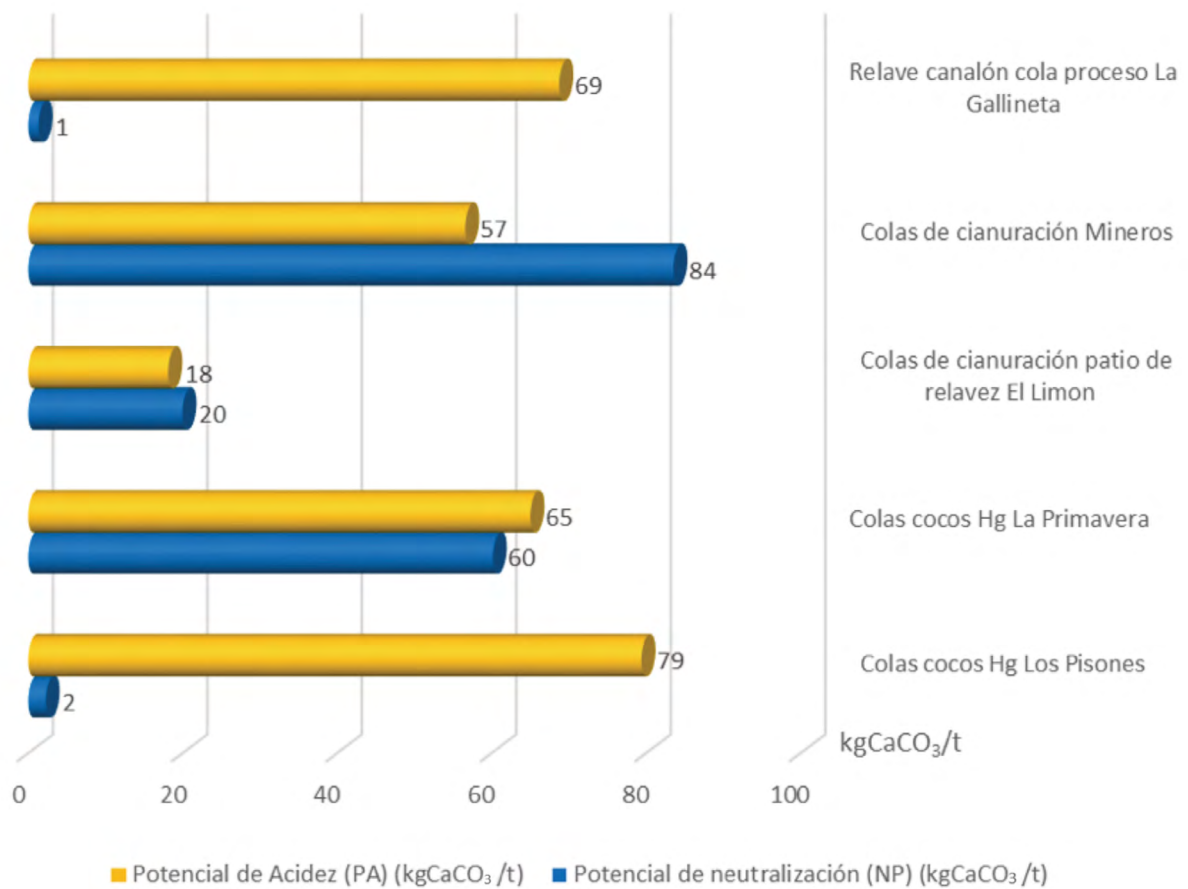
DESCRIPCIÓN	pH EN LABORATORIO (UNIDADES)	CARBONATOS (%) CaCO ₃
Colas cocos Hg Los Pisones	6,4	2,74
Colas cocos Hg La Primavera	8,38	5,35
Colas de cianuración patio de relaves El Limon	9,11	4,80
Colas de cianuración Mineros	8,98	9,55
Relave canalón cola proceso La Gallineta	6,08	1,91

En la figura 7.27 se presentan los resultados obtenidos del potencial de neutralización y el potencial de acidez, a partir de los cuales se establece el potencial neto de neutralización y se categoriza cada muestra como potencial o no potencial generadora de DAM.

Figura 7.27. Resultados obtenidos para el Test ABA. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN (NP) (kgCaCO ₃ /t)	POTENCIAL DE ACIDEZ (PA) (kgCaCO ₃ /t)	POTENCIAL NETO DE NEUTRALIZACIÓN (PNN) (kgCaCO ₃ /t)	CRITERIO (PN/PA)	RESULTADO
Colas cocos Hg Los Pisones	2,26	79,38	-77,12	0,03	Alto potencial de generación de DAM
Colas cocos Hg La Primavera	66,48	43,13	23,36	1,54	Bajo potencial de generación de DAM
Colas de cianuración patio de relaves El Limón	34,55	14,38	20,18	2,40	Bajo potencial de generación de DAM
Colas de cianuración Mineros	83,53	56,56	26,97	1,48	Bajo potencial de generación de DAM
Relave canalón cola proceso La Gallineta	1,32	68,75	-67,43	0,02	Alto potencial de generación de DAM

Figura 7.28. Resultados de aplicación de Test ABA modificado. Fuente: autores.



Con los resultados presentados en la figura 7.27 y en la figura 7.28 se evidencia un potencial de acidez elevado en las muestras analizadas de Los Pisones y La Gallineta que mantiene una correlación directa con los reportes de FRX presentados, en los cuales se observan concentraciones mayores de sulfuros polimetálicos y más bajas de carbonatos de magnesio y calcio en las plantas de minería de oro de Zaragoza.

Dado el resultado del potencial de acidez y el de neutralización, se tiene un potencial neto de neutralización, indicador del balance de acidez-basicidad, inferior a 20 kgCaCO₃/ton (CIMM T&S S. A., 2007) y una relación de estos inferior a 3, lo cual indica que las muestras tienen baja capacidad de neutralización de acidez (Morales, 2003). De manera que se espera que, debido a la exposición ambiental de los minerales presentes en los

relaves, se generen sustancias ácidas que solubilizan los metales contenidos en las rocas y drenen a fuentes hídricas cercanas, contaminándolas por la acumulación de metales pesados o por el pH bajo.

El relave de la planta Mineros (La Ye), La Primavera y El Limón presentan un bajo potencial de generación de DAM, dada su naturaleza básica (pH=8,98, 8,38 y 9,11 unidades, respectivamente) y su alto contenido de carbonatos (9,55 %, 5,35 % y 4,80 %) (ver figura 7.26), lo cual le confiere mayor capacidad buffer para neutralizar la acidez generada por la oxidación de minerales de azufre.

En estos casos el potencial neto de neutralización es mayor a 20 kgCaCO₃/ton, indicando que su potencial de generación de DAM es bajo. Estos resultados están relacionados con la presencia de carbonatos, los cuales reaccionan con el ácido generado por los sulfuros polimetálicos y neutraliza en cierto grado la acidez del medio.

El estudio petrográfico presentado en el capítulo de geología indica concentraciones bajas de sulfuros polimetálicos como pirita (FeS₂), en mayor proporción, esfalerita (ZnS), galena (PbS) y calcopirita (CuFeS₂) de tamaño más pequeño, a los cuales viene asociado, en gran medida, el oro; eventualmente, ocurre arsenopirita (FeAsS). De manera que el balance ácido base para Mineros (La Ye), La Primavera y El Limón, tiende a la basicidad.

7.4.5. CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS

La finalidad del muestreo de los vertimientos es hacer una estimación general de los posibles factos que estén generando un desequilibrio ambiental con el aporte de metales y la alteración del pH en las fuentes hídricas influenciadas. Por este motivo, como parámetro fundamental en la evaluación de este tipo de muestra, se hace una medición de pH *in situ* en el punto de toma, con el objetivo de hacer una identificación aproximada del estado e influencia en el sector por parte de los relaves o materiales residuales del procesamiento metalúrgico de donde proviene dicho vertimiento. Esta información es el principal insumo para enfocar la caracterización ambiental y tener una base comparativa con las pruebas ambientales de lixiviación y predecir la posible generación de drenajes ácidos, además de la movilidad de metales y solubilidad de sales que generen alcalinidad en el medio.

Uno de los análisis transversales a las diferentes pruebas ambientales es la FRX, la cual se aplicó a la fase sólida del vertimiento generado a partir de la relavera de la planta de beneficio de La Ye y, de acuerdo con los resultados obtenidos (figura 7.29.), este contiene como elementos mayores principalmente silicio, hierro y azufre, con valores de 15,94%, 9,72% y 5,31% respectivamente. Ello indica la movilidad de este tipo de elementos que también se encuentran contenidos en los relaves. Sin embargo, se observa que hay un incremento en la composición porcentual de azufre del 3,7 % y de hierro del 1,96 % que, por movilidad, posiblemente se deba a residual de sulfuros finos o a sulfatos de hierro. Por otra parte, se logró detectar un contenido de aluminio del 2,22 %, además de un 0,75 % de titanio, un 0,07 % de zinc y un 0,14 % de plomo, lo que indica la movilidad de metales pesados que pueden llegar a tener efectos ambientales en la quebrada San Pedro. Por último, se detectaron calcio y potasio como metales alcalinos que, en comparación con los relaves, muestran una disminución en su composición porcentual, por lo que se puede decir que la movilidad de estos últimos es limitada.

En cuanto a los elementos menores (figura 7.30.), se encontraron metales pesados como cobre (1275,05 ppm), manganeso (844,03 ppm), cromo (311,02 ppm), estaño (39,62 ppm) y antimonio (39,51 ppm), lo que evidencia su movilidad. Ello conduce a la acumulación en los sedimentos de la quebrada San Pedro, que es a donde se dirige este vertimiento. En adición, se detectó un contenido de oro y plata de 54,06 ppm y 175,78 ppm que se le puede atribuir a la movilidad de estos metales preciosos. Por último, el zirconio, el bario, el rubidio y el estroncio son elementos que normalmente se encuentran en los suelos y sedimentos.

Para identificar el factor de impacto de los vertimientos se tiene como referencia los parámetros ambientales establecidos por la resolución para vertimiento (Resolución n.º 631 de 2015) a partir de la cual se toman como analitos de interés para este estudio ambiental el contenido de compuestos como cianuro total (que no fue detectado en los vertimientos), y metales como plata, hierro, zinc, plomo, cadmio, cromo y níquel, que exhibieron concentraciones por debajo del límite máximo permitido. Para el cobre, sí se cuantificó una concentración que supera levemente el límite establecido por la norma ambiental (figura 7.31.). El mercurio,

Figura 7.29. Composición de elementos mayores en el vertimiento tomado después de relaves de la Ye determinados por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.

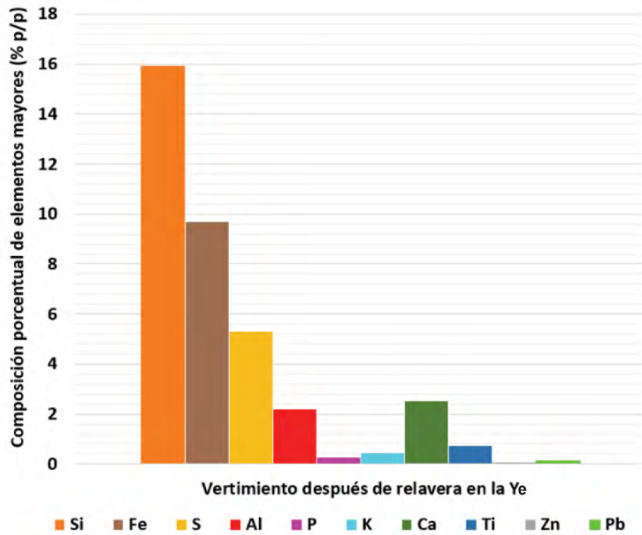
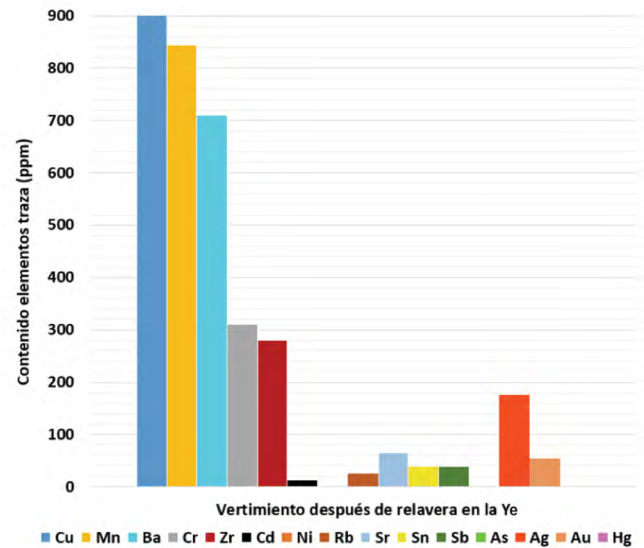


Figura 7.30. Contenido de elementos menores en el vertimiento tomado después de relaves de la Ye determinados por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



que es el metal de mayor interés por su característica de metal pesado-bioacumulable, no presentó movilidad en la fase líquida de los vertimientos, aunque sí un contenido considerable en la fase sólida de uno de los vertimiento (figura 7.32.).

Figura 7.31. Contenido de metales de interés ambiental en los vertimientos muestreados en el municipio de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	mg/L							
	Ag	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
Vertimiento de planta - mina El Limón	0,002	1,00	0,287	0,104	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.
Vertimiento de planta - mina La Ye	0,130	2,25	0,641	0,250	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

Figura 7.32. Determinación de mercurio en vertimientos por espectrofotometría de absorción atómica – generación de hidruros. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	PLANTA ASOCIADA	Hg	UNIDADES
Vertimiento Relavera de Planta-Mina El Limón	Mina El Limón	D.L.C.	µg/L
Vertimiento después de Relavera Planta-mina La Ye (Fase líquida)	Planta-Mina la Ye	D.L.C.	µg/L
Vertimiento después de Relavera Planta-mina La Ye (Fase Sólida)	Planta-Mina la Ye	5,26	mg/kg

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

En la zona de Zaragoza se hizo el muestreo de dos puntos de vertimiento, el primero se tomó en los relaves de la planta de beneficio El Limón, con un pH de 8,68, y el segundo vertimiento se recolectó de los relaves de la planta de procesamiento de La Ye, esta muestra está compuesta de una fase líquida que tiene un pH de 9,17 y una fase sólida caracterizada por FRX y EAA. Se puede observar que los valores de pH son básicos, por lo tanto, un factor directamente proporcional es que no se presente movilidad significativa de las especies metálicas mencionadas en el medio líquido. En el caso del vertimiento de El Limón, el plomo, el cadmio, el cromo y el níquel no fueron detectados; la técnica empleada fue la EAA de llama, con un límite de detección de 0,2 mg/L. No obstante, de estos cuatro metales, el plomo y el cromo se presentan en la caracterización por FRX de las colas de donde proviene dicha muestra y tiene una concentración de 714,45 ppm y 141,85 ppm, respectivamente; por su pH, la movilidad no se genera. Con respecto al cobre (1,00 ppm), el hierro (0,287 ppm), el zinc (0,104 ppm) y la plata (0,002 ppm), las concentraciones son muy bajas, cumpliendo con la normatividad; en comparación con la presencia del hierro, el zinc y el cobre en las colas de procesamiento, la movilidad es mínima. La FRX para las colas de El Limón dieron como resultado: hierro con el 3,68 %, zinc con 1026,3 ppm y cobre con 21,7 ppm (Aduvire, 2006).

Al igual que en los otros metales, el pH ejerce la misma influencia en el mercurio, que es el analito de principal interés. Esta correlación que se puede confirmar en la figura 7.32, donde se reporta que no se presenta concentración de mercurio en los vertimientos líquidos y que, aun teniendo una concentración de 5,26 ppm la fase sólida del vertimiento de La Ye, la fase líquida no detectó concentración del metal (valor que sobrepasa el límite máximo establecido de 0,002 ppm por la Resolución n.º 631 de 2015); la técnica para determinar el mercurio fue la EAA, generador de hidruros GH-AAS, con límite de cuantificación de 2,0 ppb, equivalente a 0,002 ppm. Lo anterior se relaciona con la baja estabilidad del metal en este medio y que favorece su precipitación.

Haciendo la comparación con los demás metales, en la fase líquida del vertimiento de La Ye no se detecta concentración de plomo, cadmio, cromo y níquel, aunque los contenidos tanto en las colas como en la fase sólida del vertimiento por FRX para el plomo arrojan valores de 358,27 ppm y 1514,4 ppm, respectivamente. Para cromo, se determinaron concentraciones de 220,27 ppm y 311,02 ppm. De los metales que se cuantificaron en la fase líquida está el cobre (2,25 ppm), el hierro (0,641 ppm), el zinc (0,250 ppm) y la plata (0,130 ppm). De los cuatro metales, solamente el cobre supera el límite máximo establecido por la normatividad ambiental (Resolución n.º 631 de 2015). Aunque en el material de las colas y la fase sólida del vertimiento se presentaron concentraciones altas para el hierro (del 7,76 % al 9,72 %), el cobre (de 381,64 ppm a 1275,05 ppm) y el zinc (entre 417,59 ppm y 700,07 ppm), en comparación con estos valores, no se generó presencia relevante en la fase líquida del vertimiento (Pinzón, et al.Ospina y Chávez, 2009).

La presencia de mercurio en bajas concentraciones en los vertimientos relacionadas con los procesos de beneficio debe considerarse como un indicador para prevenir el uso del metal y la contaminación de fuentes hídricas relacionadas. Esto se debe a que, en general, todas las formas de mercurio que entran en los sistemas acuáticos pueden convertirse en metilmercurio, el cual puede ser directamente bioacumulado por organismos acuáticos y biomagnificado a través de la cadena alimenticia; de manera que es posible que esta contaminación afecte la flora y fauna circundante.

En las determinaciones de cianuro libre y cianuro complejo en los vertimientos muestreados, no fue cuantificable la concentración del analito para las especies ya mencionadas (figura 7.33.). Este resultado es un indicador favorable, ya que evidencia que no se estarían generando complejos metálicos con este anión (CN⁻), principalmente los que se generan con el mercurio (Hg(CN)₂ y Hg(CN)₄), los cuales son estables y de difícil remoción.

Figura 7.33. Contenido de metales de interés ambiental en los vertimientos muestreados en el municipio de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.

PLANTA ASOCIADA	CN ⁻ LIBRE (mg/L)	CN ⁻ Total (mg/L)
Vertimiento Relavera de Planta - mina El Limón	D.L.C.	D.L.C.
Vertimiento después de Relavera Planta - mina La Ye	D.L.C.	D.L.C.

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

Es evidente que se tiene un tratamiento para las colas cianuradas en la planta de beneficio de La Ye, lo cual se refleja en la ausencia de cianuro en el vertimiento, pero los procesos deben seguir este control para evitar la contaminación y, principalmente, la formación del complejo mencionado (Hg(CN)₂ y Hg(CN)₄), ya que tienen el medio ideal para dicha reacción. Esto se advierte, dado que la fase sólida del vertimiento presenta mercurio (5,26 ppm); además, el pH de la fase líquida del vertimiento es alcalina (pH= 9,17), condiciones estables para el cianuro y la formación del complejo (Nava, Elorza-Rodríguez y Uribe-Salaset al., 2007).

Figura 7.34. Mapa de ubicación de muestras y datos zona Oro Verde. Fuente: autores.

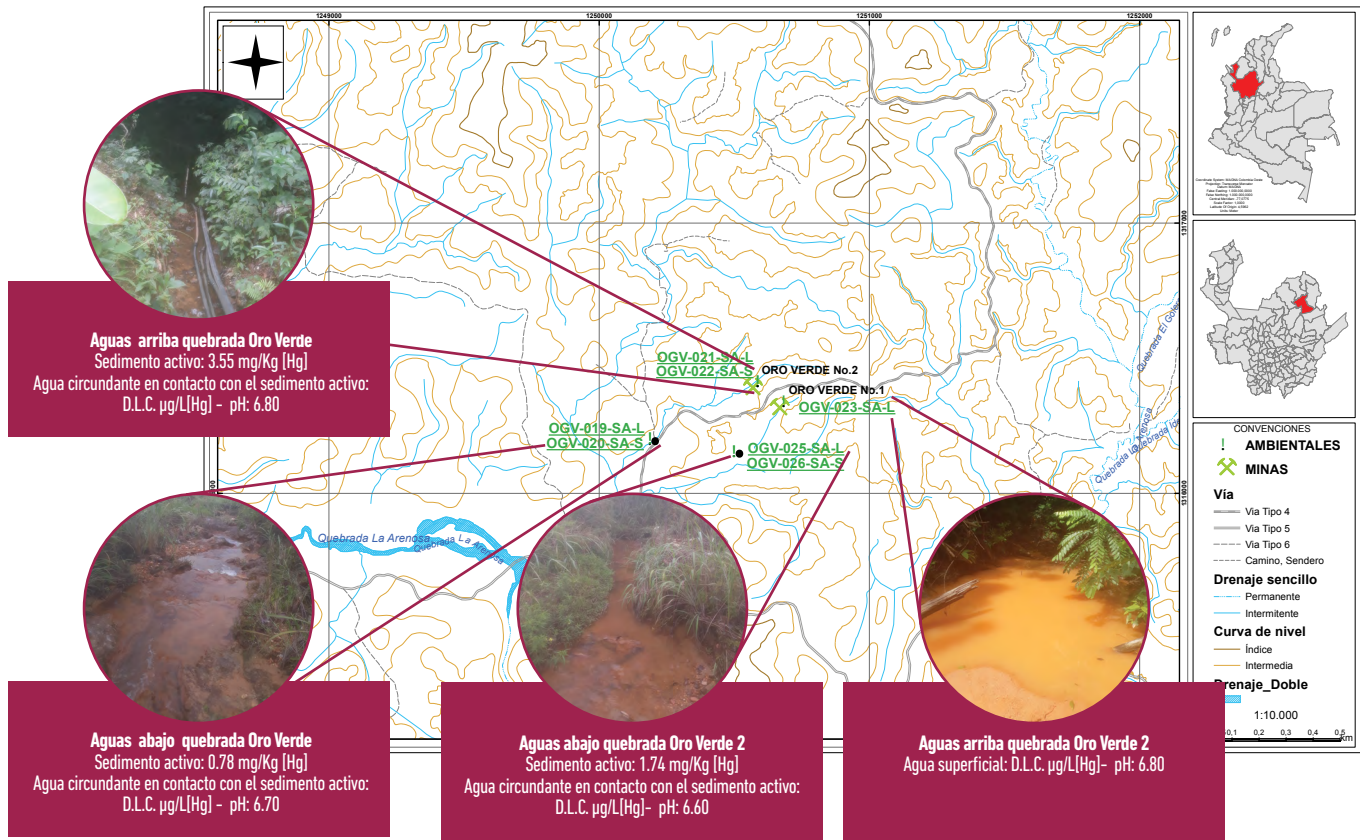


Figura 7.35. Mapa de ubicación de muestras y datos zona Pisones. Fuente: autores.

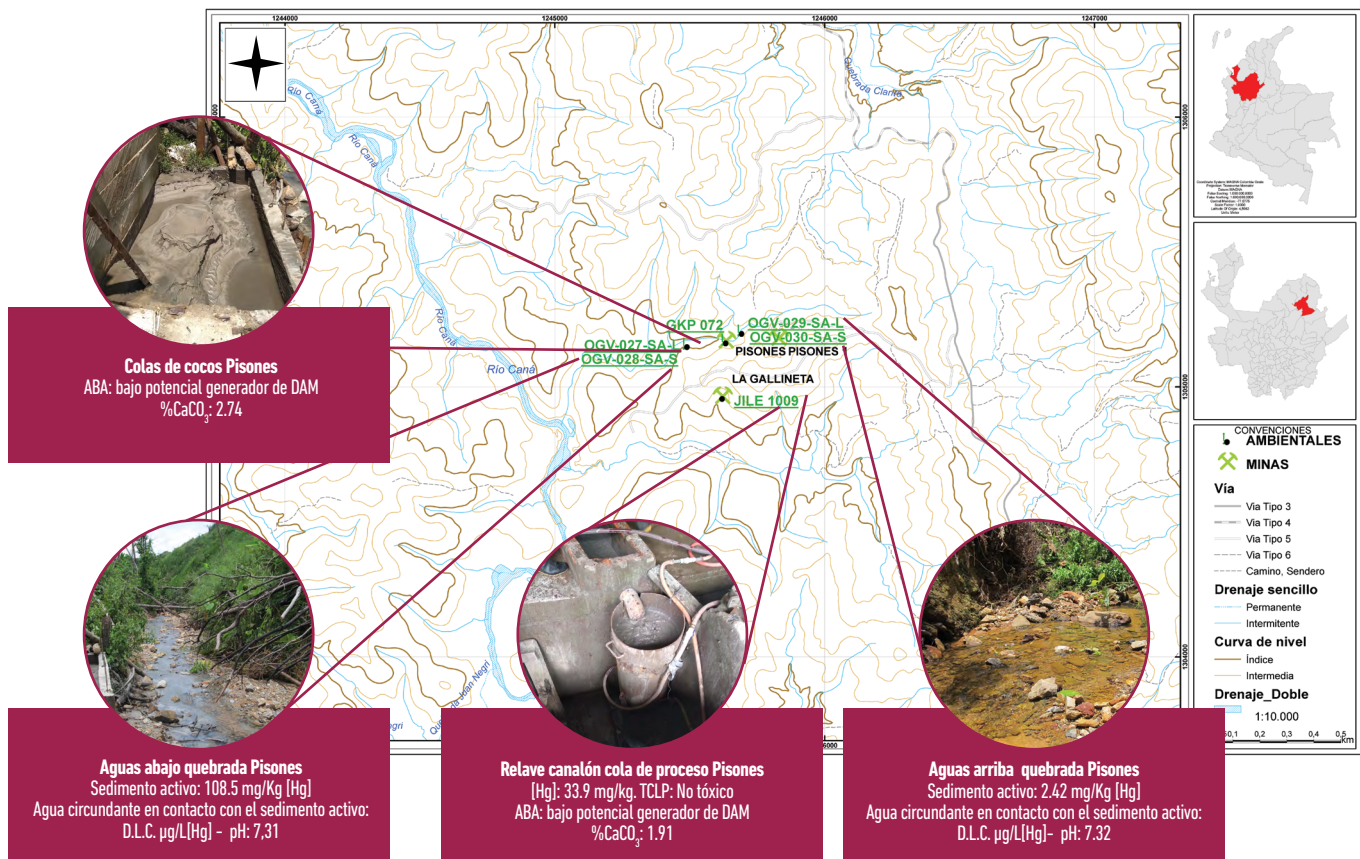


Figura 7.36. Mapa de ubicación de muestras y datos zona EL Limón. Fuente: autores.

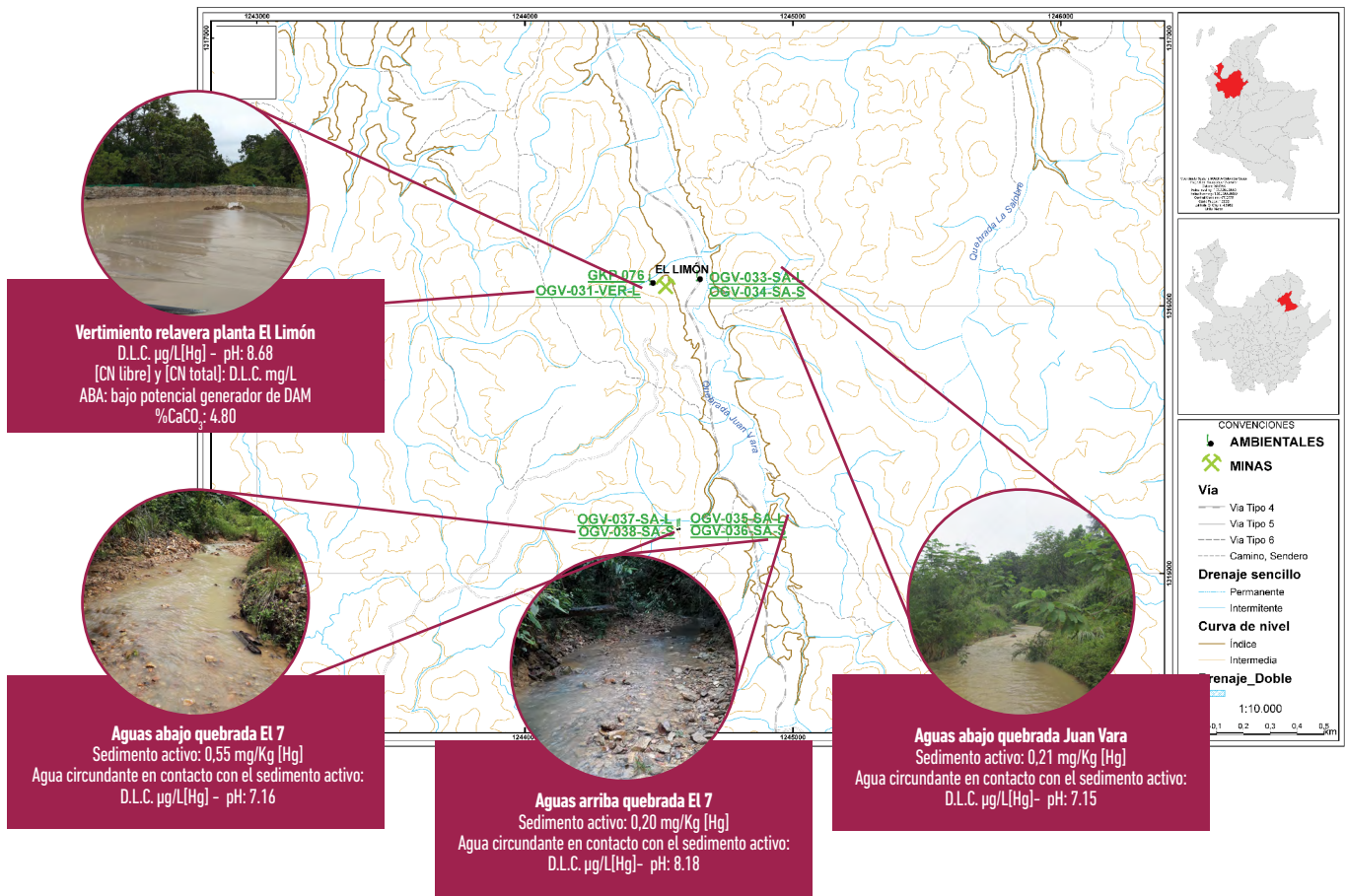


Figura 7.37. Mapa de ubicación de muestras y datos zona La Primavera. Fuente: autores.

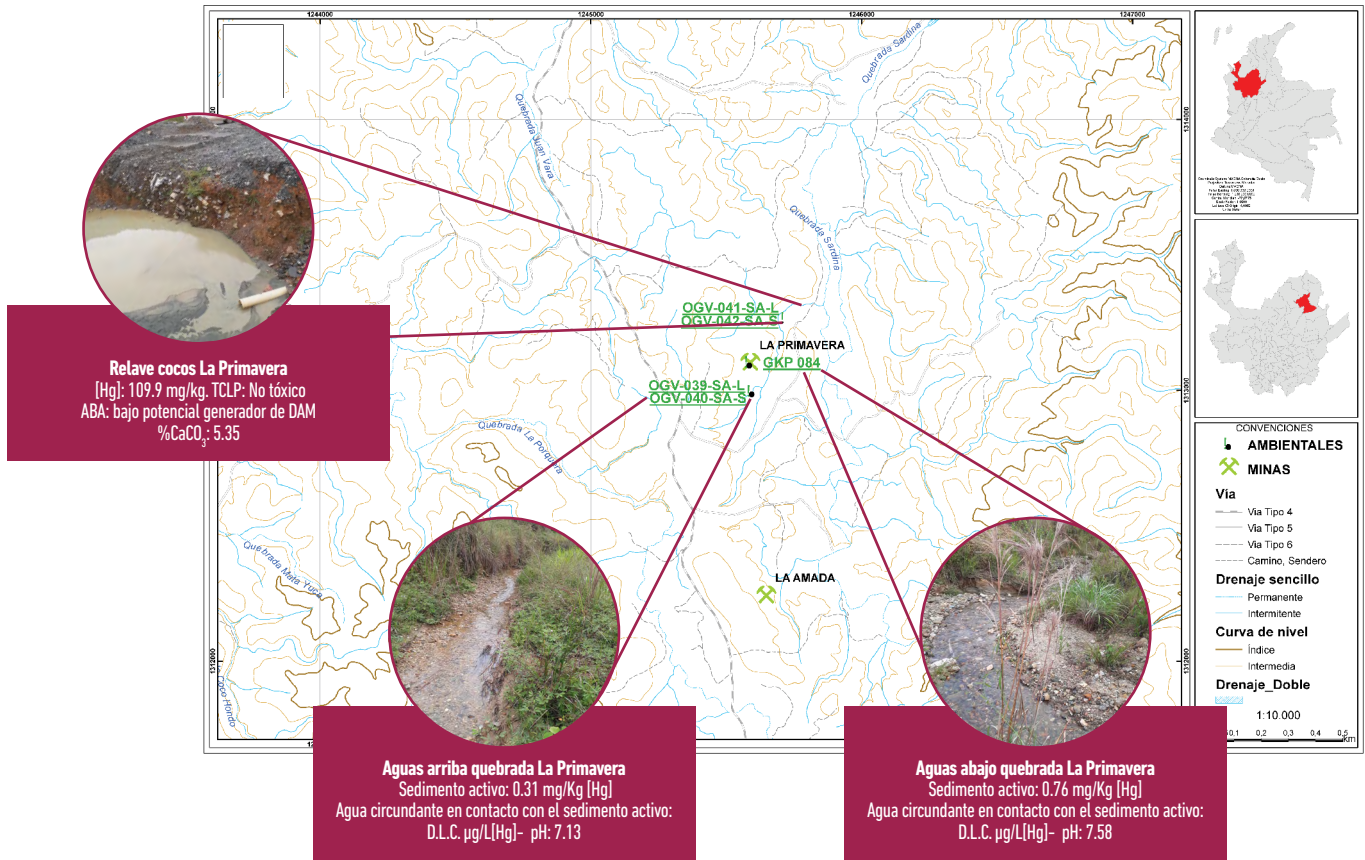
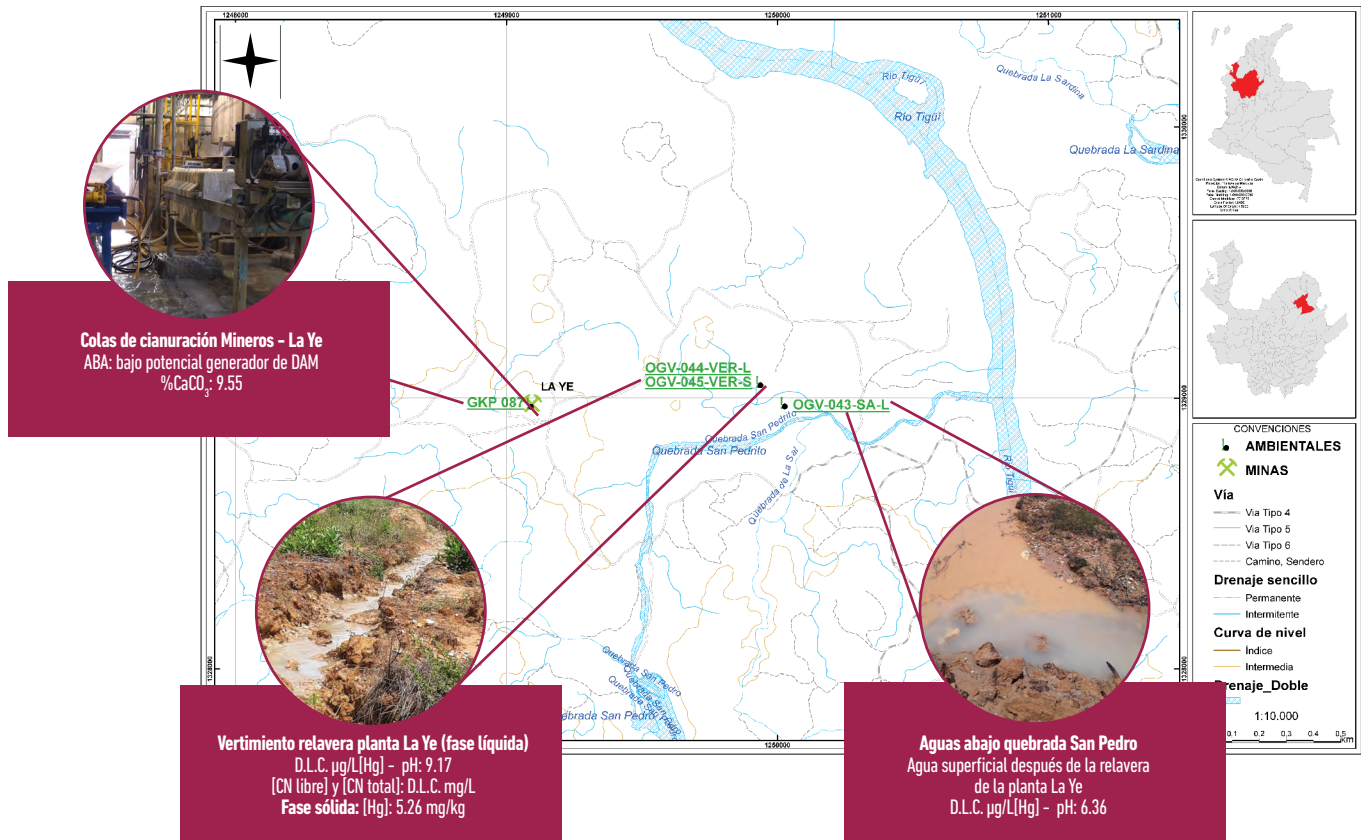


Figura 7.38. Mapa de ubicación de muestras y datos zona La Ye. Fuente: Autores.



7.5. CONCLUSIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

- A partir de los ensayos químico-ambientales, se logró identificar un potencial de acidez elevado aportado por los sulfuros polimetálicos presentes en los relaves de La Gallineta y Los Pisones; estos sufren procesos de oxidación y posterior formación de ácido sulfúrico que modifican el pH natural de las fuentes de agua a las cuales dreña, y afecta la fauna, la flora y el paisaje. Aunque existen concentraciones apreciables de carbonatos, estos no son capaces de neutralizar la acidez generada.
- Dado el resultado del potencial de acidez y el de neutralización de las muestras tomadas en La Primavera, El Limón y Mineros (La Ye), se tiene un potencial neto de neutralización mayor a 20 kgCaCO₃/ton, lo cual indica que las muestras tienen alta capacidad de neutralización de acidez; esto se da debido a que las concentraciones sulfuros reactivos son bajas y a que hay presencia importante de carbonatos que actúan como buffer.
- El contacto directo de los relaves con agentes ambientales como el agua, proveniente de las precipitaciones, y la naturaleza ácida de los minerales presentes en ellos, facilita la movilidad de los cationes metálicos presentes. Debido a ello, y a la luz de la normatividad colombiana, es necesario evaluar su disposición y mitigar el impacto ambiental que generan, dada su toxicidad. Al realizar la prueba de TCLP se encontró que ninguna de las muestras analizadas presenta característica de tóxicas, puesto que el cadmio, el cromo y la plata no fueron detectados por la técnica de EAA; por su parte, el mercurio y el plomo se encuentran en concentraciones inferiores a los límites permisibles establecidos en el Decreto 4741 de 2005.
- La cuantificación de metales por EAA para la caracterización de los relaves de La Gallineta y La Primavera evidenció la presencia de plomo y zinc en mayor proporción, superando en ambos casos las recomendaciones dadas por la EPA y otros autores para evitar afectaciones al ambiente, a los recursos, al agua y al suelo, principalmente. En el caso de la muestra del relave de La Primavera, las concentraciones de zinc y plomo son superiores a los de La Gallineta. Por otro lado, se resalta la concentración de mercurio asociado a actividades antropogénicas y en menor proporción a factores geogénicos; en ambos casos los valores obtenidos superan los límites recomendados, por lo que representan un potencial riesgo para la salud de los mineros que están en contacto con estos residuos y para las plantas y los animales alrededor. Asimismo, se evaluó la ocurrencia de cadmio y cromo provenientes de la mineralización de la zona, los cuales son metales con capacidad de bioacumulación y que pueden generar efectos tóxicos en organismos vivos cuando se hallan en elevadas concentraciones.
- El análisis de mercurio en los sedimentos activos de las quebradas El 7, Los Pisones y La Primavera confirmó la presencia de este analito en concentraciones más altas aguas abajo de la actividad minera que antes del proceso. En el caso de Oro Verde, los niveles de mercurio más altos se presentaron aguas arriba de la planta y esto se asoció a la conformación de un represamiento natural en el cual se concentraba el mercurio de origen geogénico; posterior a este punto, los niveles de mercurio cuantificados se relacionaron con los vertimientos de los procesos de Oro Verde 1 y 2. Considerando que el valor de referencia del nivel de efecto umbral (TEC) es de 0,18 mg/kg, es probable que aguas arriba y aguas abajo de El Limón, La Primavera y Oro Verde exista una afectación a los organismos acuáticos, pues, en los

De acuerdo con los resultados mostrados por FRX se aprecia un contenido de elementos pesados y tóxicos que aunque sean de origen geogénico, están presentando movilidad hacia las quebradas a través de los procesos de beneficio de oro por parte de minería actual, con falta de desarrollo, que al final no están controlando de manera apropiada aquellos elementos, permitiendo que se viertan a los caudales.

casos mencionados, se supera el valor establecido. En la quebrada Los Pisones, después del proceso de la planta del mismo nombre, la concentración de mercurio se incrementa significativamente, superando el valor del de TEC.

- La concentración de mercurio en vertimientos líquidos muestreados en la relavera de El Limón y La Ye estuvo por debajo del límite de cuantificación por la técnica de EAA con generador de hidruros GH-AAS. Esto podría deberse a la naturaleza básica de la zona que reduce la solubilidad de metales en el agua y estos tienden a precipitarse a la fase sólida, como es el caso del vertimiento tomado en la relavera de La Ye, en cuya fase líquida no hubo concentración cuantificable de mercurio, pero sí en la fase sólida. De igual forma ocurre con los resultados de la cuantificación de mercurio en el agua circundante en contacto con los sedimentos activos, que estuvieron por debajo del límite de cuantificación, relacionándose este hecho con el medio alcalino de las muestras.
- De acuerdo con los resultados mostrados por FRX, se aprecia un contenido de elementos pesados y tóxicos que, aunque sean de origen geogénico, presentan movilidad hacia las quebradas a través de los procesos de beneficio de oro por parte de la minería actual, con falta de desarrollo, que al final no está controlando de manera apropiada aquellos elementos, permitiendo que se viertan a los caudales.

7.6. RECOMENDACIONES

- Los depósitos de relaves, al contener metales pesados como arsénico, plomo, mercurio, cromo, zinc, cadmio, entre otros, son intrínsecamente peligrosos para la salud y el ambiente. En contacto con los cauces de ríos todos los compuestos tóxicos presentes pueden generar efectos graves a la biodiversidad. Dadas las condiciones en las cuales se encuentran los depósitos de relaves del proceso de beneficio del oro, se recomienda el diseño de áreas destinadas para tal fin con la infraestructura adecuada para evitar la exposición de minerales a los fenómenos ambientales como las precipitaciones y de meteorización que promueven la generación de DAM, así como la movilidad de metales pesados y pérdida de la biodiversidad debida a agentes contaminantes.
- Existen algunas opciones en estudio para contrarrestar los impactos ambientales de los relaves como la fitorremediación, la fitoestabilización y el reprocesamiento de minerales; de manera que se recomienda realizar investigaciones en estas áreas.

Existen algunas opciones en estudio para contrarrestar los impactos ambientales de los relaves como la fitorremediación, la fitoestabilización y el reprocesamiento de minerales; de manera que se recomienda realizar investigaciones en estas áreas.

8. 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.

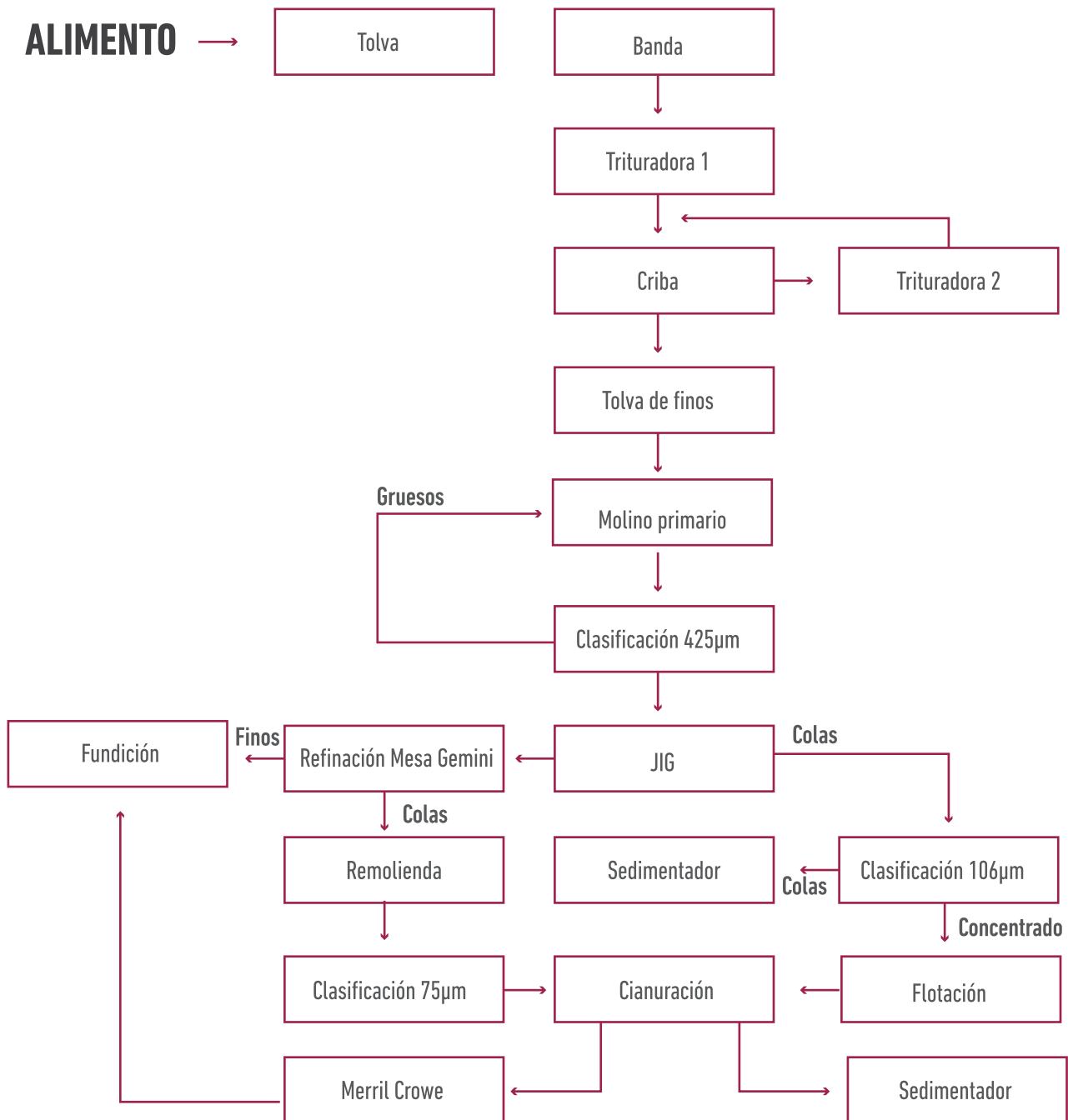
Panorámica de planta de beneficio en la zona minera de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Jaime Mojica, Servicio Geológico Colombiano



8.1. PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO

Se presenta la ruta metalúrgica propuesta, en donde se utilizan procesos gravimétricos en los que se involucra la refinación de concentrados en una etapa, el cual se obtiene por medio de concentración centrífuga operada bajo condiciones de tamaño de partícula controladas. Los concentrados obtenidos van a una etapa de refinación en una mesa Gemini para obtener el superconcentrado para fundición. Paralelamente, los rechazos de la concentración en JIG son sometidos a flotación y sus concentrados pasan a una etapa de lixiviación con cianuro de sodio, junto con los rechazos de refinación y colas del centrífugo. El oro lixiviado es precipitado por medio del Merrill-Crowe para su posterior fundición (figura 8.1.).

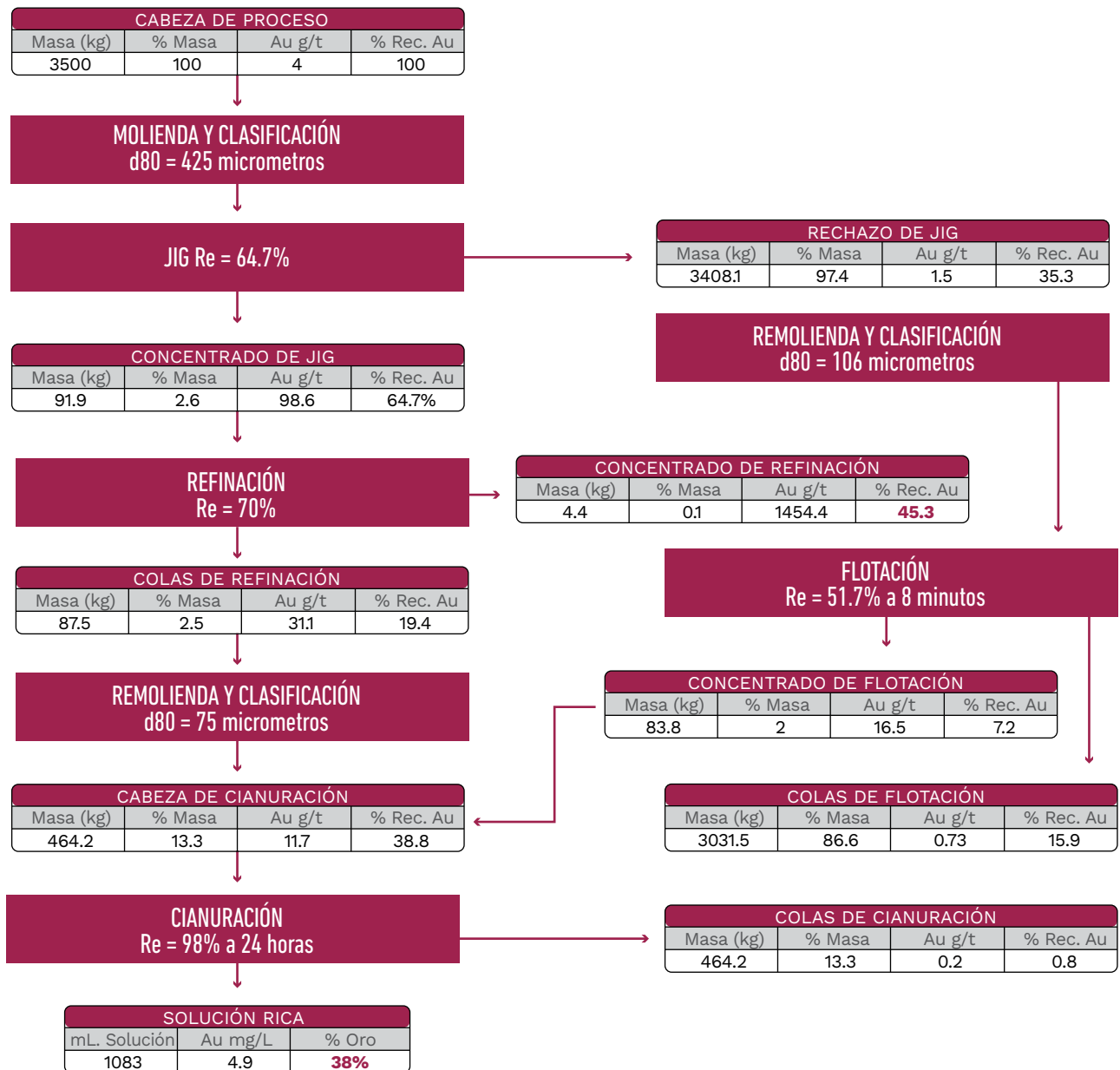
Figura 8.1. Proceso de beneficio sugerido para la zona minera de Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.



8.2. BALANCES DE MATERIA DE LOS PROCESOS SUGERIDOS

Se presentan el diagrama de flujo sugerido con el balance de materia que permite visualizar y tener control de la cantidad de mineral de entrada y salida, así como de oro procesado en cada etapa del circuito de beneficio (figura 8.2.).

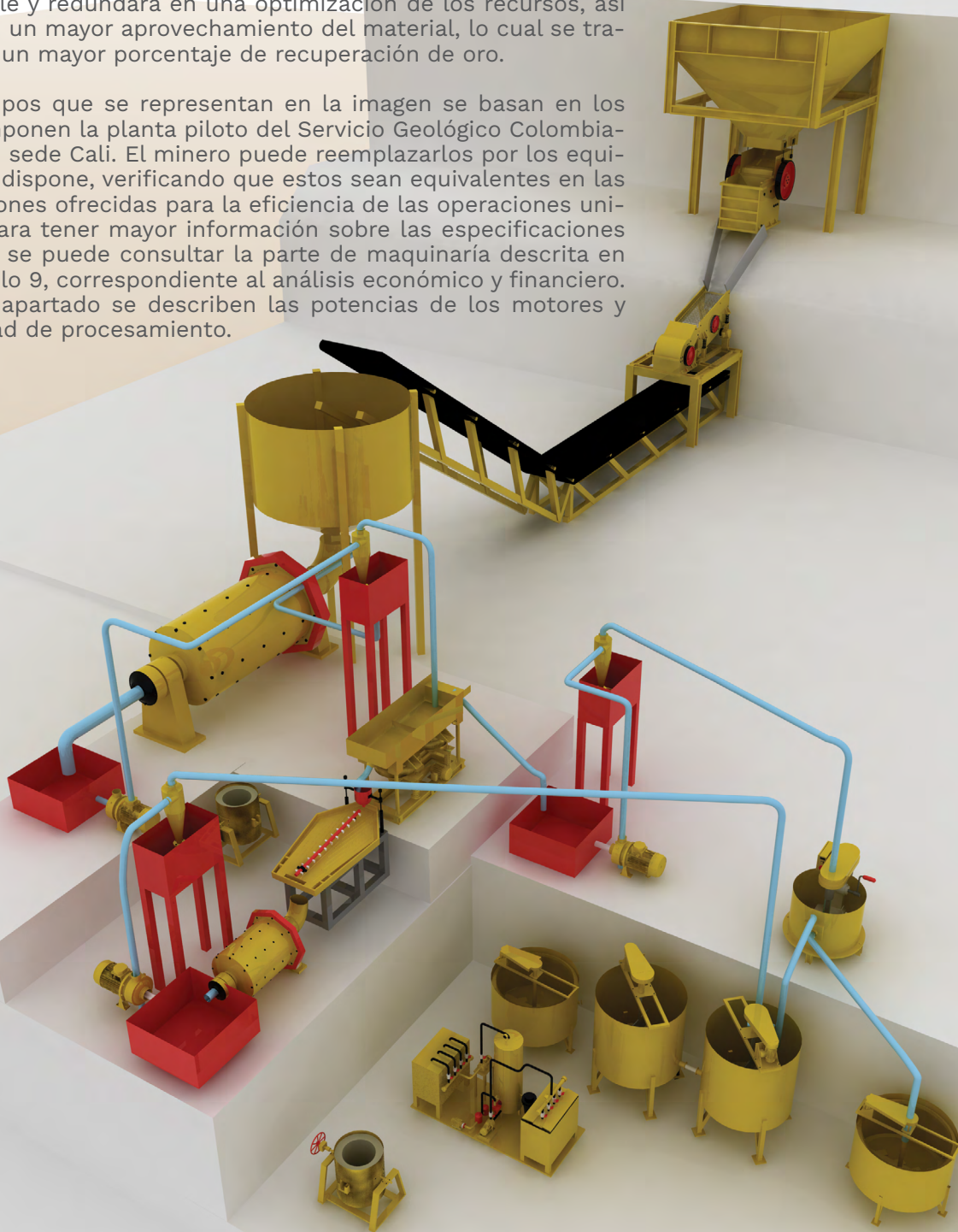
Figura 8.2. Balance de materia para el rproceso sugerido en Zaragoza (Antioquia). Fuente: autores.



8.3. MONTAJE DE LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

La imagen muestra una aproximación a la configuración de la planta de beneficio que se requiere para seguir los pasos de la ruta metalúrgica sugerida; además, abarcan los equipos que componen la planta de beneficio. Esto permitirá la eliminación del mercurio, lo que hará que el proceso sea ambientalmente sostenible y redundará en una optimización de los recursos, así como en un mayor aprovechamiento del material, lo cual se traduce en un mayor porcentaje de recuperación de oro.

Los equipos que se representan en la imagen se basan en los que componen la planta piloto del Servicio Geológico Colombiano en su sede Cali. El minero puede reemplazarlos por los equipos que dispone, verificando que estos sean equivalentes en las prestaciones ofrecidas para la eficiencia de las operaciones unitarias. Para tener mayor información sobre las especificaciones técnicas se puede consultar la parte de maquinaria descrita en el capítulo 9, correspondiente al análisis económico y financiero. En este apartado se describen las potencias de los motores y capacidad de procesamiento.

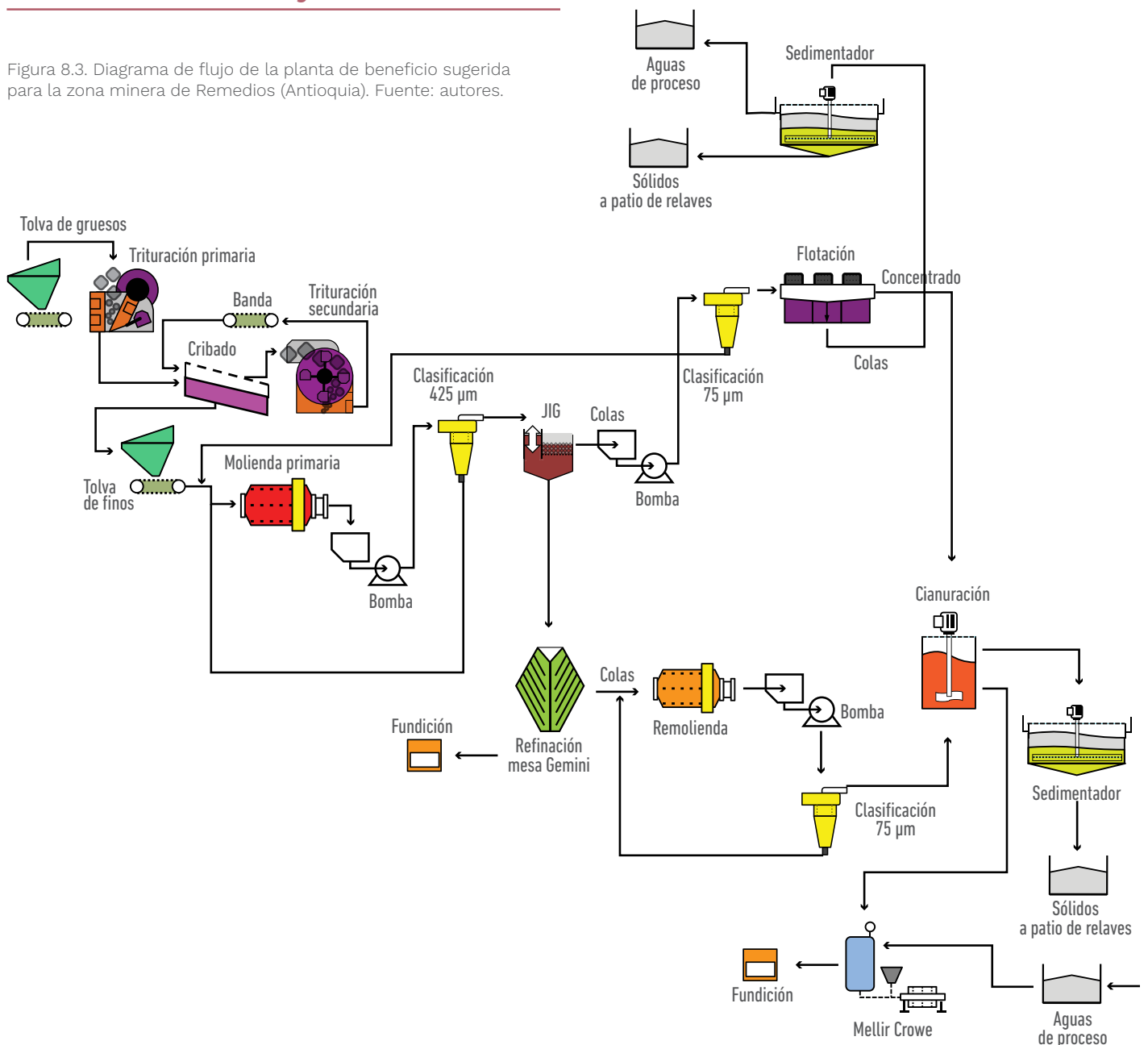


8.4. DIAGRAMA DE FLUJO CORRESPONDIENTE A LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

Para tener mayor información sobre las especificaciones técnicas se puede consultar la parte de maquinaria descrita en el capítulo 9, correspondiente al análisis económico y financiero.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la planta de beneficio que se implementaría en la zona minera, con sus respectivas líneas de entradas y salidas de cada operación unitaria. Este diagrama responden a la ruta metalúrgica propuesta y al montaje de la planta sugerida.

Figura 8.3. Diagrama de flujo de la planta de beneficio sugerida para la zona minera de Remedios (Antioquia). Fuente: autores.



Convenciones

SÍMBOLO	MÁQUINA	FOTOGRAFÍA
	TOLVA	
	TRITURADORA DE QUIJADAS	
	CRIBA VIBRATORIA	
	MOLINO CHILENO	
	MOLINO DE BOLAS	
	HIDROCICLÓN	
	BANDA TRANSPORTADORA	
	MERRIL CROWE	
	CELDA DE FLOTACIÓN CIRCULARES	
	TANQUE DE COLAS	

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

8.5. CONCLUSIONES METALÚRGICAS ACERCA DE LAS OPERACIONES ACTUALES

- Se obtuvo una recuperación neta de oro del 83,3 %, con el método extractivo propuesto.
- El método extractivo propuesto consiste fundamentalmente de una molienda relativamente gruesa ($d_{80} < 425 \mu\text{m}$) del material de proceso, seguida de una concentración gravimétrica para la separación de los sulfuros de los silicatos y posterior recuperación del oro bajo sucesivas refinaciones del concentrado; en este paso se obtiene cerca del 50 % del oro.
- El mineral presenta una buena respuesta a la concentración en mesa, pero el oro de tamaño pequeño no responde a este tipo de concentración gravimétrica y es necesaria la aplicación de la flotación y la cianuración para recuperarlo en su mayor parte. Se cianuran rechazos de refinación de concentrados gravimétricos y concentrados de flotación de rechazos gravimétricos.
- Los sulfuros metálicos se presentan de manera diluida en el material de veta. A un tamaño de 425 micrones prácticamente todos los sulfuros están como partículas libres (sin asociación).
- Para la precipitación del oro con zinc hay que tener controlada la cantidad de zinc soluble en la solución.
- En cuanto al cianuro libre y total en las soluciones de rechazo no se aprecian tratamientos de descomposición de este componente. Hay que advertir del perjuicio que tiene particularmente el cianoaurato de mercurio generado al combinarse colas de amalgamación con el proceso de cianuración

Con respecto a la reducción de tamaño

- El circuito de reducción de tamaño que se acostumbra en la zona consistente en trituradora de quijadas-molino primario y barriles amalgamadores. Al no haber clasificación del producto de molienda, muchas partículas de tamaño excesivo van a la concentración, distorsionando la operación. Se plantea una preparación del material sometiéndolo a una reducción de tamaño secuencial, primero con la trituradora de mandíbulas, seguido por el pulverizador que puede ser de martillo y siguiendo con la molienda en molino de bolas.
- La molienda primaria puede llevarse a cabo teniendo como una clasificación de control a un tamaño de grano de $425 \mu\text{m}$. Se sugiere que la molienda secundaria, a un tamaño menor a $75 \mu\text{m}$, se aplique para los minerales que se van a flotar y a cianurar.

Con respecto a la concentración gravimétrica

- La recuperación promedio en la mesa fue del 64 %, con razones de concentración de 18 veces.
- La ganga que saca la concentración por mesa en las colas equivale al 97 %, aproximadamente de la masa total procesada.
- El material neto de rechazo de la operación de concentración gravimétrica contiene el 36 % del oro. Debe molerse a un d_{80} por lo menos de $75 \mu\text{m}$ antes de someterlo al proceso de flotación.

Con respecto a la concentración por flotación

- Las recuperaciones de las flotaciones de los rechazos de concentración gravimétrica por mesa Wilfley de la planta Oro Verde fueron excelentes, ya que oscilan entre el 89 % y el 93%.

- Las concentraciones por flotación de los rechazos de mesa Wilfley de la planta La Primavera fueron regulares (41 % y 54 %), esto debido a que el oro se encontraba incluido en sulfuros parcialmente oxidados. Estas bajas recuperaciones también se atribuyen a que el oro que entró al proceso de flotación era de gran tamaño, alrededor de los 400 μm x 150 μm , 200 μm x 80 μm y 450 μm x 200 μm .

Con respecto a la cianuración

- Las cianuraciones de la planta de beneficio de La Primavera arrojaron recuperaciones muy altas, alrededor del 98 % de lixiviación del oro que entra a este proceso químico.
- La cianuración de los concentrados de flotación de la planta Oro Verde fue regular, debido a que había una refractariedad del oro, al estar incluido en sulfuros; la refractariedad del oro se debió a su gran tamaño (110 μm x 60, 130 μm x 100, 120 μm x 30 μm , 100 μm x 20 μm), el cual se encontraba parcialmente atacado por el cianuro.

8.6. CONCLUSIONES ACERCA DE LA SUSTITUCIÓN DE LA AMALGAMACIÓN

- En la zona se encuentran las técnicas alternativas para la abolición del mercurio, en plantas desarrolladas. Los resultados de tenor obtenidos de las muestras tomadas en estas plantas son resultados similares a los obtenidos en este documento bajo la ruta metalúrgica propuesta.
- La recuperación de oro con el método alternativo propuesto se incrementa en 2 veces con respecto al método actual de amalgamación utilizado.

La recuperación de oro con el método alternativo propuesto se incrementa en 2 veces con respecto al método actual de amalgamación utilizado.

8.7. CONSIDERACIONES SOBRE LAS PLANTAS DE BENEFICIO EN LA ZONA ESTUDIADA

- Respecto a las plantas de beneficio de la zona de Zaragoza y los procesos metalúrgicos encontrados en dichas plantas, es posible afirmar que existe una diversidad en los equipos y procesos que se aplican al beneficio del mineral aurífero. Existen plantas de beneficio como la de Oro Verde o Los Pisones, donde se utilizan barriles y no se tienen procesos de concentración y cianuración propiamente dichos, en contraste con plantas como la de La Ye (Mineros S. A.), donde se encuentran procesos metalúrgicos sofisticados, como la flotación flash, concentración centrífuga y cianuración intensiva. Esto muestra que existe una desigualdad en términos de capacidad técnica y conocimiento, no solo respecto al mineral beneficiado, si no en cuanto al conocimiento y manejo de los diferentes procesos aplicados en la actualidad en el beneficio de minerales auríferos.
- Lo anteriormente dicho influencia de forma directa la capacidad y recuperación de oro de las diferentes plantas visitadas. Una planta de pequeño porte puede beneficiar entre 8 y 20 ton/día, en turnos de 8 h/día, mientras que una planta de porte medio llega a beneficiar 480 ton/día en 3 turnos de 8 h/día. Las plantas de pequeño porte aprovechan para su beneficio minerales de veta con mayor tenor, evitando la

dilución de la cabeza de proceso; así, fue posible encontrar tenores de cabeza con valores superiores a 3,69 g/ton de oro, con máximos de hasta 44 g/ton de oro. Entretanto, las plantas de porte medio operan con tenores de cabeza menores, entre 1,3 y 3,68 g/ton de oro, siendo el gran volumen de mineral beneficiado lo que hace que dichas operaciones se tornen rentables.

- Adicionalmente, durante el muestreo de las plantas de beneficio de la zona de Zaragoza se observó una alta proporción de minerales de ganga como cuarzo y alúmino-silicatos en las muestras de cabeza de proceso. Los resultados de caracterización de la densidad e índice de trabajo de Bond WI corroboran la anterior información, así como los resultados por análisis de FRX. Adicionalmente, la densidad y el WI de las diferentes muestras de la zona de Zaragoza se muestran bastante próximos, a excepción de la mina La Primavera, que contiene partículas de minerales líticos en la ganga.

8.8. RECOMENDACIONES METALÚRGICAS

- Mejorar la operación de reducción de tamaño mediante la integración de una etapa de pulverización entre la trituradora de mandíbulas y el molino primario.
- Mejorar las operaciones de concentración gravimétrica, haciendo énfasis en el tamaño de la partícula del material e implementar otro medio gravimétrico como la mesa Wilfley, el JIG o los centrífugos.
- Establecer las condiciones de la cianuración de los concentrados de los materiales de mina de la zona, a las cuales se desarrolle con la mayor efectividad posible.
- Basarse en estudios mineralógicos, ya que aportan información efectiva para predecir qué porcentaje del oro es propenso a concentrar por gravimetría. Así como la identificación de los minerales que podrían presentar problemas en los procesos siguientes del beneficio.
- La zona minera en general, y las plantas de beneficio en particular, requieren de laboratorios para medir y controlar operativamente sus procesos.
- Mientras menos se mezcle el material de filón con el material de roca encajante es mucho mejor para el proceso en planta, ya que no se diluye el tenor de oro y es menor la proporción de material inerte en el proceso.
- Hay que hacer una descomposición exhaustiva del cianuro, tanto libre como el complejo en los rechazos de las plantas de cianuración. La mejor opción es la recirculación de las soluciones remanentes, teniendo especial cuidado en las especies que la pueden ir neutralizando.

Establecer las condiciones de la cianuración de los concentrados de los materiales de mina de la zona, a las cuales se desarrolle con la mayor efectividad posible.

9. 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 pertinencia 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 mina y de su planta de beneficio, después de haber implementado alguna de las dos rutas metalúrgicas propuestas en esta guía.

Producto de joyería fabricados con oro extraído de la zona de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Philly Abueta, Servicio Geológico Colombiano



9.1. 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 comprenden el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.

9.1.1. GENERALIDADES SOBRE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

9.1.1.1. DEFINICIÓN

Un proyecto de inversión puede definirse como un plan que consta de dos elementos esenciales: el primero, una serie de actividades secuenciales e interrelacionadas entre sí, y el segundo, la descripción de un agregado de recursos o medios que permitirán realizar la materialización de una idea, la solución de un problema o la satisfacción de una necesidad.

9.1.1.2. CLASIFICACIÓN

De modo general, los proyectos de inversión pueden clasificarse de tres formas:

1. **Según la categoría.** Según esta clasificación, los proyectos pueden ser de prestación de servicios o de producción o fabricación de bienes (en este caso, el proyecto es de producción de bienes).
2. **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).
3. **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).

9.1.1.3. EL CICLO DE LOS PROYECTOS

La expresión *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, con el objetivo de que el inversionista pueda tomar la mejor decisión en función de sus necesidades.

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 llevan a cabo los estudios diagnósticos necesarios para identificar el problema o los problemas que se esperan solucionar, al igual que las oportunidades de negocio que puedan ser aprovechadas.

Los proyectos de inversión tienen varios orígenes. En el caso de los proyectos de 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, en función del precio y la calidad, y, a la vez, contribuir al desarrollo sostenible del lugar o comunidad en donde se desarrolla el proyecto.

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 implementación de la propuesta de mejora. 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.

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 tiene como propósito evaluar la viabilidad técnica de la producción 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.
- Estudio financiero, que permite cuantificar el monto de las inversiones necesarias para la implementación de la propuesta y definir potenciales ingresos y los posibles egresos de operación durante el período de evaluación del proyecto. Para el efecto se considera la información resultante de los estudios que le anteceden (de mercado, organizacional y técnico).

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 implementar el proyecto (desembolso del dinero) y finaliza en el momento en que el proyecto inicia su 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.

9.1.2. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN

9.1 2.1. PROPÓSITO DEL ESTUDIO FINANCIERO

El estudio financiero integra la información contenida en los demás estudios técnicos, y su objetivo primordial es valorar el monto de la inversión necesaria para la implementación de la propuesta, así como estimar los ingresos y egresos de la operación del proyecto durante el tiempo de evaluación.

9.1.2.2. 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 emplean de forma constante en la producción de bienes y servicios. El costo de estos activos comprende, además del valor de su compra, los otros gastos en que incurre la empresa para dejarlos en condiciones de uso. 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 clases: 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.

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 esta sección se incluye una explicación detallada de cada una de las etapas que comprende el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.

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

Costos operacionales

De acuerdo con el *Glosario minero* de 2017, el costo operacional 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.

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.

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

Ingresos operacionales

De acuerdo con el *Glosario minero* de 2017, los ingresos operacionales son la entrada de dinero a una empresa derivada de la venta de sus productos, servicios, operaciones financieras y otros.

9.1.2.3. PROPÓSITO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera de proyectos tiene como objetivo fundamental comprobar la pertinencia de iniciar un proyecto, para lo cual es necesario valorar la rentabilidad de la inversión a la luz de las exigencias de rentabilidad propias del inversionista.

9.1.2.4. 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.

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.

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.

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

Valor presente neto

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 (Mesa, 2010).

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, de acuerdo con lo planteado por Mesa (2010), son los siguientes:

- Si el VPN es mayor a 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 a 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

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, de acuerdo con lo planteado por Mesa (2010), son los siguientes:

- Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, se acepta el proyecto (el inversionista obtiene un rendimiento mayor que el 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-costos

El análisis de la relación beneficio-costos (RB/C) mide la RB/C de un proyecto, que se obtiene mediante la división de la suma total de los ingresos generados durante el tiempo de evaluación entre la sumatoria de los costos del mismo, ambas sumas valoradas en pesos de hoy.

Para calcular la relación beneficio-costo 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 son los siguientes:

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

9.2. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO EN LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

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 ruta metalúrgica propuesta para la zona minera de Zaragoza, al mismo tiempo que se exponen las recomendaciones técnicas (provenientes de los estudios geológico, minero, metalúrgico y químico-ambiental) que soportan la definición de las variables de operación de la mina y de la planta de beneficio que representa las condiciones típicas de la zona, y se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para realizar la proyección de ingresos y egresos de la operación futura, durante el horizonte de evaluación definido.

VARIABLES DE OPERACIÓN FUTURA DE LA MINA Y PLANTA DE BENEFICIO TÍPICAS DE LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

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

9.2.1. 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 ruta metalúrgica, como se explica enseguida.

Figura 9.1. Variables de operación futura de la mina y planta de beneficio. Fuente: autores.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	30 t/día
Volumen de material estéril extraído	20 t/día
Volumen de material mineral extraído	10 t/día
Capacidad de procesamiento planta	1,25 t/h
Tiempo de funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	8 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	260 t/mes
Tenor de corte por tonelada de material de mina	9,0 g/t
% Total de recuperación de oro	83,3%
Recuperación total de oro	7,50 g/t

9.2.1.1. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

Activos fijos

La inversión en activos fijos está representada en la adquisición de maquinaria y equipo tanto para las operaciones de extracción del material de mina, como para las operaciones unitarias del proceso de beneficio (incluyendo el costo de instalaciones eléctricas e hidráulicas para su funcionamiento) y el costo del montaje del laboratorio.

- **Maquinaria y equipo**

Con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica contenida en esta guía se ha incluido este rubro, que 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 de extracción del mineral y en la planta de beneficio”.

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

En la siguiente tabla se detalla la maquinaria y los equipos nuevos que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral, de acuerdo con las condiciones e inventario actual de las minas de la zona.

Figura 9.2. Maquinaria y equipos requeridos para la fase de extracción del mineral. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN DE MAQUINARIA Y EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
Perforadora neumática	26 kg	4
Picador neumático	8,5 kg	2
Rotomartillo eléctrico	599 x 134 x 287 mm	2
Ventiladores axiales	90 m ³ /minuto	2
Extractor, ventilador axial	45 m ³ /minuto	1
Compresor portátil diésel	Unidad compresora 5 años (10.000 horas)	1
Planta eléctrica diésel doméstica	9,6 kW	1
Bomba autocebante	1,5 HP	4
Bomba sumergible	1,5 HP	1
Malacate con motor	3 HP	2

La puesta en marcha de la propuesta de modernización requiere la compra total de la maquinaria que se relaciona enseguida. Estas especificaciones técnicas corresponden al volumen de material mineral que se debe extraer por día y a la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio definida por el equipo técnico.

De igual manera, en la figura 9.3. se relaciona la maquinaria y los equipos nuevos que deberán ser adquiridos para la implementación de la ruta metalúrgica.

- **Instalaciones eléctricas e hidráulicas**

Este rubro comprende el costo de materiales y el 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 los equipos nuevos.

Figura 9.3. Maquinaria y equipos requeridos para la fase de beneficio del mineral.. Fuente: autores.

PROCESOS	MÁQUINA Y DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Tolva para almacenar material de mina	4 m x 4m x 2m	1
	Trituradora de quijadas	10" x 16"	1
	Criba vibratoria	1,20 x 2,40	1
	Trituradora de martillos	24" x 10"	1
	Banda transportadora con estructura de soporte (20 metros)	18"	1
	Tolva para material triturado	4 m x 4m x 2m	1
	Caja de pulpa	0,80m x 0,80m x 1m	3
	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	3
	Hidrociclón 1	4"	1
	Hidrociclón 2	4"	1
	Hidrociclón 3	4"	1
	Molino de bolas primario	4" x 5" - 1,20 x 1,50	1
	Molino de bolas secundario	1,0 m x 2,5 m	2
CONCENTRACIÓN	JIG	8 X 12 dúplex	1
	Mesa gemini de refinación	40kg/h	1
	Tanque espesador	2,5 m	2
	Celda de flotación circular	1,2 X 1,2	2
CIANURACIÓN	Tanques de cianuración agitada	D=3m, H=3m	1
	Tanque para precipitación de oro en cinc	D= 3m, H=3,5m	1
	Precipitación, sistema merril crowe	5 a 10 m ³ /hora	1
	Sistema de aire	2,5 HP	1
FUNDICIÓN	Horno con crisol	Capacidad de 15 kg	1
MANEJO AMBIENTAL	Bomba para soluciones de 2" X 1,5" de alta	5 HP	1
	Bomba para soluciones de 2" X 1,5" de baja	2 HP	1
	Bomba sumergible	2 HP	1
	Tanque en lámina	Capacidad de 30 m ³	1
	Tanques auxiliares en propileno	1000 L	1
	Tanque auxiliares en lámina para neutralización	D= 3m, H=3,5m	1
	Tanque reactor	D=3m, H=3m	1
	Filtro prensa	35 marcos	1

- **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.

El monto de las inversiones que se requieren para mejorar las operaciones en la fase de extracción del mineral y la adecuación de la planta de beneficio (maquinaria y equipo, instalaciones eléctricas e hidráulicas y montaje de laboratorio) dependerá de las características de cada mina y de cada planta, así como de la negociación del minero con su proveedor.

Activos diferidos

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

- **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.

9.2.1.2. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE EXTRACCIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos directos de la fase de extracción del material de mina.

Costos directos de la fase de extracción

Los costos directos de la fase de extracción del mineral tienen que ver con la adquisición de insumos (partes, accesorios, herramientas, suministros, combustible y explosivos), la compra de elementos de seguridad industrial, la contratación de mano de obra, el mantenimiento de maquinaria y equipos, el pago de energía eléctrica y la depreciación de bienes físicos.

- **Insumos para la fase de extracción**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo mensual de la adquisición de partes y accesorios de la maquinaria y los equipos, las herramientas y los suministros para la extracción, y el combustible y los explosivos utilizados.

En la figura 9.4 se muestra el detalle de los insumos que se utilizan en las operaciones de extracción del material de mina, de acuerdo con los metros de avance en la exploración definidos previamente por el equipo técnico (104 metros de avance mensual, según variables de operación de la mina y de la planta típicas de la zona).

- **Mano de obra para la fase de extracción**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de extracción del mineral, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al Instituto de Bienestar Familiar (ICBF), al al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y a las cajas de compensa-

Para el desarrollo de la explotación minera y el beneficio de oro se debe contar con dos criterios básicos: a) trabajar bajo el amparo de un título minero, y b) contar con licencia ambiental.

Figura 9.4. Insumos para la fase de extracción. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
PARTES Y ACCESORIOS	
Acople 3/4 espigo CH	2 unidades
Acople 3/4 macho CH	2 unidades
Acople 3/4 macho CH	2 unidades
Abrazadera 3/4 CH	2 unidades
Barra de avance	1 unidades
Broca Helicoidal SDS MAX DIAGER 32*690	3 unidades
Broca Helicoidal SDS MAX DIAGER 1. 174*36 (32*920mm)	3 unidades
Barrena integral sandvik de 3" (0,80) cm	2 unidades
Barrena integral sandvik de 4" (1,20) cm	2 unidades
HERRAMIENTAS Y SUMINISTROS	
Carretas	4 unidades
Palas	6 unidades
Picas	6 unidades
Manguera para aire comprimido 1"	104 metros
Manguera para agua 1"	104 metros
Tablon de madera x 2 mts	60 tablones
Palancas de madera*	168 unidades
Cable encauchetado 3 x 10"	52 metros
Toma eléctrica	2 unidades
Clavos de acero de 3"	2 cajas.25 unidades
Clavija industrial	2 unidades
Bombillos de litio	8 unidades
Ducto plástico para ventilador (mangas)	104 metros
Aceite mobil ALMO 527	2 unidades
COMBUSTIBLE Y EXPLOSIVOS	
Combustible diésel	208 galones
Indugel Plus AP (26 x 250 mm) caja de 25 kilogramos (*)	253 kg
Anfo Rezar, bulto de 25 kilogramos (*)	156 kg
Detonador común n.º 8 (caja de 100 unidades) (*)	1.560 unidades
Mecha lenta de seguridad (caja de 500 metros) (*)	3.600 metros

(*) En este rubro se tiene en cuenta el costo adicional mensual que representa el pago del traslado de los explosivos con escolta, desde el punto de venta hasta la mina.

ción familiar (CCF), 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 diez empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

Figura 9.5. Distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, fase de extracción. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TURNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Frente de explotación	Operario	6	1	828.116	97.032	5.550.888
Carga y transporte	Operario	8	1	828.116	97.032	7.401.184
Preparación	Operario	3	1	828.116	97.032	2.775.444
Desarrollo	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
General	Supervisor	1	1	828.116	97.032	925.148
	Total	20				18.502.960

(*) El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia durante 2019.

Aportes al Sistema General de Seguridad Social

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social (SGSS), se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la figura 9.5.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social (SGSS)

$$\text{Aportes a seguridad social (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aportes (EPS, pensión, ARL)}$$

- **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

$$\text{Aportes parafiscales (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aporte (SENA, ICBF, CCF)}$$

- **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 para pago de prestaciones sociales

$$\text{Provisión (\$/mes)} = \text{salario total (\$)} \times \% \text{ de carga}$$

Figura 9.6. Tablas de aportes a seguridad social y parafiscales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5%): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5%): \$70.390 Aporte del trabajador (4%): \$33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16%): \$ 132.499 Aporte empleador (12%): \$99.374 Aporte trabajador (4%): \$33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96%): \$57.637 Aporte empleador: \$57.637
Total:	\$ 227.401	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Caja de Compensación Familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4%) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3%) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2%) a cargo del empleador
Total:	\$ 74.530	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

prestacional (prima, vacaciones, cesantías)

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

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

• **Elementos de protección personal para la fase de extracción**

Este rubro comprende el costo de la adquisición de los elementos que conforman el equipo de protección personal de los operarios de la mina.

Para calcular este costo se consideró la frecuencia de compra de los elementos y las respectivas cantidades, para establecer un factor de conversión que permitiera convertir el costo total en un costo mensual. Lo anterior, teniendo en cuenta que estos elementos tienen frecuencia de compra diferente.

La figura 9.8 contiene el detalle de los elementos de protección personal que se requieren para garantizar la seguridad de los trabajadores de la mina.

Figura 9.8. Elementos de protección personal para trabajadores en mina. Fuente: autores.

Figura 9.7. Tablas de aportes a prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12 %): corresponde al 12 % sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17 %): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
TOTAL	\$ 201.960	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

El cálculo de los aportes al SGSS y de las 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 el auxilio de transporte.

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE COMPRA	CANTIDAD (*)
Arnés en X Expert Line	Quinquenal	20 unidades
Línea de vida de 16 mm, 50 metros	Quinquenal	20 unidades
Cargador individual CH	Anual	30 unidades
Lámpara KL5LM naranja 8.000 lux	Anual	30 unidades
Cargador para lámpara	Anual	4 unidades
Lámpara KL4MS	Anual	4 unidades
Casco con portalámpara	Anual	30 unidades
Overol tipo piloto con cinta	Cuatrimstral	30 unidades
Cinturón minero de nylon con anillo	Cuatrimstral	30 unidades
Bota de seguridad exportadora	Cuatrimstral	30 unidades
Bota conga II	Cuatrimstral	30 unidades
Fono Samuray (protector auditivo externo)	Cuatrimstral	30 unidades
Conjunto de 2 piezas de ajuste en broche (impermeable)	Cuatrimstral	30 unidades
Respirador media cara 7500	Cuatrimstral	30 unidades
Guante de nylon de nitrilo	Mensual	30 unidades
Filtros para partículas 7993B A/E 110167-5	Mensual	20 unidades
Lente Nitro II AF 110005-0	Mensual	30 unidades
Protector reusable Libus - Reflex bolsa (protector auditivo de inserción)	Mensual	30 unidades
Autorescatador modelo Ci-30KS	Anual	20 unidades
Monitor multigas IBRID MX6- multidetector seis gases	Bianual	2 unidades
Estuche portátil, multidetector	Anual	2 unidades
Paquete de calibración 1 año	Anual	1 unidad

(*) Las cantidades se determinaron para un total de 20 empleados.

- **Mantenimiento de los bienes físicos para la fase de extracción**

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

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0,30% 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

$$\text{Costo de mantenimiento (\$)} = \text{valor comercial total (\$)} \times 0,30\%$$

- **Costo de energía eléctrica para la fase de extracción**

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

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados para la extracción del mineral y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos (figura 9.9).

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

$$\text{Costo de la energía eléctrica (\$)} = \text{consumo energía (kWh/mes)} \times \text{tarifa kW (\$)}$$

La figura 9.9. contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

Figura 9.9. Consumo de energía eléctrica por equipo. Fuente: autores.

EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR HP	POTENCIA Kw	POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/DÍA	Kw/MES
Rotomartillo eléctrico	2	2	1.5	1.20	8	19.2	499.2
Ventiladores axial	2	2	1.5	1.20	8	19.2	499.2
Bomba sumergible	1	1.5	1.125	0.90	8	7.2	187.2
Extractor ventilador axial	1	2	1.5	1.20	8	9.6	249.6
Motor malacate	2	3	2.25	1.80	8	28.8	748.8
Total:						84	2,184

- **Depreciación maquinaria y equipo para la fase de extracción**

En este rubro se valora la reducción en el valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. 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.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y equipo

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

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

9.2.1.3. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE LA FASE DE BENEFICIO

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 (figura 8.1.), 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 de la fase de beneficio

Los costos directos del proceso de beneficio tienen que ver con la adquisición de materia prima e insumos, la contratación de mano de obra, el 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 para la fase de beneficio-costo de extracción**

El costo de materia prima corresponde al valor que se debe pagar por cada tonelada de material mineral puesto en tolva. En este ejercicio, el costo de la materia prima se define como el costo de extracción del mineral, el cual incluye los rubros mencionados en la sección 9.2.1.2, “Identificación y valoración de costos de la fase de extracción”.

Figura 9.10. Insumos para la fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CONSUMO / TONELADA*	CONSUMO MENSUAL**
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Cuerpos moledores	kg	1,2	312
	Revestimientos trituradora primaria	kg	1,2	312
	Revestimientos trituradora secundaria	kg	1,2	312
	Revestimientos de molino primario	kg	1,2	312
	Revestimientos de molino secundario	kg	1,2	312
CIANURACIÓN***	Cianuro de sodio (NaCN)	kg	9,625	333
	Cal (CaO)	kg	2,2	76
	Hidróxido de sodio (potasa)	kg	0,0391	1,35
	Acetato de plomo	kg	0,003	0,10
	Polvo de zinc	kg	0,024	0,830
	Xelite (diatomita)	kg	0,013	0,450
FLOTACIÓN	Aero 5160 (contratipo A31)	kg	0,045	1,556
	Aero 8255 (contratipo A31)	kg	0,045	1,556
	Amil Xantato de potasio	kg	0,085	2,939
	Espumante aero-froth65	kg	0,04	1,383
	Sulfato de cobre	kg	0,08	2,660
FUNCIONACIÓN	Bórax Pentahidratado	kg	0,044	11
	Carbonato de sodio	kg	0,008	2
	Sílice - Cuarzo	kg	0,025	7
MANEJO AMBIENTAL	Floculante	kg	0,004	1
	Ácido sulfúrico	kg	0,300	78
	Peróxido de hidrógeno	kg	0,269	70

(*) La dosificación por tonelada fue determinada por el equipo técnico. (**) La cantidad consumida mensualmente se estimó para 260 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta. (***) La cantidad de mineral que va a cianuración corresponde al 4,1% del material de cabeza.

Debe tenerse en cuenta que en la estimación de los costos totales de la fase de beneficio, al costo de extracción por cada tonelada de material procesado se le descuenta el valor de la depreciación de los bienes físicos y maquinaria utilizados en esta fase, a efectos de facilitar la sistematización de la información en el flujo de caja del proyecto.

- **Insumos para la fase de beneficio**

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 figura 9.10.

- **Mano de obra para la fase de beneficio**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación de beneficio, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la Ley 100 de 1993 (salud, pensión y ARL), los aportes parafiscales que deben destinarse al Instituto de Bienestar Familiar (ICBF), al SENA y a las cajas de compensación familiar (CCF), así como la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías e intereses de cesantías).

Figura 9.11. Distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	TURNOS X DÍA	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Trituración	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
Molienda	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
Concentración	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Cianuración y fundición	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
	Total	5				4.625.740

(*) El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia durante 2019.

Salarios de los empleados

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

- **Aportes al Sistema General de Seguridad Social**

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social (SGSS) 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

$$\text{Aportes a seguridad social (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aportes (EPS, pensión, ARL)}$$

- **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 es-

Figura 9.12. Tablas de aportes a seguridad social y parafiscales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$ 70.390	Aporte total (12,5%): \$ 103.515 Aporte del empleador (8,5%): \$70.390 Aporte del trabajador (4%): \$33.125
Pensión (AFP)	\$ 99.374	Aporte total (16%): \$ 132.499 Aporte empleador (12%): \$99.374 Aporte trabajador (4%): \$33.125
ARL	\$ 57.637	Aporte total Riesgo V (6,96%): \$57.637 Aporte empleador: \$57.637
Total:	\$ 227.401	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en la Ley 100 de 1993.

timó 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 para pago de prestaciones sociales

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

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

Provisión para pago de intereses de cesantías (\$/mes) = cesantías (\$) × 12%

- Mantenimiento de los bienes físicos de la fase de beneficio**

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y los equipos de la planta de beneficio 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 0,30% 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 (\$) × 0,30%

- Análisis y pruebas de laboratorio de la fase de beneficio**

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.

Servicios públicos de la fase de beneficio

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

Figura 9.13. Tablas de aportes a prestaciones sociales. Fuente: autores.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Caja de Compensación Familiar	\$ 33.125	Aporte total al CCF: (4 %) a cargo del empleador
ICBF	\$ 24.843	Aporte total al ICBF: (3 %) a cargo del empleador
SENA	\$ 16.562	Aporte total al SENA -: (2 %) a cargo del empleador
Total:	\$ 74.530	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en los porcentajes establecidos en el Código Sustantivo del Trabajo.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Intereses de cesantías (12%)	\$ 9.251	(12 %): corresponde al 12 % sobre el valor a pagar de las cesantías
Prima de servicios (8,33%)	\$ 77.065	(8,33 %): equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado
Vacaciones (4,17%)	\$ 38.579	(4,17 %): la ley del trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas
TOTAL	\$ 201.960	

(*) Cálculo sobre el valor de un salario mínimo mensual vigente en Colombia en 2019, con base en Ley 1607 de 2012.

El cálculo de los aportes al SGSS y de las 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 el auxilio de transporte.

Figura 9.14. Análisis y pruebas de laboratorio de la fase de beneficio. Fuente: autores.

PROCESOS	TIPO DE ENSAYO	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD (UNIDAD/MES)
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Ensayos al fuego	Cabeza general	26
CONCENTRACIÓN	Ensayos al fuego	Cola de flotación	26
	Ensayos al fuego	Concentrado de mesa	26
	Ensayos al fuego	Superconcentrado	8
	Ensayos al fuego	Fundido	8
CIANURACIÓN	Ensayos al fuego	Cola de cianuración	26
	Absorción atómica	Oro en solución de cianuración	52
	Absorción atómica	Oro en solución pobre	26
	Absorción atómica	Cinc en solución pobre	2
	Absorción atómica	Cobre en solución	2
MANEJO AMBIENTAL	Absorción atómica	Ambientales	4

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 que se consume mensualmente en el proceso de beneficio.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la planta y el número de horas al día durante las cuales se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio. La figura 9.15 contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

Figura 9.15. Consumo de energía por equipos de la fase de beneficio. Fuente: autores.

	EQUIPO	CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR		POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/ DÍA	Kw/ MES
			HP	Kw				
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Trituradora de quijadas	12	9,00	7,20	1	8	57,6	1.498
	Criba vibratoria	2	1,50	1,20	1	8	9,6	250
	Trituradora de martillos	25	18,75	15,00	1	8	120	3.120
	Banda transportadora	3	2,25	1,80	1	8	14,4	374
	Molino de bolas primario	30	22,50	20,25	1	8	162	4.212
	Molino de bolas secundario	25	18,75	16,88	2	8	270	7.020
	Bomba de Sólidos	7,5	5,63	4,50	3	8	108	2.808
Total trituración y molienda								19.282
CONCENTRACIÓN	JIG	2	1,5	1,20	1	8	9,6	250
	Mesa gemini de refinación	1	0,75	0,60	1	8	4,8	125
	Tanque espesador	2	1,5	1,20	2	8	19,2	499
	Celda de flotación circular	2,5	1,875	1,50	2	8	24	624
Total concentración								1.498
CIANURACIÓN	Tanque de agitación (lixiviación)	12	9	7,20	1	12	86,4	2.246
	Precipitación, sistema Merrill Crowe	14	10,5	8,40	1	8	67,2	1.747
	Sistema de aire	2,5	1,875	1,50	1	12	18	468
Total cianuración								4.462
MANEJO AMBIENTAL	Tanque de agitado para neutralización	12	9	7,20	1	8	57,6	1.498
	Bombas para recirculación de aguas y soluciones	5	3,75	3,00	3	8	72	1.872
Total manejo ambiental								3.370
							Total	28.610

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

$$\text{Costo de la energía eléctrica (\$)} = \text{consumo energía (kW-h/mes)} \times \text{tarifa kW (\$)}$$

- **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 hídrico de masa, 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

$$\text{Costo del agua (\$)} = \text{consumo de agua (m}^3\text{/mes)} \times \text{tarifa m}^3 \text{ (\$)}$$

Depreciación de la maquinaria y el equipo para la fase de beneficio

En este rubro se valora la reducción en el valor de la maquinaria como consecuencia de su uso. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, es preciso considerar este mecanismo 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.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y el equipo

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

Costos indirectos de la fase de beneficio

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

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

Costos totales de la fase de beneficio

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

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

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

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 entre el número de gramos recuperados, y viceversa.

9.2.1.4. 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 después de la implementación de la ruta metalúrgica. Para esto se debe multiplicar la cantidad de oro producido en gramos por el precio al que se vende cada gramo de oro.

Figura 9.16. Recuperación de oro en la fase de beneficio. Fuente: autores.

CANTIDAD DE MATERIAL PROCESADO (t)	TENOR	RECUPERACIÓN TOTAL (%)*	CANTIDAD RECUPERADA (g/t)
1	9,0	100	9,0
1	9,0	83,3%	7,50

(*) Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 83,3 % de recuperación de oro por tonelada. (**) Para la zona minera de Zaragoza el tenor de corte bajo el cual es rentable la operación de la ruta metalúrgica sugerida es de mínimo 9,0 gramos por tonelada.

La cantidad de oro recuperado se halla mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la cantidad de oro por tonelada procesada

Oro recuperado por tonelada (g) = tenor (g) × % de recuperación total

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

Fórmula para calcular la producción mensual de oro

Producción mensual de oro (g) = oro recuperado por tonelada (g) × mineral procesado mensualmente (t)

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

Fórmula para calcular los ingresos mensuales por venta de oro

Ingresos totales mensuales (\$) = producción mensual de oro (g) × precio del oro (\$/g)

Para la zona minera de Zaragoza el tenor de corte bajo el cual es rentable la operación de la ruta metalúrgica sugerida es de mínimo 9,0 gramos por tonelada.

9.2.2. EVALUACIÓN FINANCIERA

En esta sección se expone la metodología que se emplea en las dos etapas de la evaluación financiera y se presentan 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.

9.2.2.1. 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, según lo establece el artículo 16 de la Ley 756 de 2002.

Fórmula para la liquidación de las regalías

Regalías del año 1 (\$) = (producción de oro el 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**

1. A partir del 2.º año, el costo de la materia prima (representado en el costo de extracción) aumenta en una proporción del 3% anual
2. A partir del 2.º año, el costo de los insumos aumenta en una proporción del 2% anual
3. A partir del 2.º año, el costo de mano de obra aumenta en una proporción del 4% anual
4. 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 en estos rubros es el mismo.

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 año 1 (\$) = ingresos gravables en el año 1 (\$) – egresos deducibles en el año 1 (\$)

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 año 1 (%) = (utilidad operacional en el año 1 (\$) / ingresos gravables en el año 1 (\$)) × 100

Las regalías corresponden a una contraprestación económica que debe reconocerse al Estado por la explotación de un recurso natural no renovable. En este caso, las regalías se pagan por la producción de oro, debido a que después de beneficiar el mineral este no se regenera. De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de las Constitución Política de Colombia de 1991, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.

Impuestos

En el flujo de caja del proyecto se debe estimar el impuesto de renta, que corresponde a una contribución que grava el ingreso de las personas y entidades económicas. Este impuesto sobre la renta incluye el gravamen al trabajo, al capital y la combinación de ambos (Glosario minero, 2017).

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.

Debe tenerse en cuenta que en el momento de la liquidación del impuesto de renta se toman como base los ingresos gravables generados en el último año y se descuenta el monto correspondiente a los costos de operación, o egresos deducibles.

Fórmula para calcular el impuesto de renta

$$\text{Impuesto de renta del año 1 (\$)} = \text{utilidad antes de pagar impuestos del año 1 (\$)} \times 33\%$$

Utilidad neta

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

Fórmula para calcular la utilidad neta

$$\text{Utilidad neta del año 1 (\$)} = \text{utilidad operacional del año 1 (\$)} - \text{impuesto de renta del año 1 (\$)}$$

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, incluido el pago de impuesto de renta.

Fórmula para calcular el margen de utilidad neta

$$\text{Margen de utilidad neta del año 1 (\%)} = (\text{utilidad neta del año 1 (\$)} / \text{ingresos gravables en el año 1 (\$)}) \times 100$$

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

$$\text{Flujo neto de efectivo en el año 1 (\$)} = \text{utilidad neta en el año 1 (\$)} + \text{depreciación en el año 1 (\$)}$$

9.2.2.2. APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUAR PROYECTOS

Enseguida se presentan las fórmulas que se emplearon para calcular los indicadores de evaluación financiera del proyecto de ruta metalúrgica.

Valor presente neto (VPN)

Para el cálculo del VPN se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 30%, y la segunda, del 40%. 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

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

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 30%, y la segunda, del 40%.

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

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

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

Después de estimar el valor presente neto (VPN) de los ingresos y de los costos se procede a calcular la relación beneficio/costo (RB/C) a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

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

$$\text{Relación beneficio/costo} = \frac{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN, Ingresos } \$)}{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN, Costos } \$)}$$

Debe tenerse en cuenta que para el cálculo de la RB/C, en los costos operacionales no se tiene en cuenta la depreciación de los bienes físicos y la maquinaria.

9.3. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

En esta sección se presentan los resultados del ejercicio financiero; el 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 mina y la planta; así como los indicadores que comprueban la viabilidad financiera del proyecto, acorde con las condiciones iniciales típicas en la zona.

Figura 9.17. Inversión inicial. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COSTO COP (\$)*	% PARTICIPACIÓN SOBRE COSTOS TOTALES
Activos fijos		
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de extracción	151.651.905	11%
Maquinaria y equipos nuevos, operaciones de beneficio	1.117.726.779	79%
Instalaciones eléctricas e hidráulicas	150.823.999	10%
Total activos fijos	1.420.202.684	

(*) Los precios cotizados se encuentran detallados en el informe técnico.

Figura 9.18. Costos de la fase de extracción. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t (*)
Mano de obra	28.580.704	109.926
Partes y accesorios	4.055.470	15.598
Herramientas y suministros	9.312.177	35.816
Combustible y explosivos	22.013.714	84.668
Elementos de seguridad industrial	12.078.448	46.456
Mantenimiento	1.137.389	4.375
Energía eléctrica	1.282.008	4.931
Depreciación maquinaria y equipo	1.263.766	4.861
Total	79.723.677	306.630

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 301.769/t.

Figura 9.19. Estructura de los costos de la fase de extracción de oro, operación futura en mina. Fuente: autores.

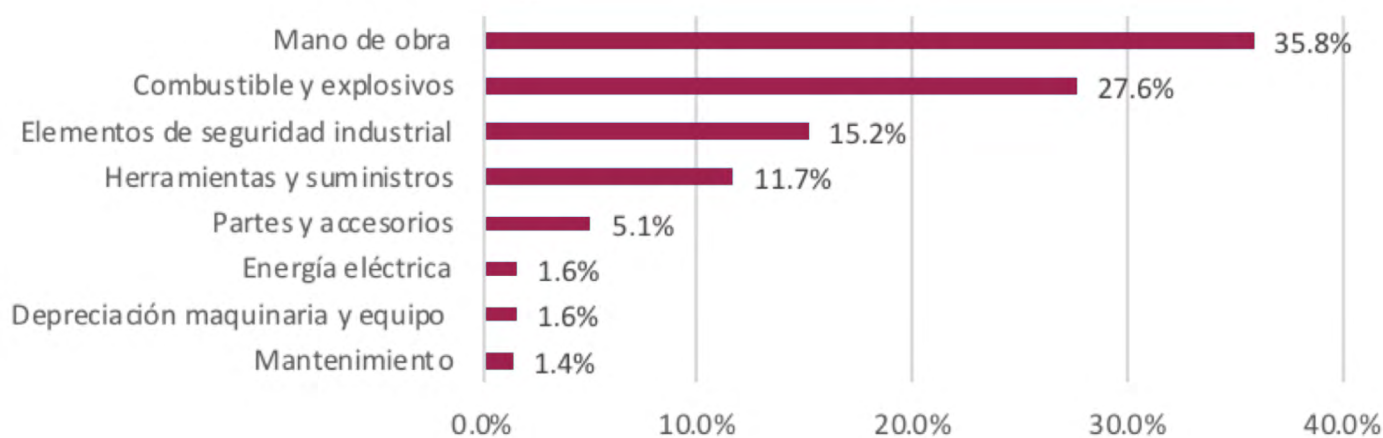


Figura 9.20. Costos de operación total (extracción + beneficio) por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
COSTOS DIRECTOS	
Materia prima	78.459.911
Insumos	11.798.891
Mano de obra	7.145.195
Mantenimiento	3.353.180
Análisis y pruebas de laboratorio	23.786.667
Servicios públicos	17.171.326
Depreciación de maquinaria y equipo	10.578.156
Total costos directos	152.293.325
COSTOS INDIRECTOS	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	15.229.332
Total costos directos + indirectos	167.522.657

Figura 9.21. Estructura de los costos de la fase de beneficio, operación futura en planta. Fuente: autores.

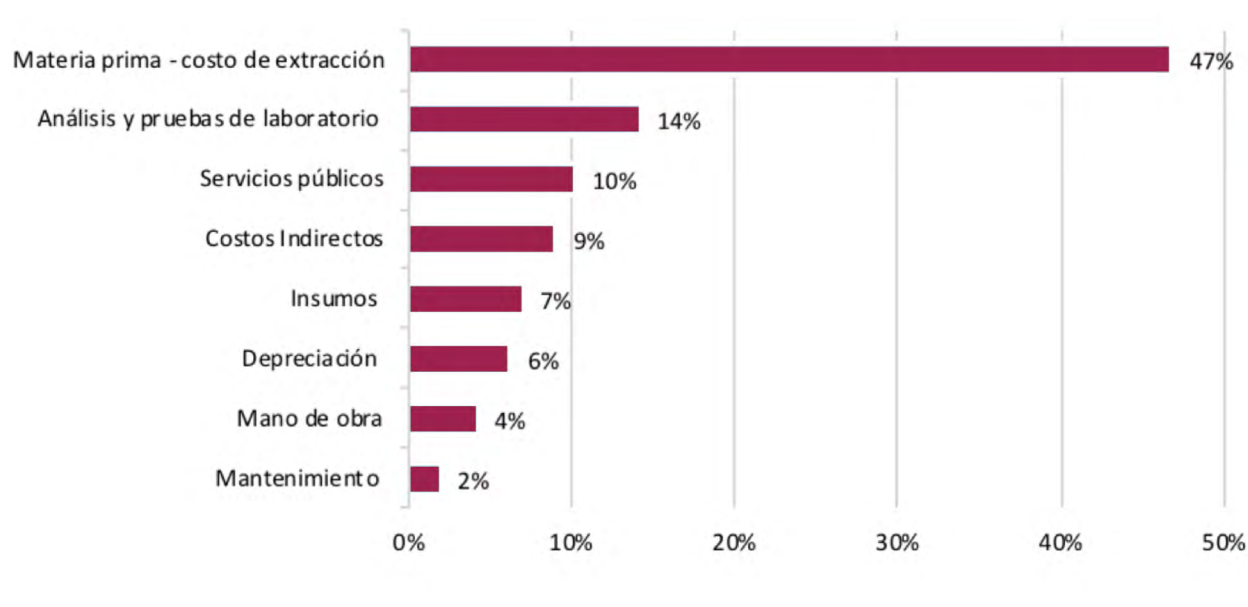


Figura 9.22. Ingresos de operación futura (por mes). Fuente: autores.

TENOR DE CORTE (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
9,0	83,3	7,50	1.949	119.815	233.545.794

(*) Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.23. Flujo de caja del proyecto en horizonte de evaluación (cinco años). Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) inversión inicial (-)	-1.420.202.684					
Total inversión inicial	-1.420.202.684					
(2) Ingresos gravables (+)						
Ingresos operacionales		2.802.549.532	2.886.626.018	2.973.224.798	3.062.421.542	3.154.294.188
Total ingresos gravables		2.802.549.532	2.886.626.018	2.973.224.798	3.062.421.542	3.154.294.188
(3) Egresos deducibles (-)						
Costos operacionales		1.883.334.019	1.921.291.714	1.960.394.717	2.000.678.274	2.042.178.735
Regalías (4 %)		89.681.585	92.372.033	95.143.194	97.997.489	100.937.414
Depreciación		126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868
Total egresos deducibles		2.099.953.473	2.140.601.615	2.182.475.779	2.225.613.631	2.270.054.017
(4) Utilidad antes de impuestos		702.596.059	746.024.403	790.749.019	836.807.911	884.240.171
(5) Margen de utilidad operacional		25,1%	25,8%	26,6%	27,3%	28,0%
(6) Impuestos (-)						
Impuesto de renta (33 %) (-)		231.856.699	246.188.053	260.947.176	276.146.610	291.799.256
Total impuestos		231.856.699	246.188.053	260.947.176	276.146.610	291.799.256
(7) Utilidad neta		470.739.360	499.836.350	529.801.843	560.661.300	592.440.915
(8) Margen de utilidad neta		16,8%	17,3%	17,8%	18,3%	18,8%
(9) Depreciación (+)		126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868
(10) Flujo neto de efectivo	-1.420.202.684	597.677.228	626.774.218	656.739.711	687.599.169	719.378.783

9.3.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

El VPN del proyecto de implementación de la ruta metalúrgica propuesta para la zona minera de Zaragoza, a una tasa de descuento del 20%, es de COP 513.878.270

El VPN del proyecto de implementación de la ruta metalúrgica propuesta para la zona minera de Zaragoza, a una tasa de descuento del 30%, es de COP 143.844.229

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

La TIR anual obtenida es mayor que las dos tasas de interés de oportunidad del inversionista, definidas en este proyecto como el 20 % y el 30% anuales. Se concluye que este proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, en la medida en que los dineros que permanecen invertidos en el proyecto rinden a una tasa superior al costo de oportunidad definido.

Para este proyecto, la relación beneficio/costo a tasas de interés de oportunidad del 20 % y el 30% es de 1,51, en ambos casos. De este resultado se concluye que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero, pues los beneficios son mayores que los costos.

Figura 9.24. Indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	TASA DE DESCUENTO 20 %	TASA DE DESCUENTO 30 %
Valor presente neto (VPN)	\$513.878.270	\$143.844.229
Tasa interna de retorno (TIR)	35%	35%
Relación beneficio/costo (RB/C)	1,51	1,51

9.4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA OPERACIÓN ACTUAL VS. LA OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

En esta sección se exponen los resultados del estudio financiero de la operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera de Zaragoza 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 ACTUAL DE LA MINA Y PLANTA DE BENEFICIO TÍPICAS DE LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

Figura 9.25. Variables de operación actual de la mina y planta de beneficio típicas de la zona minera. Fuente: autores.

VARIABLE	VALOR
Tiempo de trabajo en mina	8 h/día
Volumen de material de mina extraído	30 t/día
Volumen de material estéril extraído	20 t/día
Volumen de material mineral extraído	10 t/día
Capacidad de procesamiento	1,25 t/h
Funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	10 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	260/mes
Tenor por tonelada de material de mina	9,0 g/t
Porcentaje total de recuperación de oro	45 %
Recuperación total de oro	4,05g/t

Debe tenerse en cuenta que las variables de la operación actual de la mina y planta de beneficio típica de la zona se definieron a partir de la información recolectada en trabajo de campo por el equipo técnico.

9.4.1. RESULTADOS DE LA OPERACIÓN ACTUAL DEL BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

Figura 9.26. Costos actuales de la fase de extracción (por mes). Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t (*)
Mano de obra	45.729.126	175.881
Combustible y explosivos	12.379.544	47.614
Elementos de seguridad industrial	4.380.446	16.848
Herramientas y suministros	1.711.017	6.581
Partes y accesorios	1.629.431	6.267
Energía eléctrica	1.352.448	5.202
Depreciación maquinaria y equipo	1.010.350	3.886
Mantenimiento	909.315	3.497
Total	69.101.677	265.776

(*) El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 301.769/t.

Figura 9.27. Estructura de costos actuales de la fase de extracción de oro. Fuente: autores.

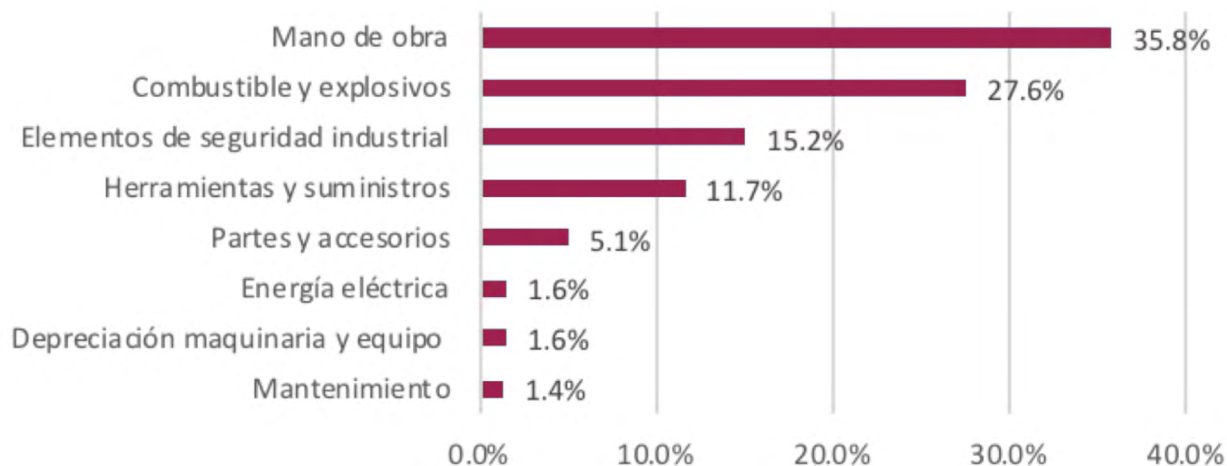


Figura 9.28. Costos de la operación actual (extracción + beneficio) (por mes). Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
COSTOS DIRECTOS	
Materia prima	68.091.327
Insumos	4.343.976
Mano de obra	8.574.233
Mantenimiento	2.284.800
Servicios públicos	6.819.111
Depreciación de maquinaria y equipo	3.549.017
Total costos directos	93.662.464
COSTOS INDIRECTOS	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	9.366.246
Total costos directos + indirectos	103.028.711

Figura 9.29. Estructura de los costos actuales de la fase de beneficio. Fuente: autores.

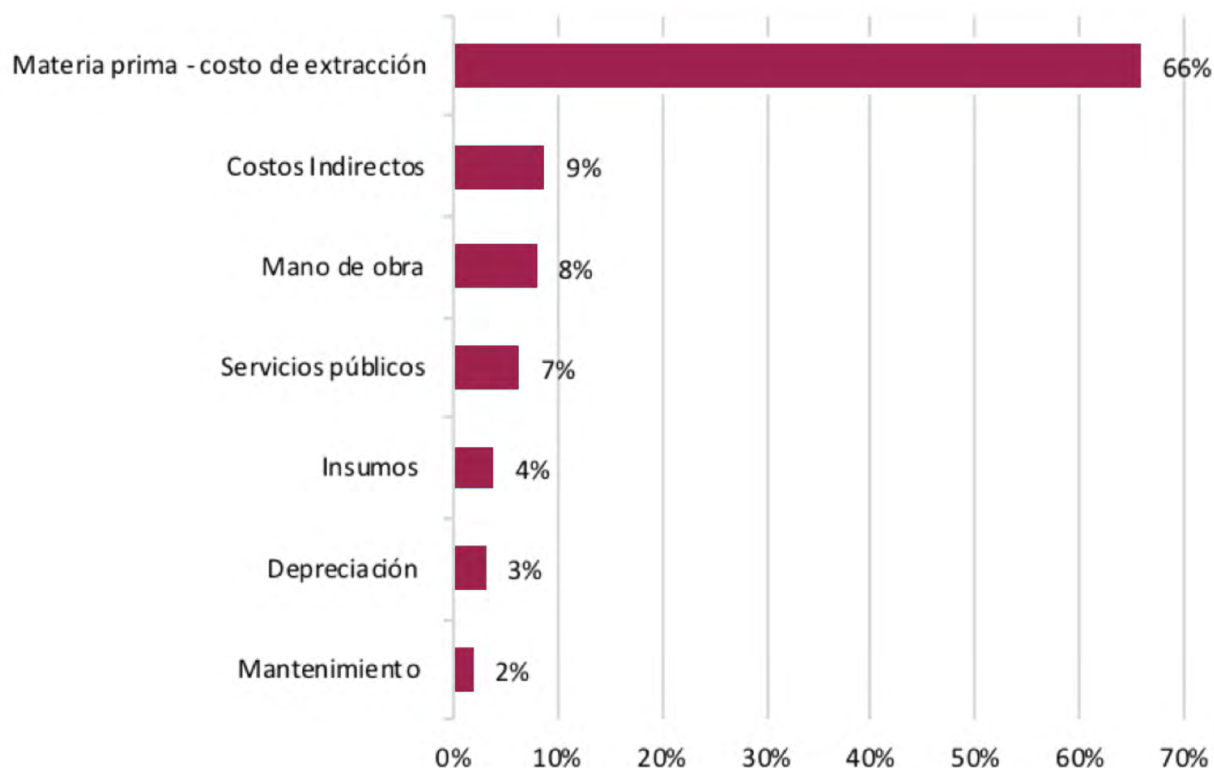


Figura 9.30. Ingresos de la operación actual (por mes). Fuente: autores.

PROCESO	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
9,0	45	4,05	1.053	119.815	126.165.195

(*) Corresponde al precio promedio internacional del oro en 2018. Fuente: cálculo propio con base en información del equipo técnico y el Banco de la República.

Figura 9.31. Flujo de caja de la operación actual en horizonte de evaluación (cinco años). Fuente: autores.

CONCEPTO	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(1) Ingresos gravables (+)					
Ingresos operacionales	1.513.982.340	1.559.401.810	1.606.183.865	1.654.369.380	1.704.000.462
Total ingresos gravables	1.513.982.340	1.559.401.810	1.606.183.865	1.654.369.380	1.704.000.462
(2) Egresos deducibles (-)					
Costos operacionales	1.193.756.330	1.226.394.500	1.260.045.620	1.294.741.658	1.330.515.612
Depreciación	48.447.435	49.900.858	51.397.884	52.939.820	54.528.015
Regalías	42.588.198	42.588.198	42.588.198	42.588.198	42.588.198
Total egresos deducibles	1.284.791.963	1.318.883.556	1.354.031.702	1.390.269.677	1.427.631.826
(3) Utilidad antes de impuestos	229.190.377	240.518.254	252.152.163	264.099.704	276.368.636
(4) Margen de utilidad operacional	15,1%	15,4%	15,7%	16,0%	16,2%
(5) impuestos (-)					
Impuesto de renta (33 %) (-)	75.632.824	79.371.024	83.210.214	87.152.902	91.201.650
Total impuestos	75.632.824	79.371.024	83.210.214	87.152.902	91.201.650
(6) Utilidad neta	153.557.553	161.147.230	168.941.949	176.946.802	185.166.986
(7) Margen de utilidad neta	10,1%	10,3%	10,5%	10,7%	10,9%
(8) Depreciación (+)	42.588.198	42.588.198	42.588.198	42.588.198	42.588.198
(9) Flujo neto de efectivo	196.145.751	203.735.428	211.530.147	219.535.000	227.755.185

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 mina y planta de beneficio típicas de la zona.

9.4.2. RESUMEN DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA

Figura 9.32. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura. Fuente: autores.

INDICADOR	OPERACIÓN ACTUAL	OPERACIÓN FUTURA
Recuperación de oro (gr/t)	45	83,3%
Cantidad de oro recuperado por tonelada	4,05 gr	7,50 gr
Costo de producción unitario por gramo de oro	COP 97.843	COP 85.943
Costo de producción unitario por onza troy de oro	USD 951	USD 835
Utilidad antes de impuestos por gramo de oro	COP 18.183	COP 30.037
Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro	USD 176	USD 292
Margen de utilidad operacional (promedio 5 años)	15,7	26,6%
Utilidad después de impuestos por gramo de oro	COP 12.152	COP 20.125
Utilidad después de impuestos por onza troy de oro	USD 118	USD 196
Margen de utilidad neta (promedio 5 años)	10,5%	18%
Indicador de productividad (producto/insumo)	1,22	1,39

Precio de venta por gramo de oro: COP 119.815. Precio de venta por onza troy de oro: USD 1.165. Tasa de cambio utilizada: COP 3.200/USD. Factor de conversión utilizado: 1 onza troy = 31,1034768 gramos

9.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA DE LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

La adopción integral de la ruta metalúrgica como una alternativa para mejorar los niveles de eficiencia en el proceso de beneficio de oro permite a la empresa minera incrementar la productividad total en aproximadamente el 13,9%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1,22, bajo las condiciones de la producción actual de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona, a una razón de productividad de 1,39 con la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

Esto 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 la presente propuesta y desarrolle su operación bajo el estricto cumplimiento de los estándares técnico-administrativos y legales. Cabe resaltar que se estableció que en el escenario de producción actual el costo unitario de producir un gramo de oro es de aproximadamente COP 97 843, mientras que se espera que, con la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 85 943. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios del 12,16 %.

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 mina y 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.

En el escenario actual de la operación de la mina y la planta de beneficio típicas de la zona minera de Zaragoza, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 97.843, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica reduce este costo a COP 85.943.

Esta disminución en costo de producción, 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 65,6%.

9.5. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro del 45% por cada tonelada de mineral procesado, obtenido en el proceso de concentración gravimétrica, de acuerdo con la información colectada en campo por el equipo técnico.
- Teniendo en cuenta que el tenor de corte definido para la zona minera de Zaragoza es de 9 g/ton, y que la operación actual permite una recuperación promedio del 45%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 4,05 g/ton de mineral beneficiada.
- El costo por materia prima, definido en este ejercicio como el costo de extracción del mineral por cada tonelada, es de COP 261.890/ton, excluyendo el costo por la depreciación de bienes físicos.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la fase de extracción del mineral son la mano de obra y la compra de combustible y explosivos, cada uno con una participación sobre los costos totales del 66,2 % y el 17,9%, respectivamente.
- El rubro más representativo en la estructura de costos de la operación actual de la planta es la materia prima, cada uno con una participación sobre los costos totales del 66%, respectivamente.
- Se estableció que la planta de beneficio tiene un consumo de agua por cada tonelada de mineral procesado de aproximadamente 0,53 m³.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio, así como del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la mina y la planta de beneficio, el consumo de energía actual es de 13.279 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 7.794.773.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 97 843 por cada gramo de oro y de USD 951 por cada onza troy de oro.
- El precio de venta que se utilizó como referencia para el estudio financiero de la operación actual corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1.165/onza troy.
- La ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) aproximada es de COP 18.138/g de oro y de USD 176/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional del 15,7%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 12.152/g de oro y de USD 118/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional del 10,5 %, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

9.6. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN FUTURA DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE ZARAGOZA

- Se estableció un potencial de procesamiento anual para las plantas de beneficio de la zona, después de la implementación de la ruta metalúrgica, de 3.120 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 10 toneladas de mineral al día.
- La implementación de la propuesta de adecuación tecnológica para mejorar la eficiencia del proceso de beneficio del oro permite alcanzar hasta un 83,31 %. Este porcentaje es mayor que la recuperación promedio que se obtiene en la planta en las condiciones actuales.
- Teniendo en cuenta que el tenor de corte del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de mínimo 9 g, y que la implementación de la ruta metalúrgica en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada del 83,3 %, se espera una recuperación de 7,50 g por cada tonelada de mineral beneficiada.
- Se definió un esquema conservador, en el cual se obtiene una recuperación de oro equivalente al 83,3 % por cada tonelada de material mineral procesado. Sin embargo, estos rendimientos pueden ser superiores al 90%.
- A partir de las características de las minas y las plantas típicas de la zona y las variables de operaciones definidas por el equipo técnico, se realizó un inventario de la maquinaria y de los equipos nuevos que se deben adquirir para la operación de extracción del mineral y de la planta de beneficio, con el fin de implementar la ruta metalúrgica contenida en esta guía. El monto de recursos que deberán invertirse es de COP 1.420.202.684.
- La definición del inventario de maquinaria y equipo nuevos, tanto para la fase de extracción del mineral, como para la de beneficio, con sus respectivas especificaciones técnicas, se costó en su totalidad con el fin de evaluar la rentabilidad de nuevos emprendimientos.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos de la fase de extracción son la mano de obra y el costo de los explosivos y combustible, cada uno con una participación sobre los costos totales del 35,8 % y el 27,6 %, respectivamente.
- Los rubros más representativos de la estructura de costos de la operación futura de la planta son el costo de extracción y el costo de los análisis y pruebas de laboratorio, cada uno con una participación sobre los costos totales del 47 % y el 14 %, respectivamente.
- El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia efectiva de los motores empleados en la mina y en la planta de beneficio y del número de horas al día durante las cuales se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos, el consumo de energía de toda la operación es de 30.794 kW/mes.

Teniendo en cuenta que el tenor de corte del material de cabeza promedio que se procesa en la planta es de mínimo 9,0 gramos, y que la implementación de la ruta metalúrgica en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada de 83,3%, se espera una recuperación de 7,50 gramos por cada tonelada de mineral beneficiada.

- 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 de beneficio.
- El material mineral que debe ir a cianuración corresponde al 13,31 % del total de material de cabeza, es decir que por cada 10 toneladas procesadas por día, 1,33 toneladas se cianuran.
- El costo unitario aproximado que se puede alcanzar con la implementación de la propuesta de adecuación es de COP 85.943 por cada gramo de oro, y de USD 835 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 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 como referencia para el estudio financiero de la operación futura corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2018. Este precio es de COP 119.815/g y de USD 1.165/onza troy.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) de COP 30.37/g de oro y de USD 292/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional del 26,6%, en promedio, en 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 20.125/g de oro y de USD 196/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta del 18 %, en promedio, en los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- Se estableció que la inversión en adecuación de las plantas de beneficio de la zona minera de Zaragoza, a partir de la implementación de la ruta metalúrgica, 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 del 20 % y el 30 % anuales.
- El período de recuperación de la inversión en adecuaciones, con las tasas de interés de oportunidad del 20 % y el 30% anuales, es de aproximadamente 3,5 años.

El período de recuperación de la inversión en adecuaciones, con las tasas de interés de oportunidad del 20 y 30% anuales, es de aproximadamente 3,5 años.



10. GLOSARIO

El objetivo de este glosario es unificar los conceptos técnicos que se emplean en el contenido de la guía, con la intención de que los mineros a quienes está dirigida se apropien y apliquen los términos correctos frecuentes en su actividad productiva.

Escultura dedicada a la labor minera en la zona de Zaragoza (Antioquia). Fotografía tomada por Wilmar David Montenegro, Servicio Geológico Colombiano



RESPECT
SOY
MINERO

Aa

Acopio. 1. Acción y el efecto de acopiar o reunir. 2. Se entiende como el sitio donde se ubican los minerales que se extraen.

Acotar. Hacer o poner números o cotas en un croquis, mapa topográfico, plano, etc.

Actividad económica. Es la creación de valor agregado mediante la producción de bienes y servicios en la que intervienen la tierra, el capital, el trabajo y los insumos intermedios.

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 (ARP). Entidad aseguradora de riesgos profesionales reglamentada por el Decreto 1722 de 1994, que se refiere a la afiliación y a las cotizaciones del Sistema General de Riesgos Laborales.

Agua de drenaje de mina. Aguas que se bombean en los frentes de trabajo de minería, bien sea a cielo abierto o subterráneos.

Agua subterránea. Agua del subsuelo que ocupa la zona saturada.

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, el término se refiere a cambios físicos o químicos experimentados por rocas y minerales después de su formación, promovidos por procesos exógenos como meteorización, o por procesos endógenos como magmatismo o fallamiento.

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

Alteración fílica. 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 a 400 °C.

Alteración potásica. Alteración desarrollada en presencia de soluciones casi neutras y a altas temperaturas (400 a 600 °C), que se caracteriza por la formación de nuevos silicatos de potasio, 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.

Ancho mínimo para explotación. Es el ancho mínimo horizontal que permite explotar una veta, según el equipo que se utilice. Si el ancho de la veta es menor que el ancho mínimo de minado, durante la explotación el tajo correspondiente tiene que ampliarse a este último ancho, lo que ocasiona una dilución.

Arcilla. 1. El término hace 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, y el límite superior en el tamaño de los granos corresponde, por lo general, a un diámetro de 0,004 mm (menores de 4 µm). En mineralogía y petrografía sus variedades se conocen como arcillolitas.

Arena (rocas sedimentarias). Término textural usado para designar materiales o partículas producto de la desintegración natural o artificial de rocas preexistentes. Su tamaño oscila entre 0,0625 y 2 mm de diámetro.

Arenisca. Roca sedimentaria detrítica terrígena compuesta como mínimo por 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 irregulares, y también en lentejones. El color de estas rocas varía de blanco a gris claro, o pueden encontrarse 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. Su mineral esencial es el cuarzo; sus minerales accesorios, el feldespato, micas, cemento silíceo, de óxidos de hierro y de calcita. A veces contiene minerales pesados, como el rutilo, entre otros. Su textura es de grano medio y redondeado. Su distribución es homogénea y pocas veces contienen fósiles.

Arranque. El arranque de un mineral es la fragmentación del macizo rocoso hasta reducirlo a un tamaño que permita su manipulación para ser cargado y transportado. El arranque puede ser realizado con métodos mecánicos (forma continua y discontinua) y también por medio de la perforación con sustancias explosivas (forma discontinua).

Arranque mecánico. En este tipo de arranque se usan máquinas que utilizan los impactos, la roza, la fuerza hidráulica, el rípiado o la excavación para desprender el mineral. En minería subterránea se usan máquinas de impacto tales como martillo hidráulico, martillo eléctrico y martillo neumático.

Autoridad ambiental. Es la autoridad que tiene a su cargo fiscalizar los recursos naturales renovables; aprobar estudios de impacto ambiental; adoptar términos y guías; aprobar o no la licencia ambiental, de acuerdo con el artículo 195 de la Ley 685 del 2001; delimitar geográficamente las reservas forestales; sancionar de acuerdo con las normas ambientales, y 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, tiene a su cargo la administración de los recursos mineros, la promoción de los aspectos atinentes a la industria minera, así como 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.

Azimut. 1. Dirección de una línea medida en sentido de las agujas del reloj, referida a un sistema de referencia, usualmente la red de meridianos. 2. Ángulo medido en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte; su valor está comprendido entre 0 y 360 grados sexagesimales (400 grados centesimales). Se denomina “rumbo” si se mide con respecto al norte magnético, mientras que se emplea el término azimut geográfico si se mide con respecto al norte geográfico. 3. Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

Bb

Barequeo. Lavado de arenas por medios manuales, sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos, con el objeto de separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas. También puede aplicarse a la recolección de piedras preciosas y semipreciosas.

Barrena. 1. Herramienta que se usa para perforar. 2. Parte de una herramienta de perforación que corta la roca. Se le llama barreno a un agujero practicado en una roca, que se rellena de pólvora u otro explosivo, para hacerla volar.

Barretero. Minero que con una barrena y una maceta, una porra o un martillo pesado, abre orificios (barrenos) que se llenan de pólvora u otros explosivos que, al estallar, sueltan los minerales de la roca.

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, con colores que van del blanco sucio al pardo, con zonas más oscuras. Es la única mena comercial del 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 bauxita 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 a partir de las diferencias en sus propiedades.

Bienes finales. Bienes y servicios que conforman la demanda final; son aquellos cuyo proceso de producción se ha concluido en el periodo y están disponibles para su utilización; la mayor parte ha sido técnicamente terminada, es decir, no será objeto de una nueva transformación en el periodo.

Bioacumulación. Es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos, de forma que 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 consistente en un túnel horizontal. 2. Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.

Bomba (equipo). 1. Máquina para evacuar agua u otro líquido, accionada eléctrica o neumáticamente. 2. Aparato mecánico utilizado para transferir líquidos o gases de un lugar a otro, por ejemplo, la bomba de Cornualles (tipo de bomba desarrollada en Cornualles, Inglaterra, utilizada en el siglo XIX en minas profundas para elevar agua subterránea) o la bomba de trasiego. 3. Aparato mecánico para comprimir o atenuar gases.

Broca. 1. Aparato o herramienta utilizada para el corte de suelos y rocas, utilizada en perforaciones o sondeos del subsuelo, que se ensambla en la parte final de la sarta de perforación.

Buzamiento (geología general). Ángulo de inclinación que forma un filón, estructura o capa rocosa con un plano horizontal, medido perpendicularmente a la dirección o rumbo del filón.

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.

Canteras de formación de aluvi3n. Llamadas también canteras fluviales. Corresponden a las canteras situa-

das en las laderas de ríos, donde éstos, como agentes naturales de erosión, transportan durante grandes recorridos las rocas y aprovechan su energía cinética para depositarlas en zonas de menor potencialidad para formar grandes depósitos de estos materiales, entre los cuales se encuentran desde cantos rodados y gravas hasta arena, limos y arcillas. En el entorno ambiental, una cantera de aluvión tiene mayor aceptación en terrazas alejadas del área de influencia del cauce que directamente sobre él. En las canteras de río, los materiales granulares que se encuentran son muy competentes en obras civiles, debido a que el continuo paso y transporte del agua desgasta los materiales y al final quedan aquellos que tienen mayor dureza y, además, con características geométricas típicas, como sus aristas redondeadas. Estos materiales son extraídos con palas mecánicas y cargadores de las riberas y cauces de los ríos.

Cartucho de explosivo. 1. Explosivo de dimensiones específicas y debidamente forrado con papel especial. 2. Carga cilíndrica de explosivos (indugel, fexagel y otros).

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 esta 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, que 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 fases: gestación del proyecto, exploración, desarrollo minero, producción y desmantelamiento.

Cierre y abandono. Finalización de la explotación, abandono de montajes y de infraestructura. Se le llama abandono a la fase del ciclo minero durante la cual tiene lugar la disminución gradual de la producción, se lleva a cabo la ejecución del plan de cierre de la mina y del plan de restauración geomorfológica y ambiental del área intervenida. En esta etapa se retiran los equipos e infraestructura. (MME, 2015).

Cinética. Velocidad de disolución de un analito. En 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, así como de las características reológicas de la pulpa.

Clasificación manual. Selección manual de material en concentrados o preconcentrados antes de ser llevados a la planta de beneficio. La selección puede ser, en el caso de menas de oro, negativa (eliminación de material de ganga) o positiva (selección de granos gruesos de oro); en ambos casos se reduce la carga de material que va a la planta de beneficio.

Código de Minas. Cuerpo de 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 encuentren en el suelo o el subsuelo, sean de propiedad de la nación o de privados. Estas normas están contenidas en la Ley 685 del 2001, Código de Minas vigente (Congreso de la República de Colombia, 2001).

Comercialización. En minería, compraventa de minerales o de cualquier producto resultante de la actividad minera.

Compresor. Máquina para producir aire comprimido, con una presión mayor a la atmosférica, mediante la elevación de la presión del aire al valor de trabajo deseado. El aire comprimido pasa de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías. Se distinguen dos tipos básicos de compresores: el primero trabaja según el principio de desplazamiento; en él la compresión se obtiene por la admisión de aire en un recinto hermético, donde se reduce el volumen del gas, lo que incrementa la presión interna. El segundo tipo es el compresor dinámico, que funcionan por aceleración molecular: el aire se aspira y es acelerado a gran velocidad; la energía cinética del aire se convierte en presión estática.

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 que debe procesarse. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas (diferencia de densidad, atracción de campos magnéticos o eléctricos) o físico-químicas de los minerales.

Concentración gravimétrica. Método de concentración que aprovecha la diferencia en el peso específico entre los minerales que se quieren separar.

Concentración mecánica. Tratamiento del mineral bruto por procedimientos físicos que aumentan su riqueza al eliminar una parte mayor o menor del material estéril. Entre tales procedimientos figuran el lavado, la 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 que interesa 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. Se le llama así a 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 centrífugo. Son equipos que utilizan la fuerza centrífuga generada por la rotación a alta velocidad del depósito que se alimenta con 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.

Concentrador de espiral. Concentrador conformado por cinco o seis espirales cerradas 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 de 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: fuerza gravitacional, fuerza centrífuga, empuje del líquido y 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 hasta sesenta veces la fuerza de la gravedad. Al alimentarlo con 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 noventa toneladas métricas por día.

Concordancia. Relación geométrica entre dos unidades estratigráficas superpuestas en las que existe paralelismo entre los materiales infra y suprayacentes.

Construcción y desarrollo. Comprende el conjunto de actividades que permiten el acceso al yacimiento y el establecimiento de la infraestructura para el proyecto. Incluye la adquisición de permisos para iniciar la explotación, el diseño y el planeamiento detallado de la explotación, además de trabajos previos que se realizan para llegar a la mina: vías de acceso, instalaciones, servicios sanitarios, instalaciones eléctricas y de agua, campamentos, montajes mineros y de beneficio.

Construcción y montaje. Consiste en la preparación de los frentes mineros y en la instalación de obras, servicios, equipos y maquinaria fija necesarios para iniciar y adelantar la extracción o la captación de los minerales, su acopio, su transporte interno y su beneficio.

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, hacen que el medio receptor adquiera características diferentes de las originales, perjudiciales o nocivas para la naturaleza, la salud y 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 este, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse en una zona determinada, y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en la legislación vigente en el momento de su celebración. Comprende como parte de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales y cierre o abandono de los trabajos, y obras correspondientes.

Control de aguas o desagüe (industria minera). En minería, acciones y obras para la evacuación de aguas de desecho, como sistemas técnicos para la evacuación de aguas en forma de cunetas y estaciones de bombeo, entre otros.

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 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 ambiental. Son los gastos necesarios para la protección, la conservación, el mejoramiento y la rehabilitación del medio ambiente. Es el valor económico que se les asigna a los efectos negativos de una actividad productiva para la sociedad.

Costo de conversión. Equivale a los recursos invertidos en procesar el mineral de una etapa a otra del beneficio.

Costo de inversión. Costo equivalente a los intereses correspondientes al capital invertido en una maquinaria, equipo o en cualquier actividad que conduzca a una mejora en la producción.

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.

Costo por depreciación. Es el que resulta de la disminución del valor original de la maquinaria.

Costo por mantenimiento. Costos originados por todas las erogaciones necesarias para conservar la maquinaria en buenas condiciones, a efectos de que trabaje con rendimiento normal durante su vida económica. Se divide 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 requieran 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.

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. Quien 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 un metal líquido se solidifica, los átomos asumen una posición definitiva en la red cristalina. La fatiga o falla de los metales debido a esfuerzos repetitivos, algunas veces es erradamente atribuida a la cristalización.

Cruzada. Son labores horizontales, perpendiculares al rumbo del cuerpo mineralizado.

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. 1. Precio en dinero al que el mercado está dispuesto a comprar. 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, que bajo circunstancias favorables puede ser extraída con beneficio económico.

Derecho a explotar. Es el derecho que tiene el beneficiario de un título minero para realizar un conjunto de operaciones que tienen por objeto la extracción o la captación de los minerales yacientes en el suelo o el subsuelo dentro de un área determinada.

Derrumbe. 1. Hundimiento de un tajo o un corte (cámara). 2. Colapso de labores mineras.

Desabombar. Actividad que consiste en detectar y forzar la caída, controlada, de fragmentos de roca relativamente grandes, o “planchones” o “petacas” (fragmentos de roca) que se encuentren fracturados y ligeramente desprendidos del techo o los costados de una galería o labor minera subterránea, y que podrían caer de improviso. Esta actividad es obligatoria y periódica en las zonas agrietadas.

Desanche. Método de retirar mineral para formar una cavidad o una cámara subterránea en un depósito de filones estrechos. Primero es volada la roca de respaldo a un lado del filón, y después, el mineral.

Desarrollo (minería subterránea). El desarrollo es una etapa intermedia entre la exploración y la extracción propiamente dicha, y comprende las labores mineras encaminadas a crear los accesos y vías internas dentro del depósito, con el fin de preparar la extracción y el transporte del mineral. El desarrollo puede ser productivo o improductivo. Este último, en minería subterránea, ocurre cuando el avance se realiza en estéril (cruzadas). En cambio, es productivo cuando el avance horizontal se realiza con extracción de mineral (construcción de guías). (MME, 2015).

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 ajustada a la capacidad de carga de los ecosistemas; implica la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones.

Detonador eléctrico. Fulminantes elaborados de tal manera que pueden hacerse detonar cuando una corriente eléctrica pasa por los hilos de conexión.

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.

Dilución. Material de bajo o nulo tenor de mineral valioso (estéril) que se extrae durante las operaciones mineras y por lo tanto forma parte de las reservas.

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 (corta la estratificación de las capas). Pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí, y cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, por 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, que representa un hiato o espacio significativo en la sucesión estratigráfica.

Distrito minero. Porción o área de terreno de un país, generalmente designada con un nombre, cuyos límites han sido descritos y dentro de la cual existen minerales que son extraídos según las reglas y regulaciones establecidas por los mineros locales. No existe límite de extensión territorial para definir un distrito minero, y sus linderos se pueden cambiar, siempre y cuando no se afecten otros derechos.

Dorsales. Conocidas también como dorsales meso-oceánicas, son elevaciones submarinas o sistemas montañosos de las cuencas oceánicas, a lo largo de las cuales se producen episodios de rifting, que implican 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. En Colombia, corresponde a la persona jurídica.

Endógeno. Todos aquellos procesos geológicos que se generan en el interior de la Tierra, como, 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, el 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 tanto, un buen paso del agua y el aire. En la minería, la erosión hídrica es la más grave, 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 o viento) transforman las formas creadas por los procesos endógenos.

Escala de minería. Escala de clasificación que toma como base fundamental el volumen o el tonelaje de materiales útiles y estériles extraídos de una mina durante un determinado período de tiempo. De la capacidad instalada de extracción de materiales dependen las inversiones, el valor de la producción, el empleo, el grado de mecanización de la mina y demás aspectos de orden técnico, económico y social. Los rangos de producción dependen del mineral o material que se explote.

Escala de valores del oro. Escala utilizada para medir la pureza del oro, cuya unidad es el quilate. Cubre un rango de uno a veinticuatro quilates, y el oro de mayor pureza es calificado con veinticuatro quilates. Si una pieza tiene doce quilates, quiere decir que la aleación con la que está fabricada tiene 50% de oro.

Espesor. Ancho o grosor de una veta, estrato u otra masa mineral, medido perpendicularmente o en la misma dirección del 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 $e = h \times \text{sen } \alpha$, 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 en ángulo recto con respecto al rumbo.

Estéril. 1. Se dice de la roca o del material de vena que prácticamente no contiene minerales de valor recuperables, que acompañan a los minerales de valor y que es necesario remover durante la operación minera para extraer el mineral útil.

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 que vayan 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 y se evalúan 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; conduce a la toma de decisiones en materia de inversiones y constituye un documento que los bancos aceptan para las gestiones de financiación de un proyecto.

Estudio de impacto ambiental (EIA). 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 naturales circundantes 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, de 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 EIA incluye: a) resumen del EIA; 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, y 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 de 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 apoyar la decisión sobre la viabilidad o inviabilidad del proyecto, o determinar la necesidad de análisis más detallados.

Estudios geológicos. Recopilación de información geológica de un área o una región, con el objetivo primordial de desarrollar minería, exploración minera u obras civiles, entre otras acciones. Un estudio geológico provee información sobre litología, estructuras y presencia de minerales, entre otros aspectos. Estos estudios pueden ser generales o detallados; por ejemplo, en el caso de túneles para obras civiles, un estudio geológico suministra información metro a metro de la zona que se va a perforar, con detalles de la estructura, la permeabilidad, los niveles freáticos, la dureza de las distintas unidades rocosas y otros aspectos necesarios para determinar la solución a los problemas que se van a encontrar antes de que la perforación alcance las zonas donde existan estos posibles problemas, para de esta manera ahorrar tiempo y dinero e incluso salvar vidas humanas.

Evaluación del proyecto. Se basa en el estudio de factibilidad del proyecto, en la evaluación económica (costos, inversiones) y en el análisis de reservas. Además, se realizan los trámites legales, sociales, mineros y ambientales, así como el planeamiento minero.

Excavación. 1. Proceso de remoción de material de suelo o roca de un lugar para transportarlo a otro. La excavación incluye operaciones de profundización, voladura, ruptura, cargue y transporte, tanto en superficie como bajo tierra. 2. Pozo, fosa, hoyo o cualquier corte resultante de una excavación.

Exploración. Consiste en lograr un conocimiento detallado del depósito mineral descubierto en la etapa de prospección. Para ello se realiza un modelo geológico y de recursos del yacimiento y se adelanta el estudio de prefactibilidad para determinar si vale la pena continuar o no con el proyecto.

Explosiones de polvo de sulfuro. En las minas subterráneas, es el riesgo de combustión espontánea de polvo que contiene sulfuros minerales y es transportado por el aire.

Explosivo. Los explosivos son sustancias que tienen poca estabilidad química y que son capaces de transformarse violentamente en gases. Esta transformación puede realizarse a causa de una combustión o por acción de un golpe, impacto, fricción u otra causa, en cuyo caso dichas sustancias reciben el nombre de explosivos detonantes, como es el caso de las dinamitas y los nitratos de amonio.

Explotación (industria minera). 1. Proceso de extracción y procesamiento de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y el desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral. 2. Es la aplicación de un conjunto de técnicas y normas geológico-mineras y ambientales para extraer un mineral o depósito de carácter económico, para su transformación y comercialización. 3. El artículo 95 de la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) define la explotación como “el conjunto de operaciones que tienen por objeto la extracción o captación de los minerales yacientes en el suelo o subsuelo del área de la concesión, su acopio, su beneficio y el cierre y abandono de los montajes y de la infraestructura”.

Explotaciones pequeñas. Se consideran explotaciones pequeñas y de poca profundidad las que se realizan con herramientas e implementos simples de uso manual, accionados por la fuerza humana, y cuya cantidad extraída no sobrepasa las 250 toneladas anuales de material.

Explotaciones tradicionales. Las explotaciones tradicionales son aquellas áreas en las cuales hay yacimientos de minerales explotados tradicionalmente por numerosas personas vecinas del lugar y que, por sus características y ubicación socioeconómica, son la única fuente de abastecimiento regional de los minerales extraídos.

Exógeno. Son todos los procesos geológicos superficiales, como, por ejemplo, la meteorización.

Extraíble (mineral de interés o valioso). Parte económica o subeconómica del yacimiento que puede ser extraída durante la operación normal de la mina.

Ff

Factibilidad. es un estudio técnico y económico exhaustivo de la opción de desarrollo seleccionada para un proyecto minero, que incluye evaluaciones apropiadamente detalladas de los factores modificadores aplicables, junto con cualquier otro factor operacional relevante y los análisis financieros detallados que son necesarios para demostrar, al momento de presentar el reporte que la extracción está razonable justificada (económicamente explotable). Los resultados de estudio pueden razonablemente servir como base para la decisión final para que el titular o institución bancaria, proceda al financiamientos o desarrollo del proyecto.”

Filón. Relleno de minerales que ha colmado una fisura en la corteza terrestre.

Fluidos hidrotermales. Son fluidos que pueden contener agua a alta temperatura, y son volátiles y químicamente activos. Su origen puede ser magmático o de aguas meteóricas que se calientan y ascienden. Los fluidos hidrotermales pueden transportar y depositar metales, lo cual produce alteraciones químicas en las rocas con las cuales interactúan.

Flujo de caja (cash flow). Refleja los cobros y pagos del negocio o empresa en un periodo 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 en el 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. 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 pueden llegar a ser económicamente explotables (al conocerse alguna aplicación nueva para estos), en cuyo caso 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.

Gas (industria minera). 1. Término usado por los mineros para referirse a un aire impuro, especialmente con combinaciones explosivas. 2. Gases combustibles (metano), mezcla de aire y gases combustibles, u otras mezclas de gases explosivos que se encuentran en las minas.

Gases esenciales. En minería, el aire atmosférico y el oxígeno, los gases indispensables para la vida del hombre.

Gases explosivos. En minería, gases que en altas concentraciones forman mezclas explosivas con el aire: metano (CH₄); monóxido de carbono (CO, explosivo en concentraciones entre 13 y 75%) y C₂H₂ y H₂S.

Gases nitrosos (NO y NO₂). Son derivados de diferentes óxidos de nitrógeno. Se encuentran como mezcla en diferentes concentraciones como productos habituales en las voladuras practicadas en los frentes. Estos dos gases no se separan nunca en esta situación, por lo que hay que reconocerlos juntos, aunque los porcentajes varíen constantemente. Producen la muerte por edema pulmonar, por lo que es preciso tener cui-

dado en los momentos inmediatos a la pega, y conviene regar la carga de tierra para disolverlos. Se detectan mediante tubos colorimétricos. Su característica más destacada es su olor acre.

Gases sofocantes. En minería, gases que producen ahogo, y en altas concentraciones pueden producir la muerte: nitrógeno (N_2); dióxido de carbono (CO_2), que cuando es mayor que 15% en volumen, es mortal; metano (CH_4) y el gas de carburo (C_2H_2), producido por la acción del agua sobre el carburo de calcio, que produce un característico olor a ajo.

Gases tóxicos. En minería, gases nocivos al organismo por su acción venenosa: monóxido de carbono (CO); humos nitrosos (de olor y sabor ácidos); sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico) (H_2S) (su límite permisible es de 8 pm), que tiene olor a huevos podridos, y anhídrido sulfuroso (SO_2), que en concentraciones mayores del 15% en volumen, es mortal (su límite permisible es de 1,6 pm).

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, requisito para asentar edificios, puentes y carreteras sin riesgo para la vida humana.

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 físico-químicos 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, en el 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 diámetro es superior a 2 mm.

Grisú. Mezcla de metano con aire en proporciones variables, que puede contener algún que otro gas (como etano y anhídrido carbónico, entre otros), si bien es el metano, que puede alcanzar porcentajes muy altos, el que determina sus características. Estas características son: altamente combustible y arde con llama azulada; es incoloro, insípido, asfixiante y pesa menos que el aire. Puede desplazar al oxígeno en la mezcla de aire hasta niveles en los que el porcentaje de oxígeno (O_2) sea lo suficientemente bajo para no permitir la supervivencia humana, y tiende a acumularse en los lugares altos de las labores, donde la velocidad de ventilación es insuficiente.

Guía (industria minera). Es una galería subterránea que sigue el rumbo del cuerpo mineralizado (vena, veta, filón, manto o capa). Las guías no tienen salida directa a la superficie y están destinadas al transporte de cargas, circulación de personal, ventilación, desagüe, y conducen a los frentes de trabajo.

Hh

Horizonte de evaluación del proyecto. Tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto.

li

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 conduce 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 ambiente.

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. Solo 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, entre 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 rubros.

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 utilizarlos 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. Se encuentran 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: a) Primarias, que se forman durante el crecimiento del cristal y pueden presentarse aisladas, en pequeños grupos de inclusiones fluidas sin orientación particular, o alineadas paralelamente a las zonas de crecimiento del cristal. b) Secundarias, que se forman en fracturas en cristales, que han sido penetradas por fluidos para luego sellarse mediante la autorreparación del cristal; se presentan como lineamientos de inclusiones que llegan a tocar la superficie del cristal, e incluso, a veces, pueden continuar en cristales adyacentes. c) Seudosecundarias: se trata de inclusiones que por sus lineamientos parecen secundarias, aunque en realidad son primarias; se las considera un subgrupo de las inclusiones primarias. De las inclusiones fluidas se puede obtener información como la temperatura y la presión a la cual se formó el mineral, qué contenedor, además del tipo fluido del cual se formó, y la densidad de tal fluido.

LL

Licencia ambiental. 1. Es la autorización que otorga la autoridad competente a una persona natural o jurídica para que adelante 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 puede 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 extraíble 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 se presentan naturalmente para acelerar la oxidación de minerales sulfídicos que contienen algunas formas de oro y, a la 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 contienen sustancias solubles (por ejemplo, en un relleno sanitario).

Mm

Manejo de aguas (industria minera). Proceso en el que, en un área minera, se produce un descenso de la tabla de agua subterránea mediante bombeo de pozos para luego ser transportada y utilizada o recargada en el 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 aprovechar mejor la mena suele ser necesario su tratamiento, que por lo regular comprende dos etapas: el tratamiento en el sitio de mina para aumentar la concentración del mineral en cuestión (procesos hidrometalúrgicos y flotación, entre otros), y el tratamiento metalúrgico final, que permite extraer el elemento químico en cuestión (tostación y electrólisis, entre otros).

Metalogénesis. Proceso que permite definir y, dado el caso, mostrar en un mapa, las áreas que pueden contener concentraciones minerales.

Metalogenia. 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.

Metalografía. Descripción y clasificación de metales mediante el estudio de la estructura de un metal-aleación y la relación con la composición química, y 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 en rocas o minerales, 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 un proceso isoquímico que conduce 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, sea ígnea, sedimentaria o metamórfica, puede ser afectada por el metamorfismo. Hay varios esquemas para distinguir diferentes tipos de metamorfismo: a) según la extensión sobre la cual tuvo lugar el metamorfismo: metamorfismo regional y local; b) según las condiciones (ambiente) geológicas: orogénico, de enterramiento, de fondo oceánico, dinámico, de contacto y dinamotérmico; c) según el principal factor controlante durante el metamorfismo (temperatura [T], presión [P], presión de agua [PH₂O], esfuerzos, deformaciones): térmico; d) 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 pirometamorfismo y el metamorfismo asociado con el emplazamiento de cuerpos tectónicos calientes; e) 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), y f) si el metamorfismo está asociado con un incremento o descenso de la temperatura: prógrado, 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, debido 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, asimismo, en las cadenas alimentarias (biomagnificación), que ocupa un lugar especial debido a que cierto porcentaje de la población mundial está expuesta a él de una u otra forma, y su toxicidad está mejor caracterizada por la investigación médica que la de otros compuestos orgánicos del mercurio.

Mineral. 1. Sustancia homogénea originada por un proceso genético natural, con composición química, estructura cristalina y propiedades físicas constantes dentro de ciertos límites. 2. Minerales que se caracterizan por una estructura cristalina y por una composición química determinadas, 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 asociado. Categoría en la que se incluyen los minerales que hacen parte integral del cuerpo mineralizado objeto del contrato de concesión. Véase ganga.

Mineral de alteración. Mineral que se forma como producto de reacciones físico-químicas 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, fílica, propílica, argílica, subpropílica, albitización, piritización, carbonatización, ceolitización, alunitización, caolinización, silicificación, dolomitización, turmalinización, epidotización, argílica avanzada, sericítica, cloritización.

Mineral de mena. Véase mena.

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, y 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. Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento, la exploración y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos y a cielo abierto (en superficie) encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, y consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales que se encuentran en la corteza terrestre.

Minería de subsistencia. Es la actividad minera desarrollada por personas naturales o grupo de personas que se dedican a la extracción y recolección a cielo abierto de arenas y gravas de río destinadas a la industria de la construcción, arcillas, metales preciosos, piedras preciosas y semipreciosas por medios y con herramientas manuales, sin la utilización de ningún tipo de equipo mecanizado o maquinaria para su arranque. Incluye las técnicas de barequeo (véase) y de recolección de minerales. No comprende las actividades que se desarrollan en espacios subterráneos sin título minero (Ministerio de Minas y Energía, Decreto 1666 de 2016).

Minería formal. Actividad cuyas unidades productivas desarrollan las labores mineras con título minero vigente o bajo el amparo de este, y con 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 ilegal. Es la minería que se desarrolla sin estar inscrita en el Registro Minero Nacional y, por lo tanto, sin título minero. Es la minería desarrollada de manera artesanal e informal, al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero. Incluye minería amparada por un título minero, pero en la que la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área amparada por la licencia.

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.

Minería tradicional. La minería tradicional es aquella que se ha ejercido desde antes de la vigencia de la Ley 685 de 2001, en un área específica, en forma continua o discontinua, por personas naturales o grupos de personas naturales o asociaciones sin título minero inscrito en el Registro Minero Nacional, en yacimientos minerales de propiedad del Estado y que, por las características socioeconómicas de éstas y la ubicación del yacimiento, constituyen para dichas comunidades la principal fuente de manutención y generación de ingresos, además de considerarse una fuente de abastecimiento regional de los minerales extraídos. Esta minería es también informal y puede ser objeto de procesos de formalización a los que hacen referencia los artículos 31 y 257 de la Ley 685 de 2001, así como los programas de que trata el capítulo XXIV de la Ley 685 de 2001 (Código de Minas). Por lo anterior, se entiende que la minería tradicional es una subespecie de la minería informal.

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 después de 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. Molino para minerales que consiste en una o más piedras grandes arrastradas por un lecho circular.

Molino de barras. Molino para molienda fina (última etapa de la molienda, en la que el material que se entrega pasa por un tamiz de malla de 1 mm² de sección), similar a los molinos de bolas. Es un equipo cilíndrico que tiene 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 con 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 lleva a cabo 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 solo un compartimiento y una carga de partículas de mineral cribadas como medio de molienda. Son muy usados en las 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 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 metales preciosos como el oro y el platino. Una onza troy equivale a 31,103 g.

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 semiindustrial 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, que utiliza algún tipo de energía (eléctrica, mecánica, hidráulica o térmica) para la operación de los equipos o máquinas.

Pre-factibilidad. es un estudio exhaustivo de un rango de opciones para la viabilidad técnica y económica de un proyecto minero que ha avanzado hasta una etapa en la que se ha establecido un método preferido de extracción y procesamiento de mineral, ya sea en minería subterránea o a cielo abierto, incluye un análisis financiero basado en suposiciones razonables de los factores modificadores.

Preparación (desarrollo minero). Labores mineras llevadas a cabo para facilitar la explotación apropiada del yacimiento o depósito, una vez se ha completado la exploración minera y se ha logrado el acceso y el desarrollo tanto en el rumbo como en el buzamiento. Las labores de preparación se realizan, en su mayoría, dentro del yacimiento mismo, e incluyen: a) inclinados y tambores, b) subniveles y sobreguías y c) algunas cruzadas, “chutes” de descargue, algunas clavadas y verticales, y otros trabajos.

Preparación de minerales. Es una parte de la metalurgia extractiva que comprende la secuencia de operaciones físicas y mecánicas (trituración, molienda, clasificación, aglomeración, concentración) mediante las cuales se adecúa el mineral para procesos posteriores de extracción sin producir alteración química del alimento.

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 (véase) 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 diez y treinta años, y depende del nivel de reservas, el tipo de explotación y las condiciones de la contratación.

Productividad. Relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía y maquinaria, entre otros.

Producto (industria minera). Cantidad de mineral obtenido en un proceso o una operación, 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, como, por ejemplo, el color, olor, la 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. Por ejemplo, oxidación.

Prospección. Consiste en localizar anomalías geológicas donde pueda existir un depósito mineral.

Provincia metalogénica. Región en la que una serie de depósitos minerales tienen características comunes.

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 operación unitaria. Por lo general 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. Se dividen en recursos renovables (véase) y recursos no renovables (véase).

Recursos naturales no renovables. Son los recursos que no tienen capacidad de recuperarse o regenerarse después de ser aprovechados, aunque 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 en un porcentaje acordado de los ingresos resultantes de su uso. Por ejemplo, la que recibe un fabricante por el uso de su maquinaria en la fábrica de otra persona. Regularmente, 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). Conjunto de desechos tóxicos de procesos mineros resultado de la concentración de minerales, por lo general 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 y mercurio, y metaloides como el arsénico.

Reserva mineral: es la parte económicamente explotable de un recurso mineral medido y/o indicado, esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído y está definido apropiadamente por estudios de pre factibilidad o factibilidad que incluyen la aplicación de factores modificadores. (minería, procesamientos, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales). Las reservas minerales incluyen reservas probables y probadas.

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 la 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 dedicadas a una misma actividad económica.

Sedimento. Material sólido que se asienta desde el líquido cuando se encuentra en suspensión.

Silicificación. Introducción de sílice o reemplazo de componentes por sílice. La sílice formada o introducida es generalmente cuarzo de grano fino, calcedonia u ópalo, y puede rellenar poros o reemplazar 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, así como garantizar 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 del bienestar social.

Sulfuros. 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. Se puede 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 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 de 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. Esta expresión 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 coproductos y subproductos.

Tenor de colas. Tenor, ley o concentración de mineral en las colas que se desechan al final del 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 o 2.205 lb.

Transformación. Transformación minera 1). Conjunto de operaciones fisicoquímicas o metalúrgicas a que se somete un mineral después de ser beneficiado, para obtener un primer producto comercial utilizable por la industria y el consumidor. 2). De acuerdo con el Código de Minas, es la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial del cual resulte un producto diferente no identificable con el mineral en su estado natural.

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, como preparación para la siguiente etapa de reducción (segunda o tercera etapa de trituración o circuito de molienda).

Trituración primaria, secundaria y terciaria. 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 de 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. Esta trituradora 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, que pasan 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 tanto, el tamaño del 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 periodo 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 periodo 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 forma de vetas junto con otros minerales asociados.

Vida útil. La vida útil de un equipo es el lapso durante el cual este 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 este, por mínimos que 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, desgaste excesivo debido a uso anormal, vibraciones y fricción de sus partes móviles, manejo de diferentes operadores e irresponsabilidad de estos y 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 constar hasta de cientos de metros a los lados del plano de falla. Alberga numerosas fallas pequeñas en las cataclasitas y milonitas asociadas.



11. REFERENCIAS

Vista desde el interior del socavón en las minas. Fotografía tomada por Fhilly Abueta, Servicio Geológico Colombiano

- 911 Metallurgist, P. E. (2018). 0.5 to 50 TPH Industrial Ball Mills. Retrieved November 23, 2018, disponible en <https://www.911metallurgist.com/equipment/ball-mills/>
- Acosta, M. (2007). Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO. Tesis de pregrado. Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento. Tratamiento de aguas ácidas de mina. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambientales.
- Aliyari, F., Rastad, E., Goldfarb, R. J. y Sharif, J. A. (2014). "Geochemistry of hydrothermal alteration at the Qolqoleh gold deposit, northern Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, northwestern Iran: Vectors to high-grade ore bodies". *Journal of Geochemical Exploration*, 140, 111-125. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2014.01.007>.
- ÁLVAREZ, J. et al, 1970.-Mapa Geológico del Cuadrángulo H-8 (Yarumal) y parte del Cuadrángulo H-7 (Ituango). Ese. 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2017). Departamento de Antioquia. Caracterización de la actividad minera departamental. Recuperado de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_antioquia_01-06-2017.pdf.
- ARL Positiva. (2017). Guía de seguridad para labores mineras subterráneas. Ciudad: ARL Positiva.
- Austín, L. G. y Concha, F. (eds.). (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. Concepción, Chile: CYTED.
- Barringer, J. L., Szabo, Z., Kauffman, L. J., Barringer, T. H., Stackelberg, P. E., Ivahnenko, T., ... Krabbenhoft, D. P. (2005). Mercury concentrations in water from an unconfined aquifer system, New Jersey coastal plain. *Science of the Total Environment*, 346(1-3), 169-183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.013>.
- Benvindo da Luz, A., Sampaio, J. y França, S. C. (eds.). (2010). Tratamiento de minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM.
- Bikerman, D. (2015). El Limon Project Technical Report. New York: Para Resources INC.
- Botero, G. 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales Facultad de Minas. Universidad Nacional. Medellín*, 57: pp.1-101.
- Cáceres, G. (2001). Impacto ambiental de la minería del oro. *Revista Metalurgica UTO*, 22, 19-28. Retrieved from http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2078-55932001000200004&script=sci_art-text.
- Cediel, F., Shaw, R.P. and Cáceres, C., 2003, Tectonic Assembly of the Northern Andean Block, in, Bartolini, C., Buffler, R.T. and Blickwede, J., eds., *The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean - Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79*, p. 815 - 848.
- Cediel, F., Cáceres, C., 2000, *Geological Map of Colombia: Geotec, Ltd., Bogotá, 3rd Edition*, digital format with legend and tectono-stratigraphic chart.
- Celada, C.M. et al, 2016. Mapa de depósitos minerales de Colombia . Servicio Geologico Colombiano. DRM – Grupo MMC.
- Çelebi, E. E., Öncel, M. S. Y Kobya, M. (2018). Acid production potentials of massive sulfide minerals and lead-zinc mine tailings: A medium-term study. *Water Science and Technology*, 77(1), 260-268. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.541>
- Chavan, A. (2018). "Here are the Types of Underground Mining and Their Applications". *Science Struck*. Recuperado de: <https://sciencestruck.com/types-of-underground-mining-their-applications> (consultado en noviembre de 2018).

- CIMM T&S S. A. (2007). Aplicación de test SPLP, test ABA y evaluación de generación neta de acidez a muestras geológicas de Compañía Minera del Pacífico. Santiago de Chile: CIMM T&S S. A.
- Coles, C. A., & Cochrane, K. (2006). Mercury Cyanide Contamination of Groundwater From Gold. Sea to Sky Geotechnique, 1118–1122. Retrieved from <http://www.engr.mun.ca/~ccoles/Publications/0227-231.pdf>.
- Craw, D. y Mackenzie, D. (2016). Macraes Orogenic Gold Deposit (New Zealand): Origin and Development of a World Class Gold Mine.
- Departamento de Antioquia (2017). Zona Minera Especial del Consejo Comunitario de Porce Medio, Resolución n.º 283 de 2017. Biblioteca Jurídica del Departamento de Antioquia.
- Denver Equipment Company (1954). Denver equipment company handbook. Denver, Colorado.
- Echeverri, B., 2006. Genesis and thermal history of gold mineralization in the Remedios- Segovia Zaragoza Mining District of Northern Colombia. Tesis de Maestría. Universidad de Shimane. Japón.
- Feininger, T., Barrero, D., et al., 1972. Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B). Boletín geológico, Volumen XX, No. 2.
- Foucher, D., Hintelmann, H., Al, T. A., & MacQuarrie, K. T. (2013). Mercury isotope fractionation in waters and sediments of the Murray Brook mine watershed (New Brunswick, Canada): Tracing mercury contamination and transformation. Chemical Geology, 336, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.014>.
- Franco, G. y Vellilla, D. A. (2014). Planeamiento minero como función de la variación de la ley de corte crítica. Boletín Ciencias de la Tierra, (35). <https://doi.org/10.15446/rbct.n35.34650>
- Galán, E. y Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola. Ciudad: Facultad de Química, Universidad.
- Gaudet, C., Lingard, S., Cureton, P., Keenleyside, K., Smith, S. y Raju, G. (1995). Canadian environmental quality guidelines for mercury. Water, Air, and Soil Pollution, 80(1-4), 1149–1159.
- González, H. 1980. Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina) del Mapa Geológico de Colombia. INGEOMINAS, Boletín Geológico, 23 (1):1-174.
- González, H., 2001. Mapa geológico de Antioquia Escala 1:400.000. Memoria explicativa. Ingeominas. Bogotá.
- González, H. & Londoño, A., 2002b. Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Tonalita de Buriticá, Stock de Buriticá (K2tb). Cordillera Occidental, Departamento de Antioquia. Cretácico Superior. INGEOMINAS, 16 P
- González, H., y Londoño, A.C. 2003. Geología de las planchas 129 Cañasgordas y 145 Urrao. INGEOMINAS, Bogotá, 119p.
- Hinojosa, O. (2002). Oxidación de sulfuros: importante proceso de pretratamiento. Revista metalúrgica, (23). Universidad Técnica de Oruro.
- Hoek, E. y Brown, E. T. (2007). Consulting Engineer. Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica. Recuperado de: www.u.cursos.cl/ingenieria/2007 (consultado noviembre de 2018).
- Kabata Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants. 3a ed. Boca Raton, London, New York y Washington D. C.: CRC Press.
- Kawatra, S. (2011). Fundamental principles of froth flotation. En SME mining engineering handbook (1517-1532).

- Knelson, B., Jones, R., (1994). "A new generation of Knelson concentrators" a totally secure system goes on line. *Miner. Eng.* 7 (2-3), 201-207.
- Leal, L. T. C. (2015). Drenajes Ácidos de Mina Formación y Manejo. *Revista Esaica*, 1(1), 53-57.
- Leal-Mejía, H. 2011. Phanerozoic gold metallogeny in the colombian Andes: a tectono-magmatic approach. Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona, Barcelona (Cataluña), España.
- Leal-Mejía, H. et al. 2018 *Geology and Tectonics of Northwestern South America : The Pacific-Caribbean-Andean Junction*, edited by Fabio Cediél, and Robert Peter Shaw, Springer, 2018. ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/eafit/detail.action?docID=5491588>. Created from Eafit on 2018-09-18 08:13:32. Copyright © 2018. Springer.
- Lilli, M. A., Nikolaidis, N. P., Moraetis, D., Kalogerakis, N. y Karatzas, G. P. (2014). Characterization and mobility of geogenic chromium in soils and river bed sediments of Asopos basin. *Journal of Hazardous Materials*, 281, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.037>.
- Londoño, C. et al 2009. Características de las mineralizaciones vetiformes en el distrito minero Bagre-Nechi, Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, ISSN 0120-3630, págs.29-38.
- MacDonald, D. Ingersoll, C. Y Berger, T. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39, 20-31.
- Maya, M., y González, H. 1995. Unidades Litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. *Boletín Geológico, INGEOMINAS* 35 (2-3): 43-57.
- Metso, (2009) Manual de trituración y cribado.
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (1988). Métodos de explotación minera, vetas y aluvi6n. Bogotá: MinMinas.
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2001). Guía mineroambiental de explotaci6n. Bogotá: MinMinas.
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2015). Glosario t6cnico minero. Recuperado de <https://www.mine-nergia.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2016). Plan estrat6gico sectorial para la eliminaci6n del uso del mercurio. La ruta hacia un beneficio sostenible del oro. Bogotá: MinMinas. Recuperado de https://rds.org.co/apc-aa-files/ba03645a7c069b5ed406f13122a61c07/plan_unico_nacional_de_mercurio.pdf
- Morales, A. (2003). Determinaci6n y mitigaci6n del potencial de generaci6n acido en botaderos de est6riles mina del proyecto Desarrollo Teniente Divisi6n El Teniente, CODELCO, Chile. En Congreso Geol6gico Chileno, fecha, Concepci6n.
- Municipio de Zaragoza Antioquia. (2012). Plan de Desarrollo 2012-2015. Un Gobierno devuelto al pueblo.
- Napier-Munn, T. J., Morrel, S., Morrison, R. D. y Kojovic, T. (1996). Mineral Comminution circuits: Their operation and optimisation. Queensland, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Nava, F., Elorza-Rodr6guez, A. E. y Uribe-Salas, A. (2007). An6lisis qu6mico de cianuro en el proceso de cianuraci6n. *Revista de Metalurgia*, 43, 20-28.
- N6ñez, A., G6mez, J. & Rodr6guez, G. 2001. Vulcanismo b6sico al sureste de la ciudad de Ibagu6, departamento del Tolima (Colombia). VIII Congreso Colombiano de Geolog6a. Memorias CD ROM, 12 p. Manizales.

- Ordóñez-Carmona, O., Valencia, M., et al. 2005. Metalogenia y evolución tectonomagmática del distrito minero Segovia Remedios, primera aproximación. Editorial Gente Nueva Ltda. Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá, 252 P.
- Ortiz Delgado, H. (1991). Geología minera del oro de veta. Bogotá: Colciencias.
- Pinzón, L., Ospina, E. y Chávez, A. (2009). “Interacción de los metales pesados entre el sedimento y la columna de agua en el caso del río Bogotá”. Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina, 1, pp. xx-xx.
- Railsback, L. B. (2012). An Earth Scientist’s Periodic Table of the Elements and Their Ions. Geological Society of America’s Map and Charts. Recuperado de: <http://railsback.org/PT/815PeriodicTable48e02.pdf>.
- Restrepo, J. & Toussaint, J. 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. Episodes, Vol. 11, N° 3, pp. 189-193.
- Secretaría de Minas de Antioquia. (2017). Mapa minero de Antioquia. Medellín: Secretaría de Minas, Gobernación de Antioquia.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) y Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2018). Caracterización mineralógica y metalogénica. Convenio 019 de 2018. Bogotá: SGC-UNAL.
- Simonin, P. (1867). La vie souterraine ou les mines et les mineurs. Paris: Imprimerie Générale de CH. Lahure.
- Skoog, D. A., Holer, F. J. y Nieman, T. A. (2001). Principios de análisis instrumental. 5a ed. España: Editorial McGraw-Hill.
- Thermo, F. (2015). X-Ray Energy Reference X-Ray Energy Reference. In F. Thermo (Ed.), X-Ray Energy Reference (pp. 1–2).
- Toussaint, J. F. 1996. Evolución Geológica de Colombia, Cretácico. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 142p.
- US Environmental Protection Agency (USEPA). (1996). Soil screening guidance: Technical background document. Ciudad: USEPA.
- Velásquez López, P. C., Veiga, M. M., y Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: Identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. Journal of Cleaner Production, 18 (3), 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.010>.
- Villagómez, d. 2010. Thermochronology, geochronology and geochemistry of the western and central cordilleras and sierra nevada de santa marta, colombia: the tectonic evolution of nw south america. Ph.d. Thesis, université de genève. 142p.
- Villa Posada, V. y Franco Sepúlveda, G. (2013). Diagnóstico minero y económico del departamento de Antioquia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Whelan, P. F., and Brown, D. J. (1956), “Particle-Bubble Attachment in Froth Flotation”.
- Wills, B. A., y Finch, J. (2016). Wills’ Mineral Processing Technology (8.ª ed.). Montréal: Elsevier.
- Ye, M. F. y Wu, G. L. (2018). Mineralogical analysis of a chrome ore from South Africa. En Minerals, Metals and Materials Series, parte F8, 615-623. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72484-3_65
- Zhu, C., Wen, H., Zhang, Y., Yin, R., Cloquet, C. y Zhu, C. (2018). Cd isotope fractionation during sulfide mineral weathering in the Fule Zn-Pb-Cd deposit, Yunnan Province, Southwest China. Science of the Total Environment, 616-617, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.293>

LEGISLACIÓN

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”.

Congreso de la República de Colombia. Ley 685 de 2001. “Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones”.

Congreso de la República de Colombia. Ley 756 de 2002. “Por la cual se modifica la Ley 141 de 1994 [Fondo Nacional de Regalías], se establecen criterios de distribución y se dictan otras disposiciones”.

Congreso de la República de Colombia. 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”.

Congreso de la República de Colombia. Ley 1607 de 2012. “Por la cual se expiden normas en materia tributaria y se dictan otras disposiciones”.

Congreso de la República de Colombia. 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”.

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.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución n.º 631 de 2015. “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

Ministerio de Minas y Energía. Resolución n.º 128 del 8 de marzo del 2017.

Ministerio de Minas y Energía. Resolución n.º 40391 del 20 de abril de 2016. “Por la cual se adopta la Política Minera Nacional”.

Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1886 de 2015. “Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas”.

Presidencia de la República de Colombia. Decreto 2703 de 2013. “Por el cual se establece la estructura interna del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y se determinan las funciones de sus dependencias”.

Presidencia de la República de Colombia. Decreto 4131 de 2011. “Por el cual se cambia la Naturaleza Jurídica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas)”.

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

ZARAGOZA (ANTIOQUIA)



El futuro
es de todos

Minenergía

ISBN: 978-958-52317-3-3



9 789585 231733

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO

