



El futuro
es de todos

Minenergía



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

REMEDIOS (ANTIOQUIA)

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO



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

REMEDIOS (ANTIOQUIA)

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

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA 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: 978-958-52317-1-9

ISBN Digital: 978-958-52317-2-6

Comité Editorial SGC: ceditorial@sgc.gov.co

Presidente

Teresa Duque

Integrantes

Virgilio Amarís

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 Minereras. 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

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. REMEDIOS (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 Remedios (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 saliendo de la visita a la mina Quintana en el municipio de Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por William Pulido, 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)

JUAN PABLO MARÍN ECHEVERRY

Secretario general

DALIA INÉS OLARTE MARTÍNEZ

Oficina Asesora Jurídica

Grupo de Trabajo Contratos y Convenios (E)

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. REMEDIOS (ANTIOQUIA)* hace parte de la segunda fase del estudio que aplica lo establecido en el Plan Estratégico Sectorial para la Eliminación del Uso del Mercurio (MinMinas, 2016), y 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 se ajustan a lo preceptuado en las bases para la consolidación de una política de Estado en ciencia, tecnología e innovación (artículo 3° de la 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 ello, el Servicio Geológico Colombiano, en los ámbitos de su competencia como entidad perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación, genera conocimiento geocientífico, y así hace valiosos aportes dirigidos a satisfacer la necesidad que tiene el país de contar con alternativas tecnológicas de producción más limpia en 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 Remedios; los objetivos y el alcance de la guía; metodología de trabajo; aspectos geológicos, mineros, metalúrgicos, químicos 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 técnico-científicos, pues se consideró relevante y necesario realizar un análisis económico y financiero riguroso y real, con el fin de establecer la conveniencia de emprender, exitosamente, un proyecto minero y efectuar una asignación eficiente de los recursos. En el capítulo dedicado a este tema se incluyen los fundamentos metodológicos mínimamente necesarios para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación de la mina y de la 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 Remedios (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
1.4. 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 Remedios (Antioquia)	31
3.3. Vías de acceso	32
3.4. Ubicación de minas y plantas de beneficio	32

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1. Fundamentos teóricos: geología y yacimientos minerales	36
4.1.1. Generalidades de yacimientos auríferos	38
4.1.2. Identificación de minerales en el frente de mina	42
4.1.3. Sulfuros asociados a la mena	43
4.2. Geología del distrito minero de Remedios (Antioquia)	45
4.2.1. Geología regional	45
4.2.2. Geología estructural	46
4.2.3. Alteración hidrotermal	49
4.2.4. Metalogénesis y mineralización aurífera	49
4.2.4.1. Características metalogenéticas de explotaciones	50
4.2.4.2. Microtermometría y análisis de inclusiones fluidas.	54
4.2.4.3. Secuencia paragenética	57
4.2.5. Ocurrencia de oro en veta.	59
4.2.5.1. Calidad del oro (EPMA)	62
4.2.6. Modelo metalogénico	64
4.2.7. Unidades geometalúrgicas (UGMs).	65
4.2.8. Liberación de sulfuros	66
4.2.8.1. Liberación de sulfuros en la mina La Primavera	66
4.2.8.2. Liberación de sulfuros en la mina los Pujidos.	68
4.2.8.3. Liberación de sulfuros en la mina La Cirila	71
4.2.8.4. Liberación de sulfuros en la mina Quintana	73
4.2.9. Liberación de oro	75
4.2.9.1. liberación de oro primavera	75
4.2.9.2. Liberación de oro en la mina Los Pujidos	76
4.2.9.3. Liberación de oro en la mina La Cirila	77
4.2.9.4. Liberación de oro en la mina Quintana	78
4.3. Consideraciones en geología y mineralogía para el beneficio	80

5. ASPECTOS MINEROS

5.1. Fundamentos técnico-mineros	84
5.1.1. Etapas de un proyecto minero	84
5.1.1.1. Métodos de explotación	85
5.1.2. Métodos de arranque	92
5.1.3. Tipos de sostenimiento	92
5.1.4. Tipos de ventilación	95
5.1.5. Carga y transporte de mineral	96
5.2. Estudio minero de la zona minera	97
5.2.1. Metodología de trabajo	97
5.2.2. Explotaciones mineras visitadas	98
5.2.2.1. Mina Río Gold (El Hundidor)	98
5.2.2.2. Mina La Cirila	100
5.2.2.3. Mina San Pedro n.º 2	101
5.2.2.4. Mina San Pedro-Napoleón	102
5.2.2.5. Mina Quintana	103
5.2.3. Minería Aluvial	104
5.3. Análisis minero	105
5.3.1. Método de explotación	105
5.3.2. Sostenimiento	110
5.3.3. Ventilación	111
5.3.4. Minero-Ambientales	112
5.4. Conclusiones en aspectos mineros	114

6. ASPECTOS METALÚRGICOS

6.1. Fundamentos técnicos del proceso de beneficio metalúrgico en planta	117
6.1.1. Beneficio de minerales en planta	117
6.1.2. Proceso de conminución (trituración y molienda)	118
6.1.2.1. Trituración primaria (gruesa)	118
6.1.2.2. Trituración secundaria (fina)	119
6.1.2.3. Molienda	121
6.1.3. Clasificación granulométrica	124
6.1.4. Clasificación hidráulica	124
6.1.5. Concentración de minerales auríferos por gravimetría	126
6.1.5.1. Concentración gravitacional o gravimétrica	127
6.1.6. Concentración de minerales auríferos por flotación	131
6.1.7. Cianuración	132
6.1.8. Fundición	135
6.1.9. Tratamiento de residuos sólidos en aguas	136

7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

7.1. Contribución química a la caracterización, control de procesos metalúrgicos y ambientales	139
7.2. Fundamentos teóricos: métodos y aplicaciones químicas y ambientales	140
7.2.1. Contaminación por mercurio	
7.2.2. Cianuro en minería	140
7.2.2.1. Dinámica del cianuro en un relave de residuo minero	142
7.2.3. Caracterización química y ambiental	144
7.2.3.1. Aplicación de la espectrometría de fluorescencia de rayos X	145
7.2.3.2. Aplicación de la espectrofotometría de absorción atómica	145
7.2.3.3. Aplicación de la técnica espectrofotometría de ultravioleta visible	145
7.2.3.4. Aplicación de la potenciometría de ion cianuro	146
7.2.3.5. Tratamientos de descomposición de cianuro	147
7.2.3.6. Ensayo en laboratorio de la descomposición de cianuro libre y complejo a formas estables	148
7.2.3.7. Pruebas ambientales para relaves	149
7.3. Puntos de muestreo visitados y muestras puntuales analizadas	150
7.4. Resultados de ensayo químicos y ambientales	152
7.4.1. Determinación de ph	152
7.4.2. Análisis elemental mediante fluorescencia de rayos x en materiales de cabeza	154

7.4.3. Caracterización de sedimentos activos	156
7.4.3.1 Análisis de fluorescencia de rayos x en sedimentos activos	156
7.4.3.2. Determinación de mercurio por espectrofotometría de absorción atómica	158
7.4.4. Caracterización de relaves	159
7.4.4.1. Análisis de fluorescencia de rayos X en relaves	159
7.4.4.2. Determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica en relaves	162
7.4.5. Pruebas ambientales en relaves	
7.4.5.1 TCLP	163
7.4.5.2. ABA	164
7.4.5.3. Caracterización de vertimientos	166
7.5. Conclusiones Químicas y ambientales	171
7.6. Recomendaciones	173
8. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA	
8.1. Proceso de beneficio desarrollado actualmente	176
8.2. Pruebas metalúrgicas de laboratorio	177
8.2.1. Peso específico, índice de Hardgrove en índice de trabajo de Bond (WI)	177
8.2.2. Acondicionamiento del mineral para concentración gravimétrica	178
8.2.3. Planta de beneficio La Cirila	178
8.2.4. Planta Los Pujidos	180
8.3. Tenores de oro en las plantas visitadas	182
8.4. Consideraciones mineralógicas determinantes en los procesos metalúrgicos	183
8.5. Proceso de beneficio sugerido	184
8.6. Balances de materia de los procesos sugeridos	186
8.7. Montaje de la planta de beneficio sugerida	187
8.8. Diagrama de flujo correspondiente a la planta de beneficio sugerida	188
8.9. Conclusiones metalúrgicas	190
8.10. Recomendaciones metalúrgicas	191
9. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO	
9.1. Fundamentos teóricos para la evaluación financiera del proyecto	194
9.1.1. Generalidades sobre los proyectos de inversión	194
9.1.1.1. Definición	194
9.1.1.2. Clasificación	194
9.1.1.3. El ciclo de los proyectos	194
9.1.2. Estudio y evaluación financiera de proyectos de inversión	196
9.1.2.1. Propósito del estudio financiero	196
9.1.2.2. Etapas del estudio financiero	196
9.1.2.3. Propósito de la evaluación financiera	197
9.1.2.4. Etapas de la evaluación financiera	197
9.2. Metodología para el estudio y evaluación financiera del proyecto en la zona minera de Remedios	199
9.2.1. Estudio financiero	199
9.2.1.1. Identificación y valoración de la inversión inicial	200
9.2.1.2. Identificación y valoración de costos de la fase de extracción	202
9.2.1.3. Identificación y valoración de costos de la fase de beneficio	206
9.2.1.4. Identificación y valoración de ingresos de operación	210
9.2.2. Evaluación financiera	211
9.2.2.1. Construcción del flujo de caja del proyecto	211
9.2.2.2. Aplicación de métodos para evaluar proyectos	213
9.3. Estudio y evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Remedios	214
9.3.1. Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera del proyecto de la zona minera de Remedios	217
9.4. Estudio financiero de la operación actual vs. la operación futura en la zona minera de Remedios	217
9.4.1. Resultados de la operación actual del beneficio de oro en la zona minera de Remedios	218
9.4.2. Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura	220

9.4.3. Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs. operación futura de la zona minera de Remedios	220
9.5. Consideraciones sobre la operación actual de beneficio de oro en la zona minera de Remedios	221
9.6. Consideraciones sobre la operación futura de beneficio de oro en la zona minera de Remedios	222

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 Servicio Geológico Colombiano, en el marco del Decreto 2703 de 2013, “Por medio del cual se establece la estructura interna del SGC y se determinan las funciones de sus dependencias”, 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 Remedios (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

Panorámica del municipio de Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano





1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL



Fotografía 11. Cocos utilizados para amalgamación. Fuente: autores.

Remedios es un municipio localizado en el Nordeste Antioqueño, así como el municipio de Yolombó. Estos fueron fundados por los españoles en el año 1560 y Yolombó fue considerada en la época de la colonia como el más importante sitio de explotación minera. El Nordeste Antioqueño, por la producción de oro y la participación de compañías extranjeras, contribuyó en el desarrollo del departamento de Antioquia debido al incremento de recursos económicos por la explotación de oro. Esta situación conllevó la llegada de personas de otras partes interesadas en la minería de oro (Pérez, Branch, Arango, 2009).

La minería es una de las principales actividades económicas del municipio de Remedios. La ganadería y la explotación maderera también son muy representativas en el municipio, sin embargo, la minería tiene gran relevancia por la generación de empleos en minas y plantas de beneficio, lo que representa ingresos para las familias mineras y el comercio en compraventas de oro; almacenes y ferreterías con herramientas e insumos mineros; joyerías y otros tipos de comercio de enseres; restaurantes; tiendas de ropa y accesorios; bares y hoteles; entre otros.

La población minera en la subregión tiene dos características. Unos son estables y permanecen por la actividad minera y otras fuentes como el comercio. Otros son población flotante que llega con la expectativa del oro, localizándose de manera temporal cerca de los puntos de producción, a los que en su mayoría se accede por vías carretables (terciarias) en regular estado.

El municipio presenta una extensión de 1985 kilómetros cuadrados, así como una fuerte problemática legal entre los mineros tradicionales e informales con los títulos mineros obtenidos por la empresa multinacional Gran Colombia Gold (Zandor Capital); lo anterior debido a que el área titulada reúne gran cantidad de mineros tradicionales que han desarrollado la actividad desde años atrás, siendo su principal fuente de sustento. Inicialmente la empresa que realizaba la explotación minera en la región era Frontino Gold Mine, instalada en 1852 en Segovia hasta el 2011, con el registro de propiedad privada RPP 140, el cual fue vendido a la empresa multinacional Gran Colombia Gold, empresa canadiense representada por Zandor Capital. Esta situación también tiene relevancia en el municipio vecino de Segovia.

El panorama, desde el punto de vista técnico, muestra pequeñas explotaciones en su mayoría informales con poca implementación de técnicas de explotación segura y eficiente, condiciones riesgosas de trabajo en las minas subterráneas y extracciones aluviales. Las pequeñas explotaciones se realizan con sistemas tradicionales, en la mayoría sin planeamiento minero y sin estudios en detalle de geología de minas, ni de metalurgia para el beneficio del mineral.

Los mineros tradicionales han buscado formas de legalizar su actividad y han constituido asociaciones mineras y áreas de reserva especial. En Remedios, la Agencia Nacional de Minería (ANM) declaró un Área de Reserva Especial (ARE) para mineros tradicionales, por medio de la Resolución n.º 091 del 20 de febrero de 2015 y el Artículo 31 del Código de Minas, expedido con la Ley 685 de 2001. Esta ARE abarca un área de 2311 hectáreas y estableció que la comunidad minera de Remedios —localizada en las minas La Parcela, La Cirila, San Mateo y Monteverde— ha desarrollado labores mineras artesanales por más de 15 años, siendo esta actividad su principal fuente de ingresos. La entidad aportó los estudios geológico-mineros que determinaron la existencia de potencial para explotación de oro por más de cuarenta años (ANM, 2016).

Otra área de reserva especial declarada para mineros tradicionales de oro es el Área de Reserva Especial Doña Teresa (Decreto 1494 de junio 3 de 2003, Presidencia de la República). El área se localiza entre los municipios de Remedios y Segovia, y tiene una extensión de 470 hectáreas 6984 m²; su punto arcifinio es la confluencia de las quebradas La Marranera y La Cristales (ANM, 2019).



Fotografía 1.2. Socialización del proyecto con la comunidad minera por parte de los funcionarios del SGC. Fuente: autores.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD



Fotografía 1.3. Mercurio en batea 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 el 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 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 1.4. Socialización del proyecto con la comunidad minera. 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 Almaguer (Cauca), 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 Remedios, 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 Remedios.

1.4. ALCANCE

Esta guía metodológica propone procesos de producción más limpia, sin uso de mercurio, mediante alternativas tecnológicas que permitan 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 Remedios 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

Geólogos ingresando en la clavada artesanal de la mina El Hundidor en Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por William Pulido, 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: rechazos 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.
- 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.

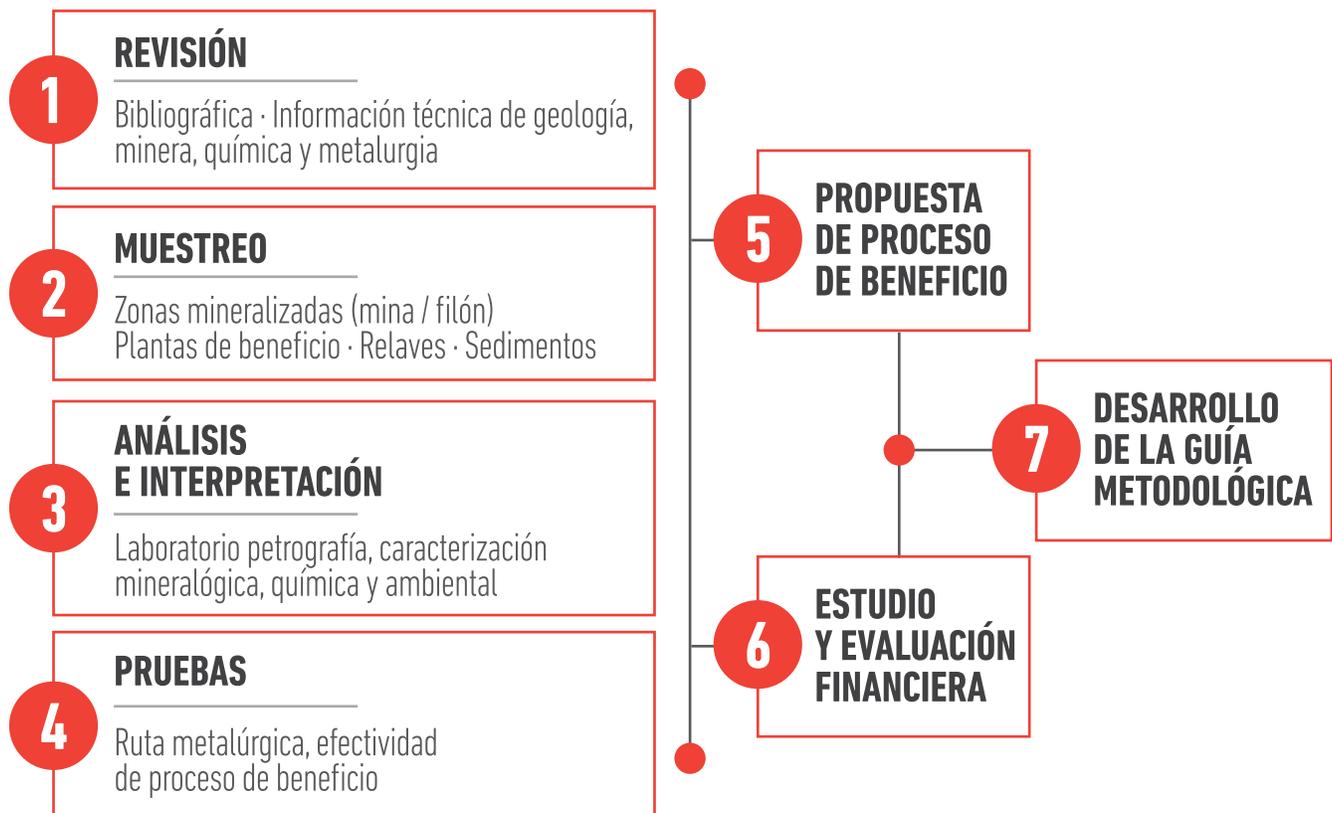
2.4. PRUEBAS

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.

Parque central de Remedios Antioquia. Fotografía tomada por Gabriel Pantoja, Servicio Geológico Colombiano





A LOSE \$200

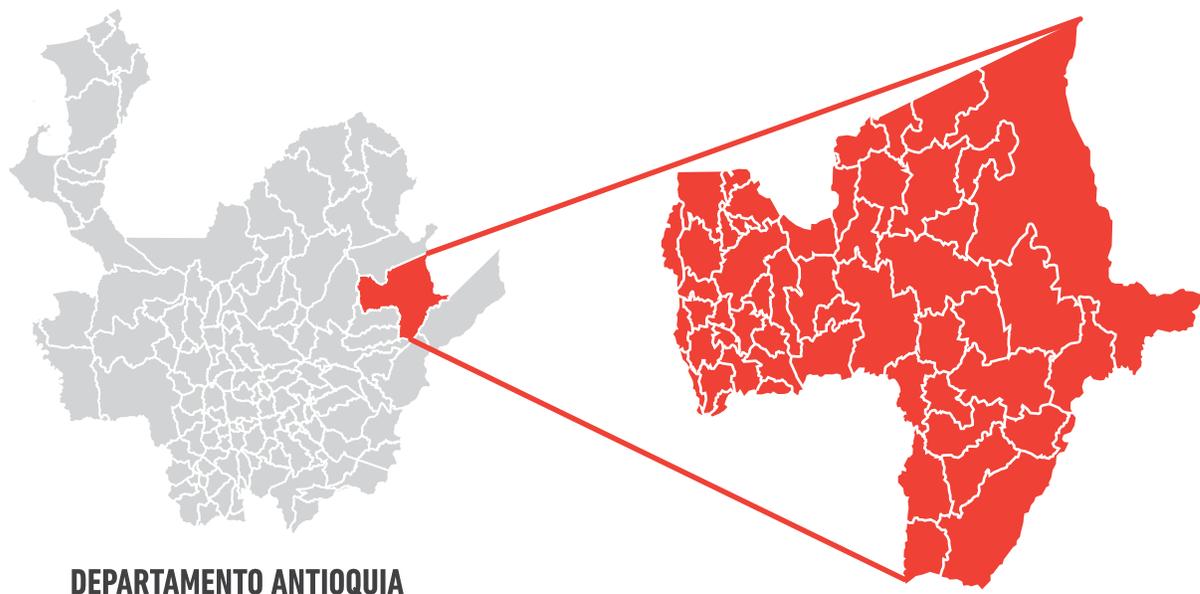
3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de interés se encuentra localizada en el departamento de Antioquia, región Noreste, en jurisdicción del municipio de Remedios, en la cuenca alta de los ríos Bagre, Ité, La Honda y Maní, extremo norte de la Cordillera Central. El espacio estudiado se ubica en alturas que van desde los 200 m s. n. m., en la confluencia de la quebrada La Cianurada y el río Bagre, hasta los 800 m s. n. m. en el área de la mina Quintana. Esta área comprende parte de los depósitos minerales pertenecientes al distrito minero Segovia del Mapa Metalogénico de Colombia y corresponde con las planchas topográficas 106-IV-D, 107-III-C, 117-II-A, 117-II-B, 117-II-C, 117-II-D, 117-IV-A y 117-IV-B a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

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



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



3.2. MUNICIPIO DE REMEDIOS (ANTIOQUIA)

Economía: La economía del municipio de Remedios se basa principalmente en el desarrollo de las actividades mineras con un aporte del 71.4% del PIB municipal, según el Plan de Desarrollo Municipal 2016 – 2019; en segundo lugar se encuentra el comercio con una participación del 33.08%, seguido por la construcción, el sector pecuario y la agricultura; estos sectores dinamizados por la mecánica minera.

Según lo descrito anteriormente, la minería es la que genera mayor empleo en el municipio, siendo este un sector en crecimiento, buscando la sostenibilidad y formalidad. En el sector pecuario el municipio cuenta con un hato de aproximadamente 81.205 cabezas de ganado y destaca la producción artesanal de queso como un producto de valor agregado, en cuanto a agricultura sobresale el cultivo de plátano como un producto con potencial de comercialización, dicha comercialización se ve afectada por el mal estado de las vías o la inexistencia de las mismas. El comercio contribuye con un 33.08% del PIB del municipio y es un importante generador de empleo como alternativa a la minería.

La fiebre del oro trae consigo problemas, como las permanentes invasiones de personas que vienen en busca de un mejor futuro, atraídos por el codiciado metal, pero cuando se dan cuenta de que no es tan fácil adquirirlo, que es escaso y está muy profundo, sus ilusiones se desvanecen, entran a engrosar los cinturones de pobreza en que se han convertido las invasiones.

Medio ambiente: Una de las preocupaciones más relevantes en el municipio de Remedios es la condición de sus recursos hídricos, los indicadores de potabilidad indican que para el municipio el riesgo es de 30%, 9% para el área urbana y de 100% para la zona rural, razón por la cual el plan de gestión ambiental toma el recurso hídrico como eje para la formulación de estrategias de conservación. Algunas de las principales cuencas que abastecen de agua al municipio se encuentran en riesgo por la deforestación y deficiencias en gestión ambiental, entre estas están El Coral, Chorro de Lágrimas, Santa Lucía, Martaná, Santa Ana y La Culebra.

En el municipio existen 105.891 hectáreas de bosques, próximas a estas se encuentran las zonas de explotación forestal, las cuales por normativa deben ser reforestadas una vez son aprovechadas.

Localización:

07° 01' 21" de latitud norte
74° 41' 46" de longitud oeste

Extensión:

1.985 km²

Altitud de la zona urbana:

700 m.s.n.m.

Temperatura promedio:

24 °C

Límites:

Con Segovia al norte; sur del departamento de Bolívar al nororiente; Yondó y Puerto Berrío al oriente; Yolombó al sur y Yalí, Vegachí y Amalfi al occidente.

Actualmente los problemas ambientales causados por la explotación minera, que se ven reflejados en la remoción y deslizamiento de masas, contaminación de corrientes hídricas por el vertimiento de aguas subterráneas y servidas de minería, inhabilidad de terrenos por causa de los depósitos de estériles o sedimentación de los afluentes del municipio, entre otras.

Población: Al Remediano le gusta la comida típica paisa, sancocho de res y pescado, mondongo, frijoles, arepa, mazamorra, buñuelos, etc. Los mitos son los mismos de la región paisa, aunque entre ellos también se cuenta el mito del oro “Que este metal precioso se pierde en las minas o vetas ricas cuando entre los mineros socios existe la envidia y la codicia. Ha desaparecido un poco el mito de que las mujeres no pueden entrar en las minas porque era señal de mal agüero, ese día ocurría algún accidente, la producción rebajaba, etc.”

En el Municipio de Remedios se identifican dos tipos de pobladores: El campesino que se dedica a la agricultura, explotación de oro con barequeo en épocas de bonanza minera y los que llegan con un objetivo muy definido como es la búsqueda de oro, los cuales son pobladores seminómadas, con un mínimo sentido de pertenencia y arraigo, quienes en busca del oro se ubican temporalmente en la zona de extracción. Una característica sobresaliente de la población es la presencia de minorías étnicas (comunidades negras e indígenas), las cuales tienen un carácter especial.

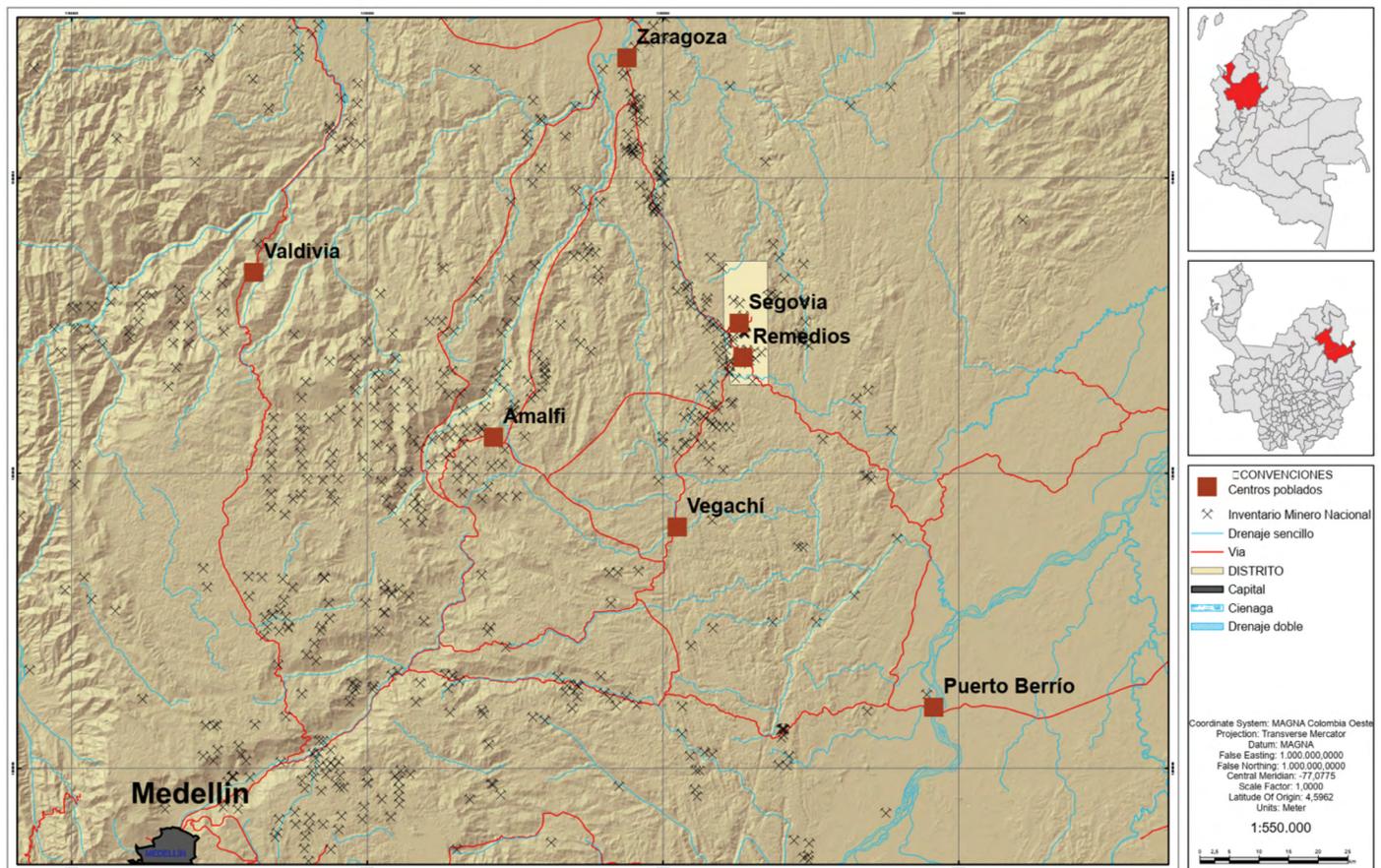
Según las proyecciones de población del DANE para el año 2019 en el municipio de Remedios habitarían 32.057 personas, distribuidos en 11.764 en la cabecera del municipio y 20.293 en la zona rural.

3.3. VÍAS DE ACCESO

Al área de estudio se accede desde la ciudad de Medellín, hacia el Noreste por vía terrestre pavimentada, Medellín-Barbosa, siguiendo 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 Candelaría, del municipio de Yalí (ruta 62A21), luego hacia el norte, por la vía Yalí-Vegachí (ruta 62AN215), hasta llegar a Remedios.

Otro acceso se hace desde el Municipio de Zaragoza tomando la vía sin pavimentar hacia el sur (ruta 25AN172), hasta La Cruzada-Remedios. Adicionalmente, por vía aérea se accede desde Medellín al aeropuerto Alberto Jaramillo Sánchez, de Otú, Remedios, mediante vuelos de la empresa ADA (Aerolíneas de Antioquia).

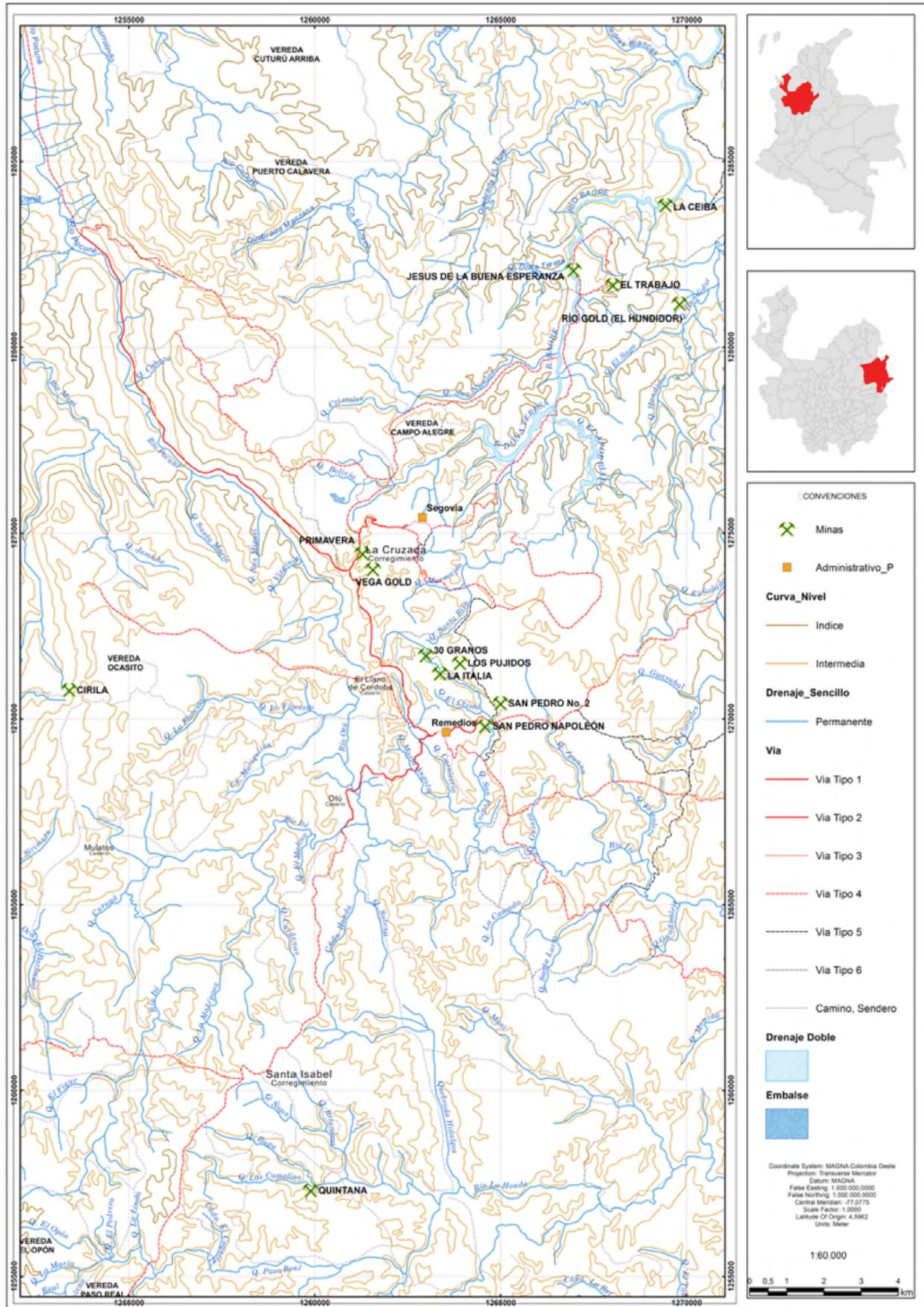
Figura 3.3. Localización de áreas mineras. Fuente: autores.



3.4. UBICACIÓN DE MINAS Y PLANTAS DE BENEFICIO

Las minas y plantas de beneficio visitadas en el municipio de Remedios se localizan en las veredas Río Bagre, Juan Bran, Santa Isabel, Diamante, Camelias Quintana, San Mateo y la planta de beneficio La Palma, localizada en la cabecera municipal de Segovia.

Figura 3.4. Localización de minas visitadas en el municipio Remedios (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.

Roca caja, saprolito, socavón de mina San Pedro - Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano



Como parte del distrito minero del Nordeste y Bajo Cauca están los depósitos auríferos de Remedios, localizados en la región Nororiental del departamento de Antioquia, entre la cordillera Central y la serranía de San Lucas. La actividad minera de la región es también conocida como el Distrito Minero Segovia-Remedios (DMSR).

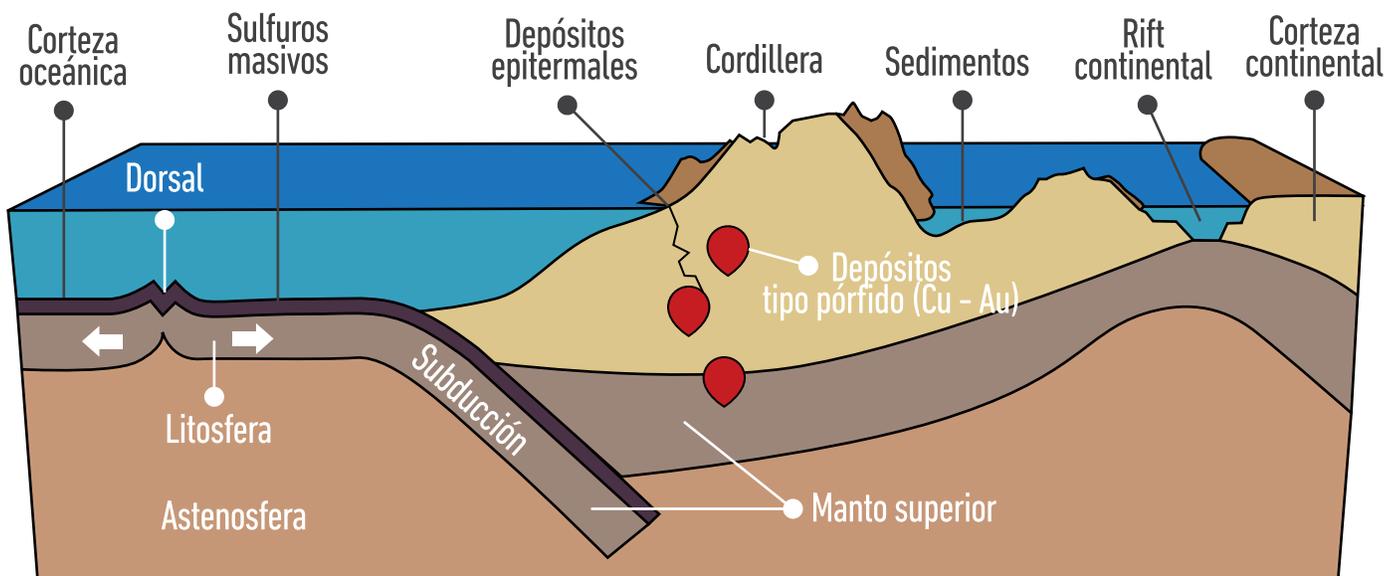
La zona mineralizada se localiza en las inmediaciones de los municipios de Remedios y Segovia, a lo largo de un corredor en dirección N-S, limitado en sus flancos por estructuras regionales coincidentes con trazos del sistema de fallas de Palestina (Ingeominas, 1992). La franja es considerada como una zona de sutura a lo largo de las fallas de Otú y Nus, pertenecientes al sistema de fallas de Palestina, que pone en contacto rocas metamórficas (meta-volcánicas y meta-sedimentarias) con rocas metamórficas precámbricas (gneises cuarzo-feldespáticos y anfibolitas), mucho más antiguas y de afinidad continental (Aspen et al., 1987; Cáceres et al., 2003).

A lo largo de este corredor se hallan secuencias gruesas de sedimentos continentales y rocas vulcano-sedimentarias, así como el emplazamiento de cuerpos graníticos con eventos de calentamiento Jurásicos y afinidad calco-alcalina como el batolito de Segovia (Leal Mejía, 2011) (figura 1). La mineralización aurífera está relacionada con el fracturamiento y relleno que conforman vetas de cuarzo con altos contenidos de oro tras el emplazamiento del batolito de Segovia.

4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES

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. Ellas son:

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



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).

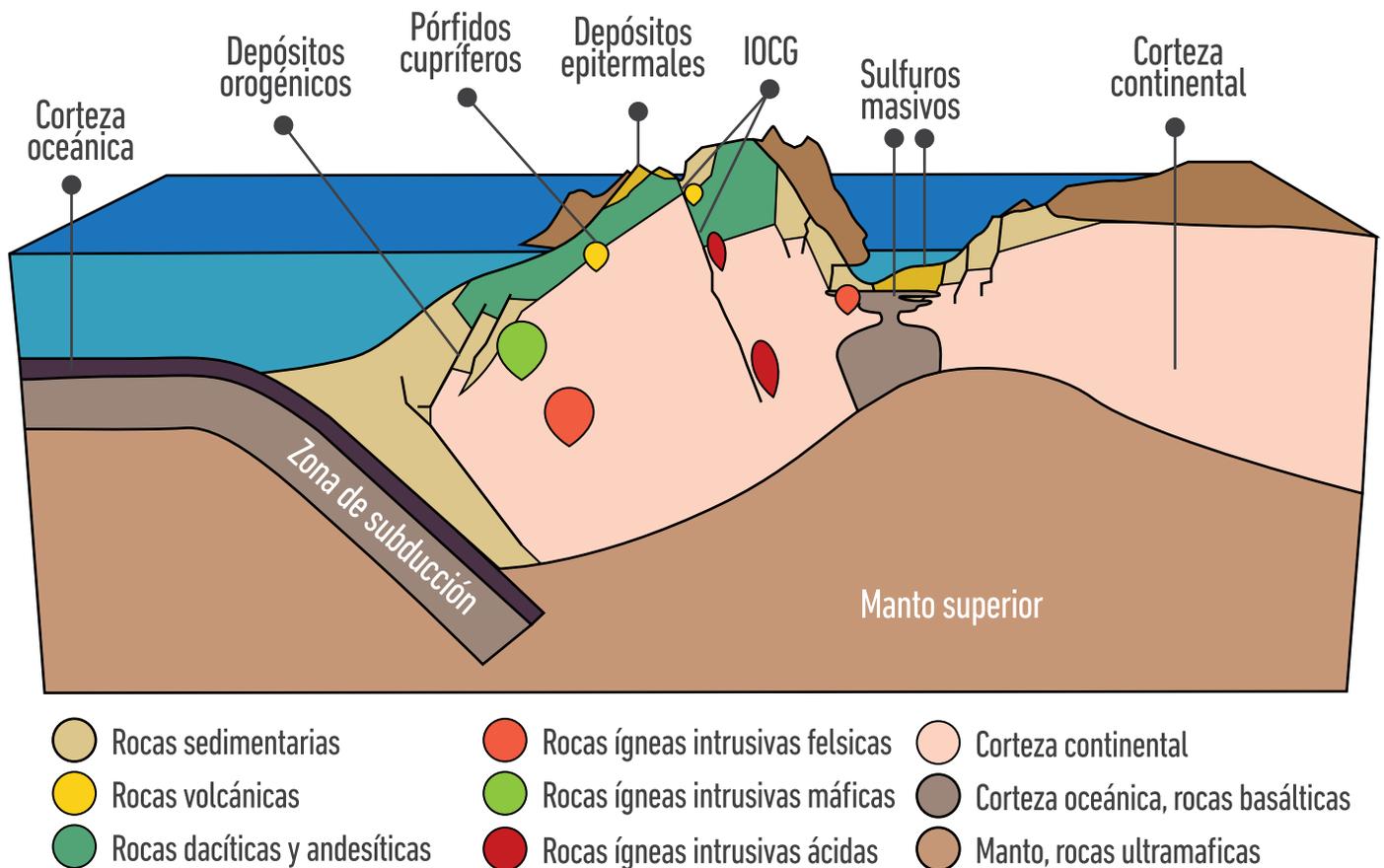
Manto. Es la capa intermedia. Está comprendida entre los 70 y 2900 km de profundidad. En esta capa, que generalmente se subdivide en manto inferior y manto superior.

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.

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).

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).



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).

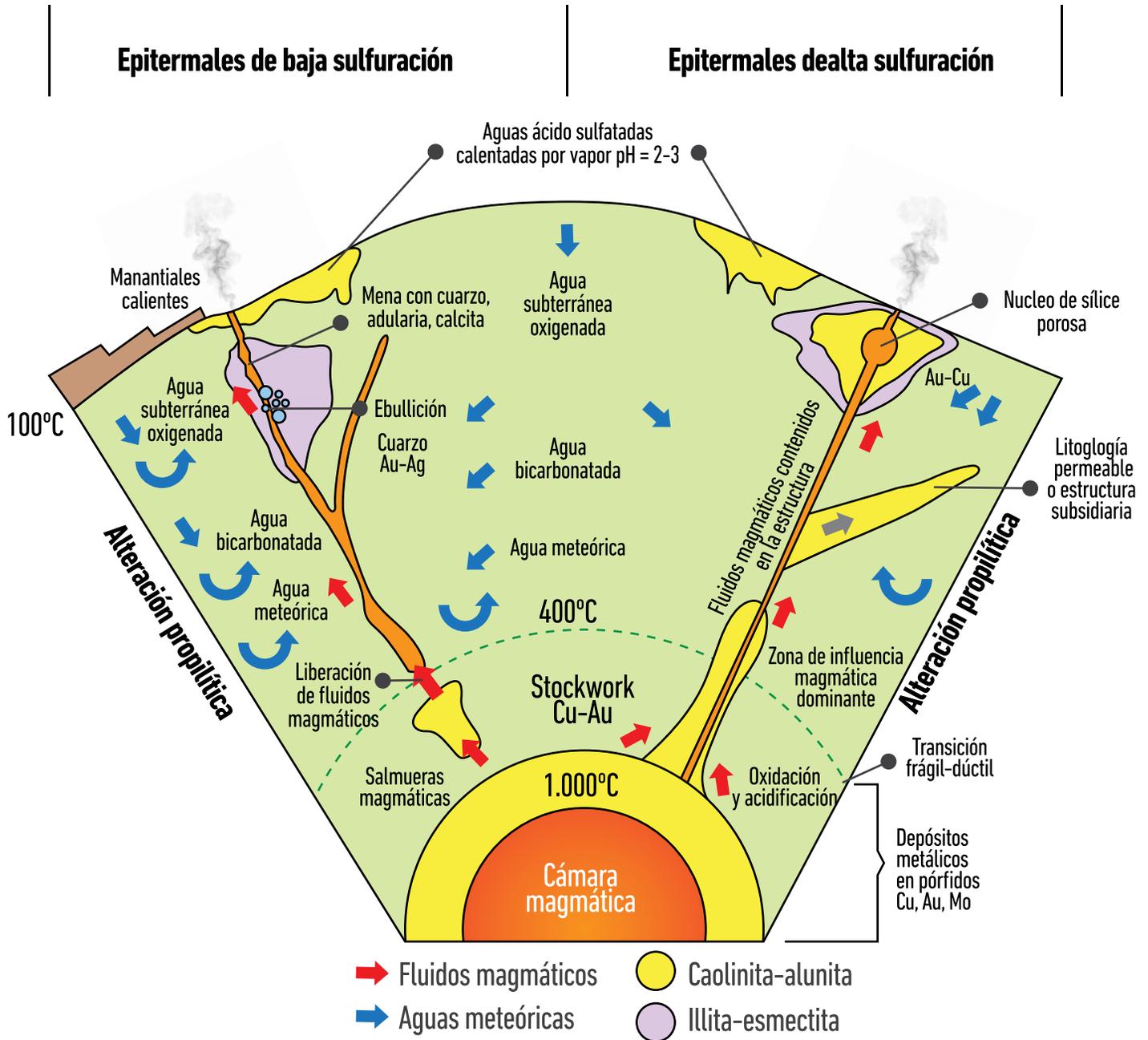
A continuación se mencionan y describen las generalidades de los principales yacimientos auríferos del mundo que han sido descritos, y los que han sido reconocidos en el territorio colombiano, o que tienen potencial en el país, dada la diversidad de ambientes de formación de yacimientos que se presentan:

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 diseminaciones. A escala mundial pueden citarse como ejemplos el depósito de Bajo la Alumbra (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

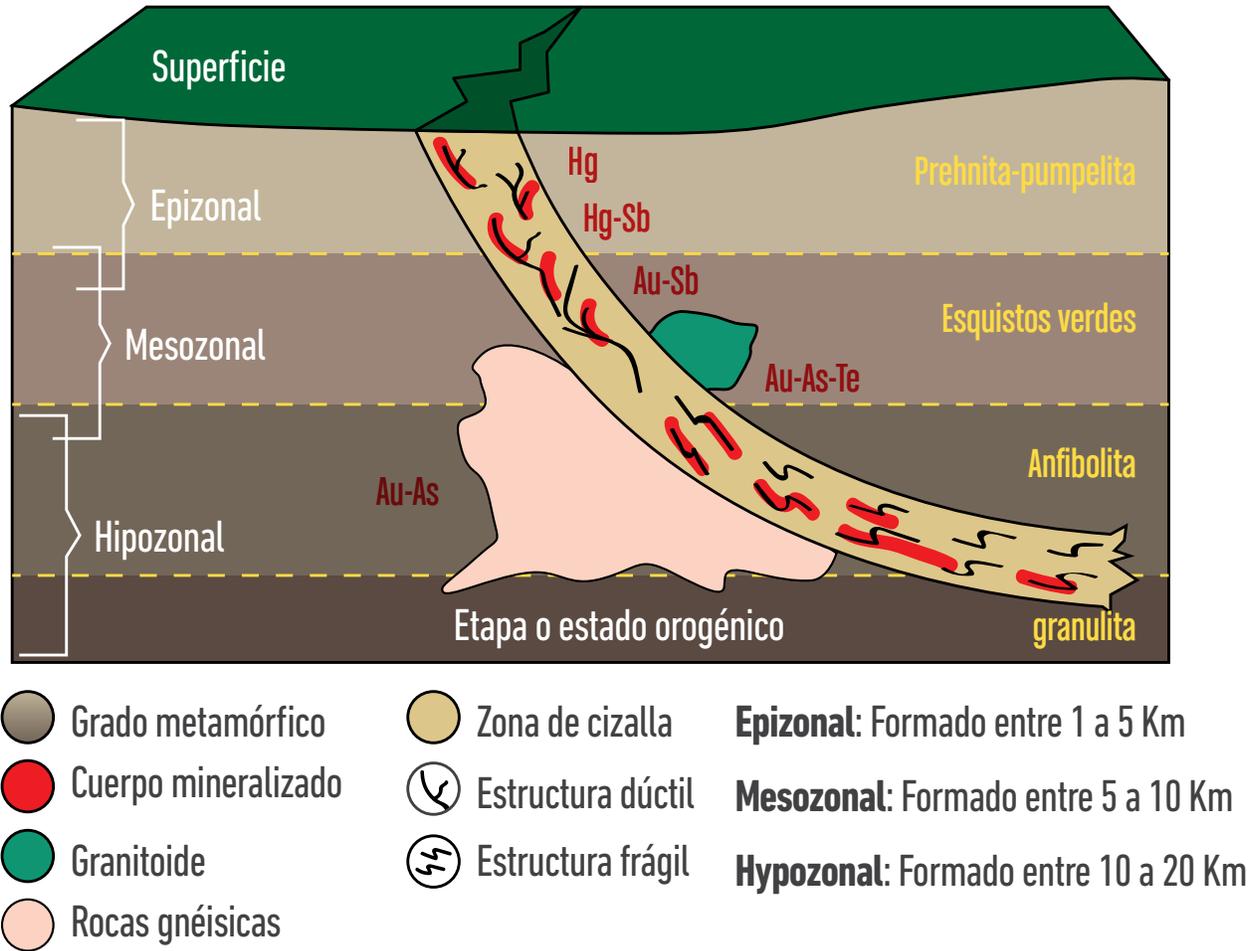
Figura 4.3. Modelo generalizado de formación de depósitos auríferos epitermales. Fuente: tomado de Camprubí et al., 2003.



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).

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.

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



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.

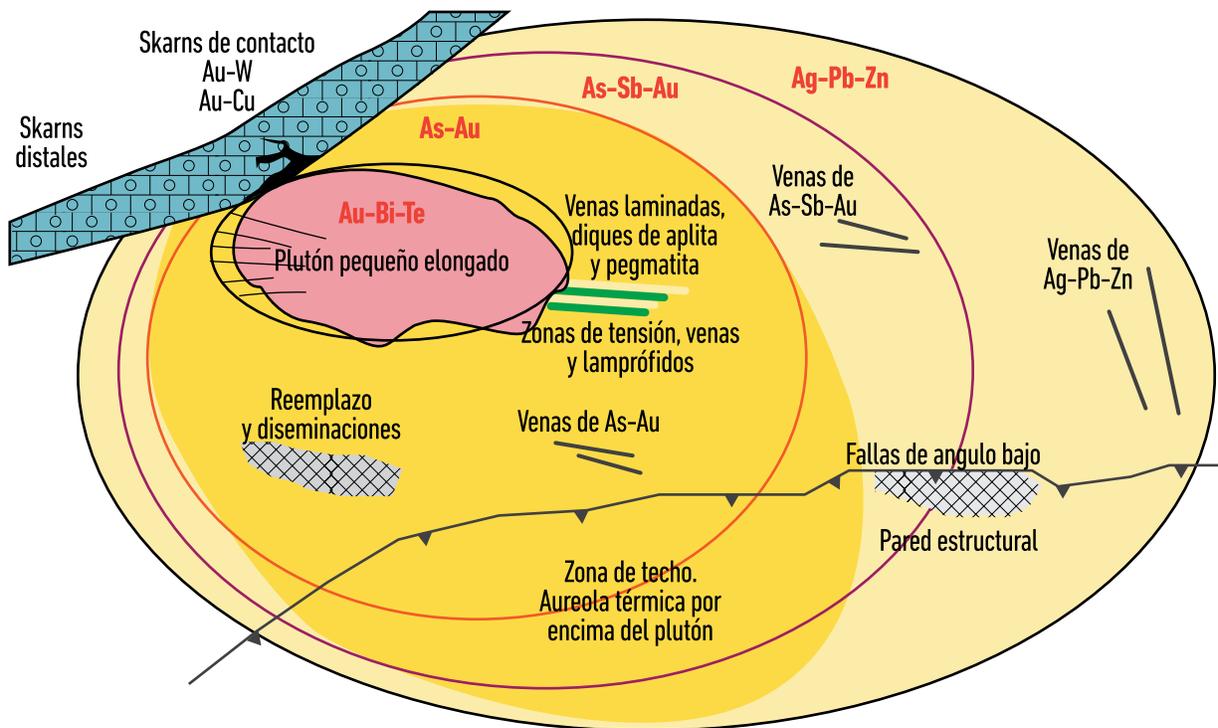
Depósitos de oro relacionados a intrusivos (intrusion related gold deposits). Son depósitos auríferos que tienen un amplio rango de estilos de mineralización característicos espaciales, definidos a partir de un cuerpo magmático central. Depósitos de este tipo se han reconocido Fort Knox (Alaska) y la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

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.

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



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: $Fe(1-x)S$
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.



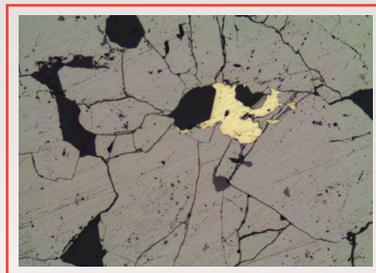
**Galena - Gn
(mena de plomo)**

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

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

OCURRENCIA DE ORO EN LA MENA

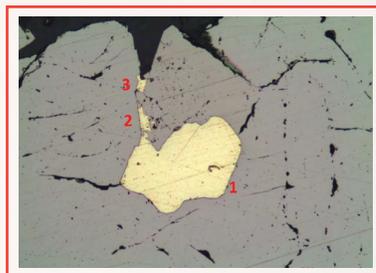
indica la forma, tamaño
y estructura como se
presenta el oro en la
mineralización



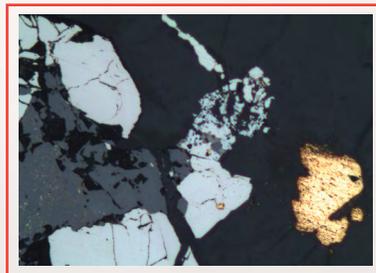
Oro asociado a pirita y cuarzo.



Oro libre.



Oro incluido en pirita y rellenando
fracturas.



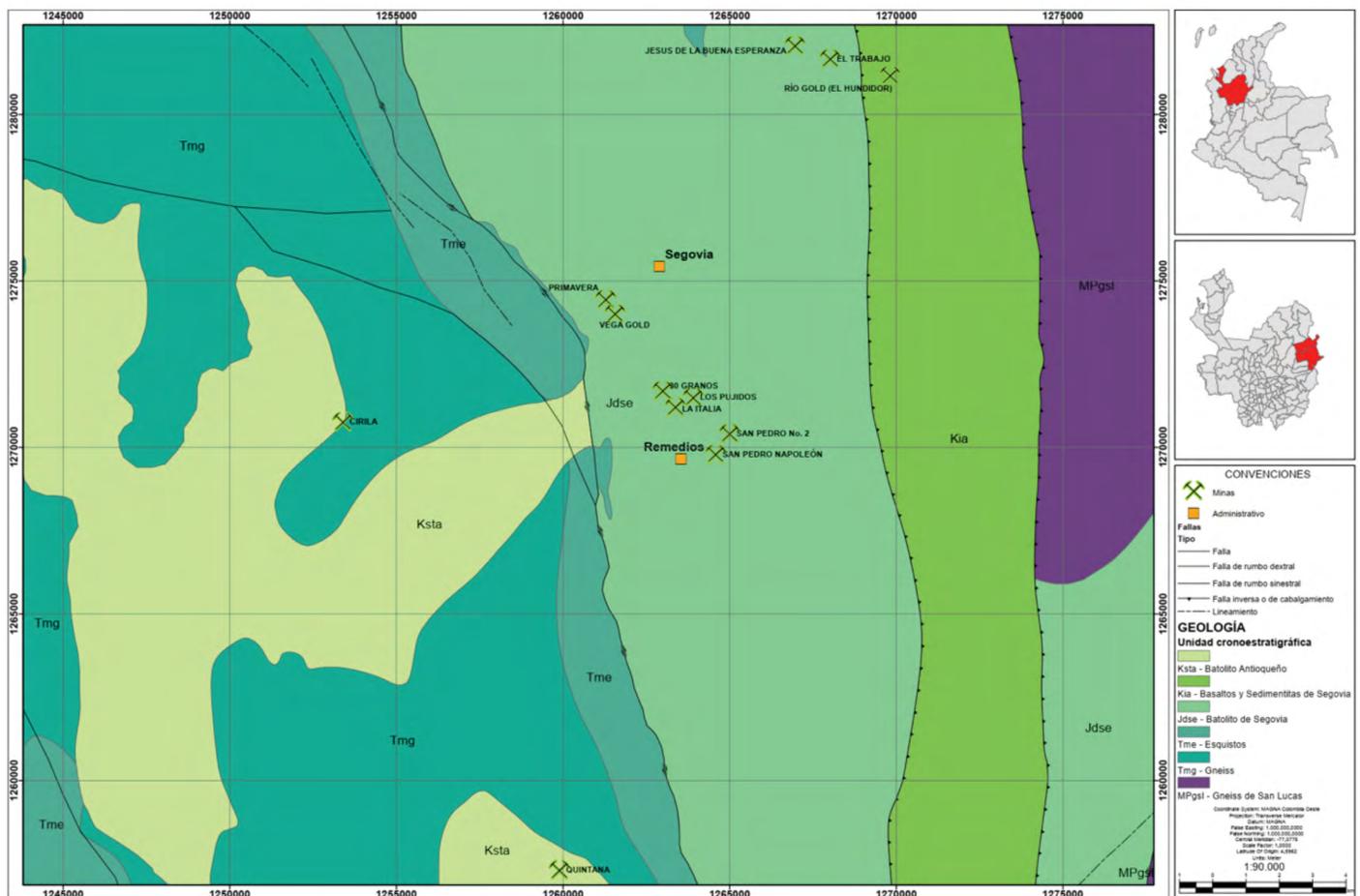
Oro incluido en arsenipirita y libre.

4.2. GEOLOGÍA DEL DISTRITO MINERO DE REMEDIOS (ANTIOQUIA)

4.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional del área de estudio está determinada por la interacción del sistema de fallas de Palestina que tiene dirección predominante Norte-Sur, la cual ha sido considerada como una zona de sutura entre bloques tectónicos compuesta por varios bloques alargados limitados por fallas de rumbo de Otú y El Bagre y pone en contacto neises cuarzo feldespáticos del denominado neis de San Lucas (precámbrico) al Oriente, con metasedimentitas y metavulcanitas del grupo Cajamarca y Arquía al Oeste, alrededor de los cuales ocurre una importante mineralización aurífera. La descripción litológica y relaciones de campo se describen así:

Figura 4.6. Mapa geológico generalizado de la zona de Remedios - Zaragoza. Fuente: autores.



Neis de san Lucas (MPgsl)

El Neis de San Lucas corresponde a una sucesión de esquistos pelíticos, anfibolitas, cuarcitas, neises y mármoles. Esta unidad limita al oeste con la falla del Bagre, se encuentra intruida por el Batolito de Segovia y a su vez, está suprayacida discordantemente por las metasedimentitas de La Cristalina (González et al., 2001).

Complejo Cajamarca. (Tmg – Tme)

Compuesto por rocas metasedimentarias como cuarcitas, esquistos cuarzo-sericiticos, esquistos negros asociados a filitas, esquistos cloriticos 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 & 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 & Toussaint, 1988), que representarían un metamorfismo del Carbonífero. Las dataciones recientes indican una edad 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) Figura 2.

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 m a por el método K/Ar en hornblenda; (Feininger et al, 1972)

Muestras del Batolito de Segovia exhiben relación $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ entre 0,70385 a 0.70434 y DNd entre +1.04 a +6,52, indicando una fuente derivada del manto con pequeñas contribuciones de la corteza. Además, análisis en isótopos de plomo, ubican muestras del Batolito de Segovia entre las curvas orogénica y de corteza superior en un diagrama plumbotectónico, lo que indica una alta contribución radiogénica, y se interpreta como el producto de la interacción con rocas encajantes metapelíticas (Leal-Mejía, 2011).

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 (Alzate, 2006) 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 afaníticas de composición andesita- dacita de color gris verdoso a verde claro, de carácter porfirítico y matriz microcristalina en sección delgada. de edad Jurásico tardío - Cretáceo temprano

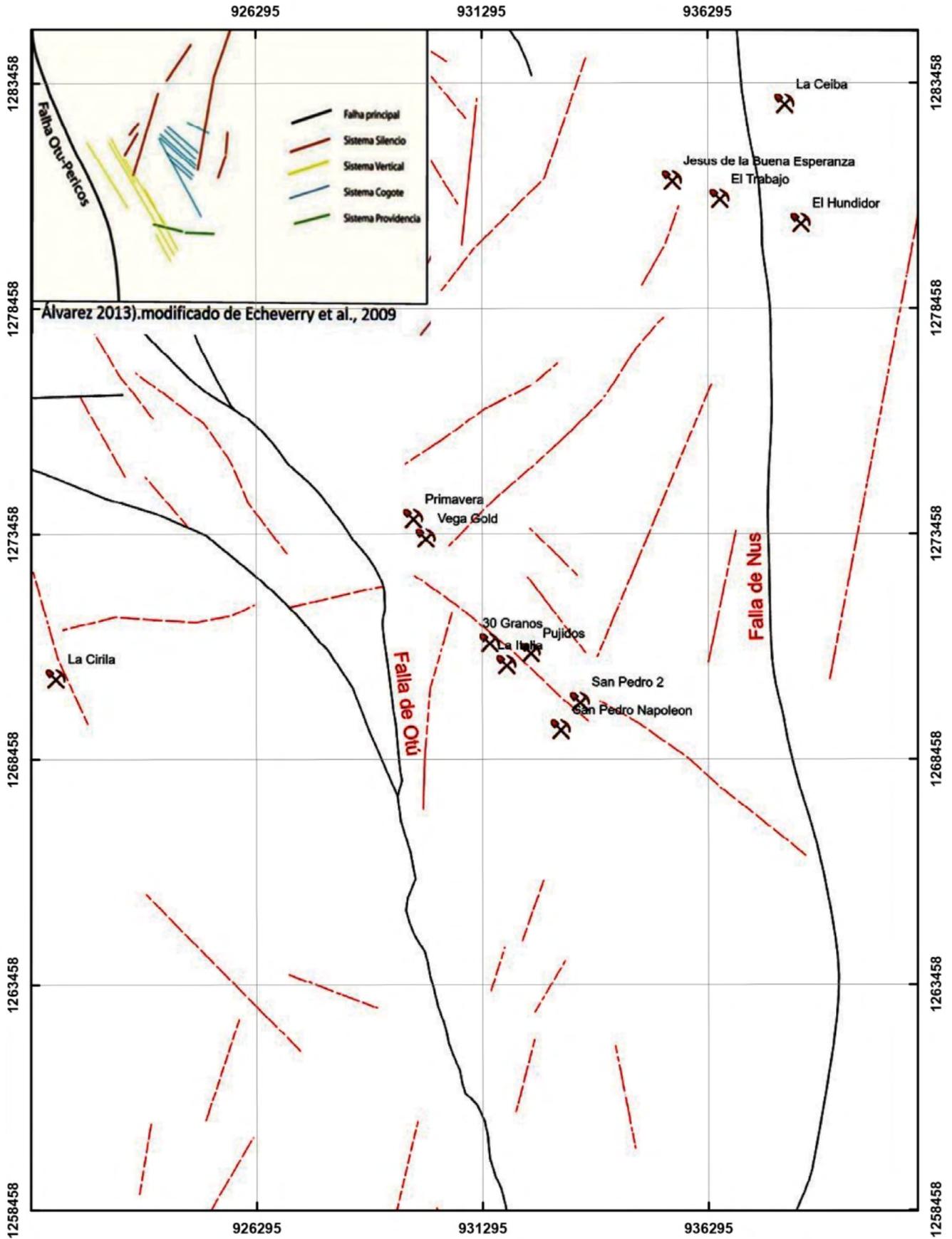
Depósitos aluviales recientes dispuestos a lo largo de las corrientes actuales, principalmente en la quebrada la cianurada y los ríos el Bagre y Tigui sirven para la extracción actual de oro aluvial del área.

4.2.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El carácter estructural y morfológico del área está definido por la transición de regímenes de transpresión, colisiones y magmatismo durante la orogenia Norandina. La acreción a la margen continental del terreno Cajamarca-Valdivia fue acrecentado durante el Paleozoico temprano (Cediel y Shaw, 2018). Su límite corresponde a una zona de sutura que generalmente coincide con el trazo del sistema de fallas de Palestina (Cáceres et al., 2003).

La falla Otú-Pericos es el rasgo tectónico más notable del sistema estructural que controla la región en dirección N-S a $\text{N}10^\circ\text{W}$, dentro del que se encuentran las fallas de Nús y El Bagre, al oriente; estas forman parte del Sistema de Fallas Regionales de Palestina. La falla de Otú tiene una tendencia de $\text{N}20^\circ\text{W}$ con inmersión abrupta y desplazamiento lateral-sinistral de aproximadamente 66 km. Esta define el contacto entre las rocas paleozoicas al oeste que comprenden esquistos cuarzo-sericíticos, así como esquistos grafiticos y esquistos meta-volcánicos del grupo Cajamarca, con intercalaciones de gneises félsicos y rocas cretácicas del batolito de Antioquia —lo mismo que el batolito de Segovia—, al igual que sedimentos y rocas volcánicas básicos cretácicas con gneises del Paleozoico inferior, asociaciones de esquistos micáceo, cuarcita, mármol y rocas calcáreas al este (Bird et al., 2017).

Figura 4.7. Esquema de la distribución de fallas y lineamientos estructurales a partir de interpretación de imágenes DEM (30m). Fuente: autores.

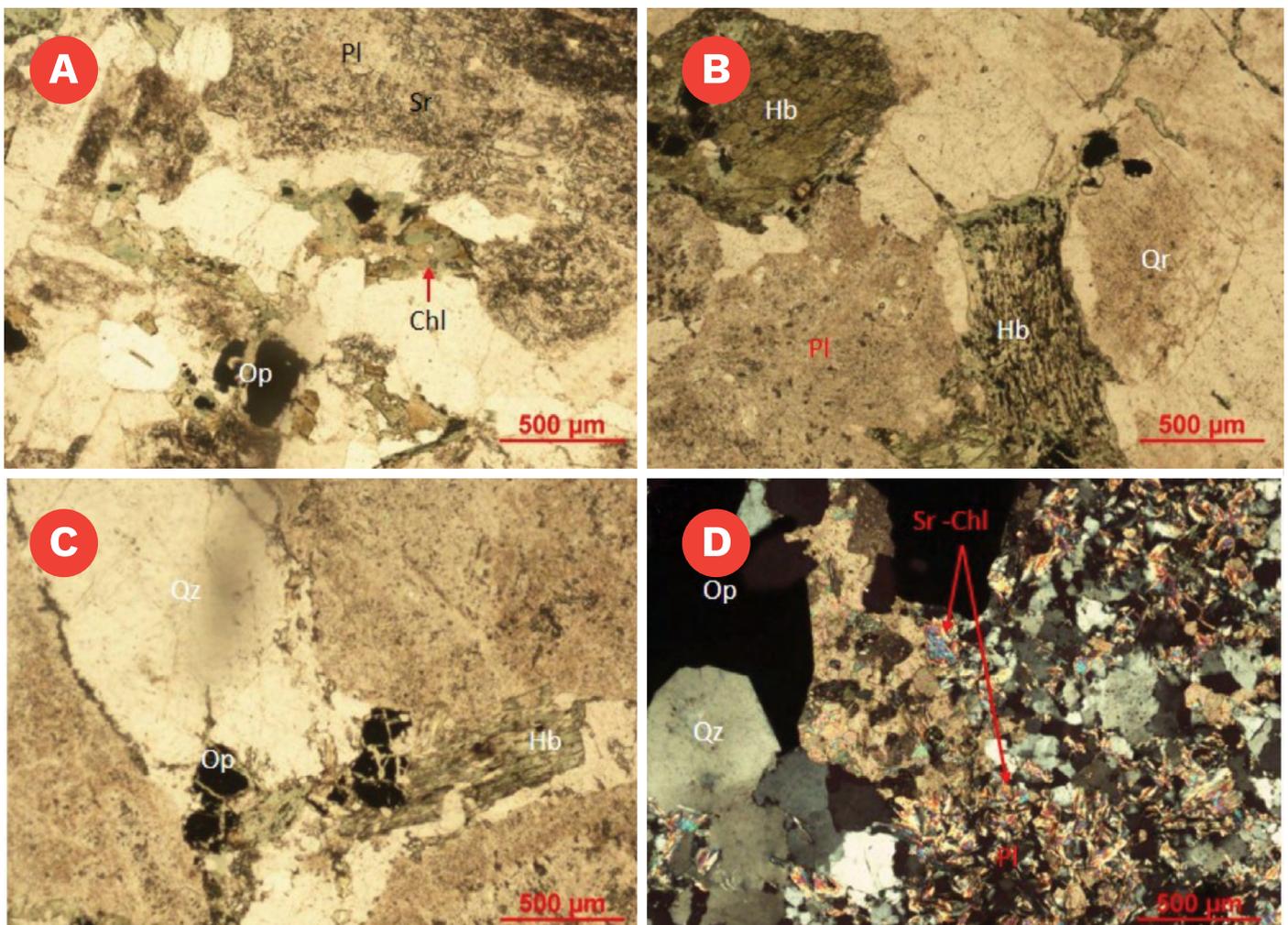


La falla El Bagre presenta una dirección N20°E, con una inflexión hacia el norte en sentido N10°E (Álzate, 2006), con movimiento lateral sinistral y un desplazamiento en rumbo interpretado de más de 50 km. Representa un ramal del Sistema de Fallas de Palestina.

La falla Nús es una estructura con dirección dominante N20°W a N20°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 et al., 1972). Atraviesa los municipios de Vegachí, Remedios y Segovia, en dirección N-S, asociado al emplazamiento de intrusivos, relacionados a mineralizaciones auríferas presentes en el Distrito Minero de Segovia-Remedios (Leal-Mejía, 2011).

En el presente trabajo, las observaciones estructurales muestran que las diferentes etapas de deformación generan estructuras con relleno de cuarzo sulfuros en tres direcciones principales: la primera con una tendencia N-S a N10°W, a la que se asocian en este trabajo las minas La Cirila en el sector occidental y La Primavera en el sector central; la segunda familia de estructuras presenta una tendencia general NNE a N40-50°E, dentro de las que se encuentra la mina Vega Gold en el sector central; y la tercer tendencia con mayor densidad de minas visitadas asociada hace referencia a estructuras con dirección N40°-70°W o E-W con buzamientos de alto grado, dentro de las cuales se asocian las minas 30 Granos y La Italia en el sector central. En general, los sectores visitados presentan estructuras asociadas a los tres sistemas principales de fracturamiento con buzamientos bajos entre los 35° y 50° de inclinación al E y espesores variables para el caso de las minas visitadas entre 0,15 m y 3 m.

Fotografía 4.1. Rocas ígneas de la zona Central con fuerte alteración hidrotermal. (A. Monzogranito con textura holocristalina constituido por plagioclasa (Pl) reemplazada completamente por sericita, clorita (Chl), opacos (Op) y cuarzo (Qtz), 50X, PPL. Mina Primavera, muestra ODC-058R. B. Granodiorita hornbléndica con textura holocristalina constituida por plagioclasa (Pl), ortosa (Or), cuarzo (Qtz) y hornblenda (Hb) reemplazada por clorita. 50X, PPL. Mina Pujidos, muestra ODC-060R. C. Opacos (Op) en contacto con hornblenda (Hb) completamente reemplazada por clorita. 50X, PPL. Mina Pujidos, muestra ODC-060R. D. Seudomorfos de sericita y clorita que reemplazan completamente los cristales de plagioclasa (Pl) en contacto con opacos (Op) y cuarzo (Qtz). 50X, XPL. Mina El Trabajo, muestra PDH-017R). Fuente: autores.



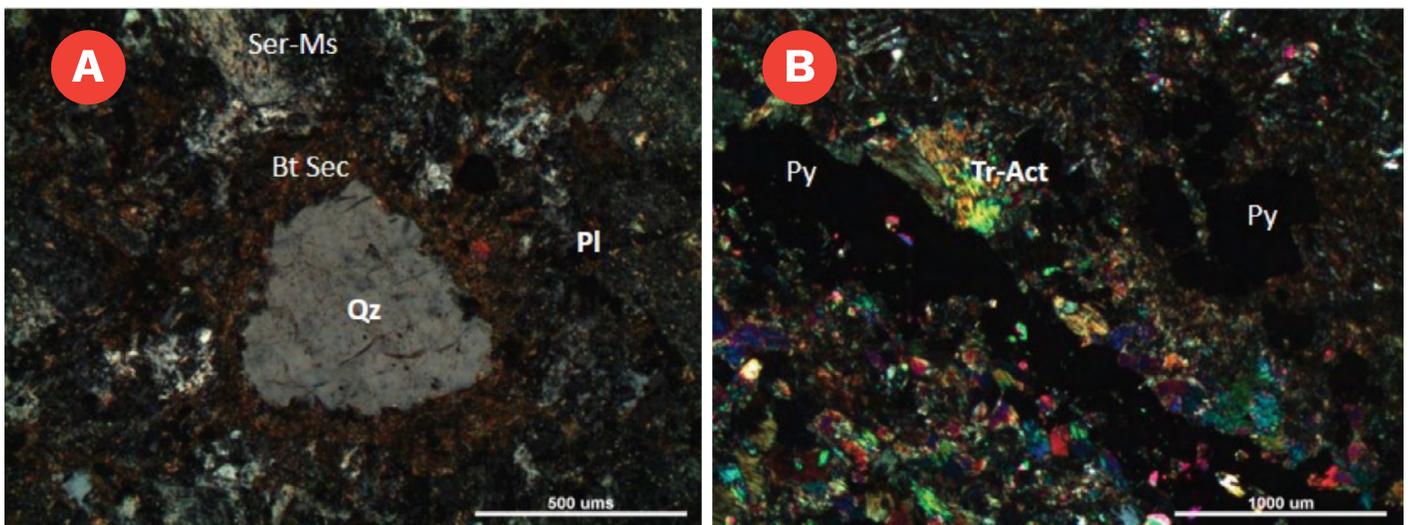
La interpretación de imágenes digitales de terreno (DEM-30 m) permite diferenciar rasgos estructurales con algunos lineamientos que coinciden con las principales tendencias de filones auríferos.

4.2.3. ALTERACIÓN HIDROTERMAL

La alteración presente en el área de Remedios se restringe desde pocos centímetros a metros de las estructuras mineralizadas. La alteración hidrotermal predominante es una sericitización moderada que afecta principalmente los cristales de plagioclasa y feldespato alcalino; en ocasiones es acompañada de cuarzo de recristalización, pirita y carbonatos diseminados o en parches. El evento tardío o posmineralización está asociado a carbonatación como relleno de fracturas, diseminados o en parches. Fotografía 4.1.

Aureolas de contacto alrededor de zonas importantes de intrusivos generan zonas de silicificación intensa. En el sector noreste en la mina Jesús de la Buena Esperanza, además de silicificación, se logra apreciar en sección delgada la asociación mineralógica clorita, tremolita, actinolita, epidota y carbonatos, dispuestos a manera diseminada y en vetillas correspondiente a una alteración sódico-cálcica. Como alteración subordinada hay presencia de biotita secundaria en parches, rodeando a los microfenocristales, así como en vetillas discontinuas o como pseudomorfos, de posibles cristales de anfíbol (figura 8). Relacionada a esta alteración, se presenta pirita (~1,6 %), magnetita (~1,6 %), ilmenita y calcopirita diseminadas. En los diferentes sectores muestreados la presencia de óxidos de hierro y en menor proporción caolinita se asocia a alteración supérgena.

Fotografía 4.2. Roca caja, alteración hidrotermal y mineralización de la mina Jesús de La Buena Esperanza. (A. Aspecto general y detalle de microfenocristal de cuarzo (Qz) rodeado por biotita secundaria (Bt Sec). B. Vetilla de tremolita-actinolita (Tr-Act) asociada a pirita). Fuente: autores.



4.2.4. METALOGÉNESIS Y MINERALIZACIÓN AURÍFERA

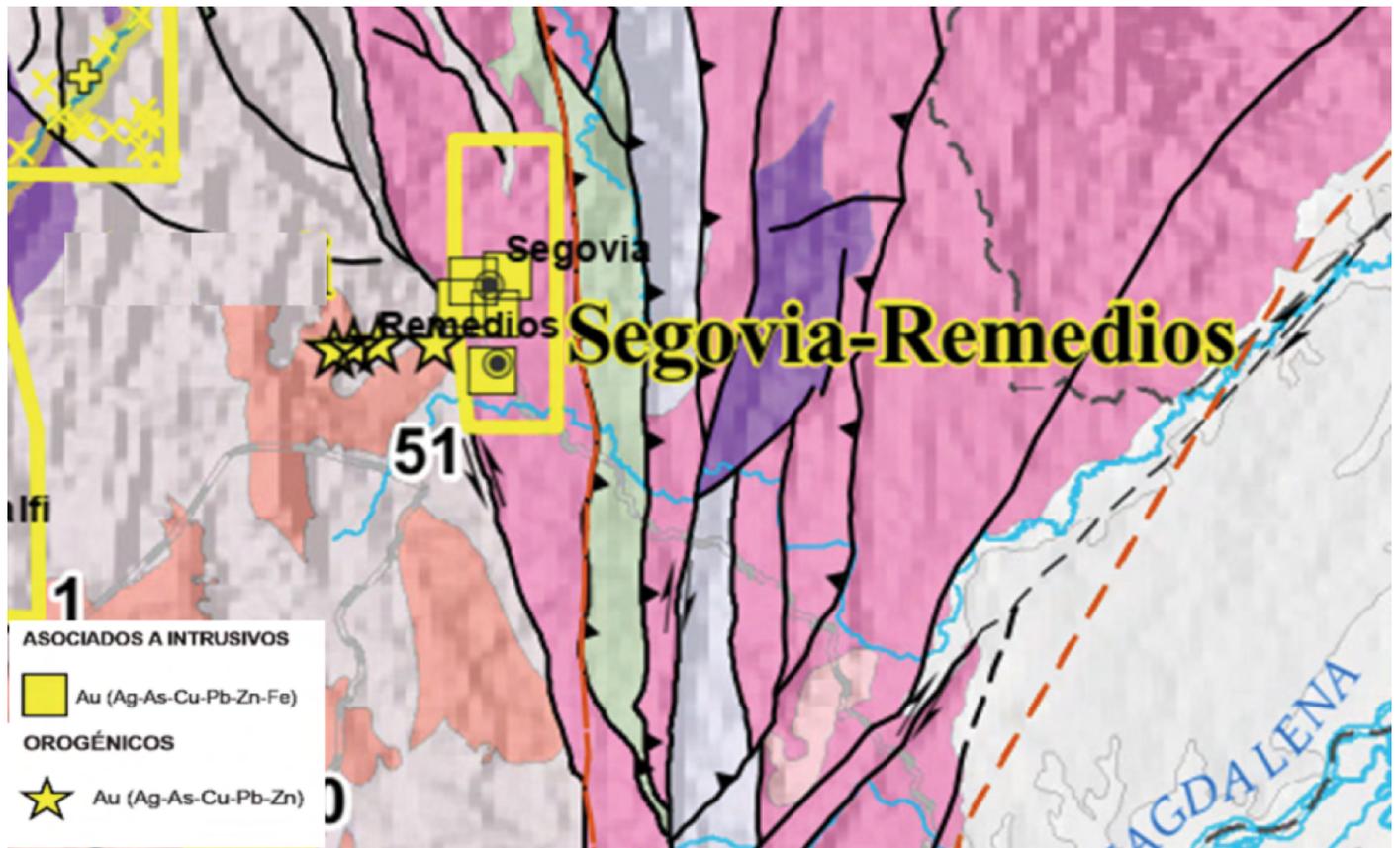
Las explotaciones mineras del área de Remedios, localizadas en el flanco oriental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, pertenecen a la provincia metalogénica Andina Central, conforman el distrito minero de Segovia-Remedios (DMSR) donde se han clasificado 2 tipos de depósitos: uno relacionados con intrusivos y otro relacionado con depósitos de tipo orogénico con mineralización metálica de Au, Ag, As, Cu, Pb y Sn.

La edad de la mineralización se ha establecido como Cretácica, para los depósitos minerales y mineralizaciones vetiformes del distrito minero, ya que las edades de cristalización, alteración, datos isotópicos y relaciones espaciales con los pórfidos granodioríticos y el cercano stock de La Culebra apoyan una relación temporal entre mineralización y emplazamiento de 89-78 Ma, que corresponde a un evento metalogénico del Batolito Antioqueño y no hay ninguna relación con la historia de enfriamiento del Batolito de Segovia de edad Jurásico medio a tardío. (Leal-Mejía et al 2011).

4.2.4.1. CARACTERÍSTICAS METALOGENÉTICAS DE EXPLOTACIONES

La mineralización es predominantemente vetiforme, controlada estructuralmente debido a esfuerzos tectónicos originados en el sistema de fallas de Palestina y se alojan principalmente en rocas del Jurásico medio y tardío del batolito de Segovia. En la periferia, las estructuras mineralizadas se alojan tanto en las zonas de contacto con rocas metamórficas en el sector occidental, como en zonas de contacto con rocas vulcanosedimentarias brechadas en el sector oriental.

Figura 4.8. Mapa metalogénico para el área de Segovia remedios. Fuente: autores.



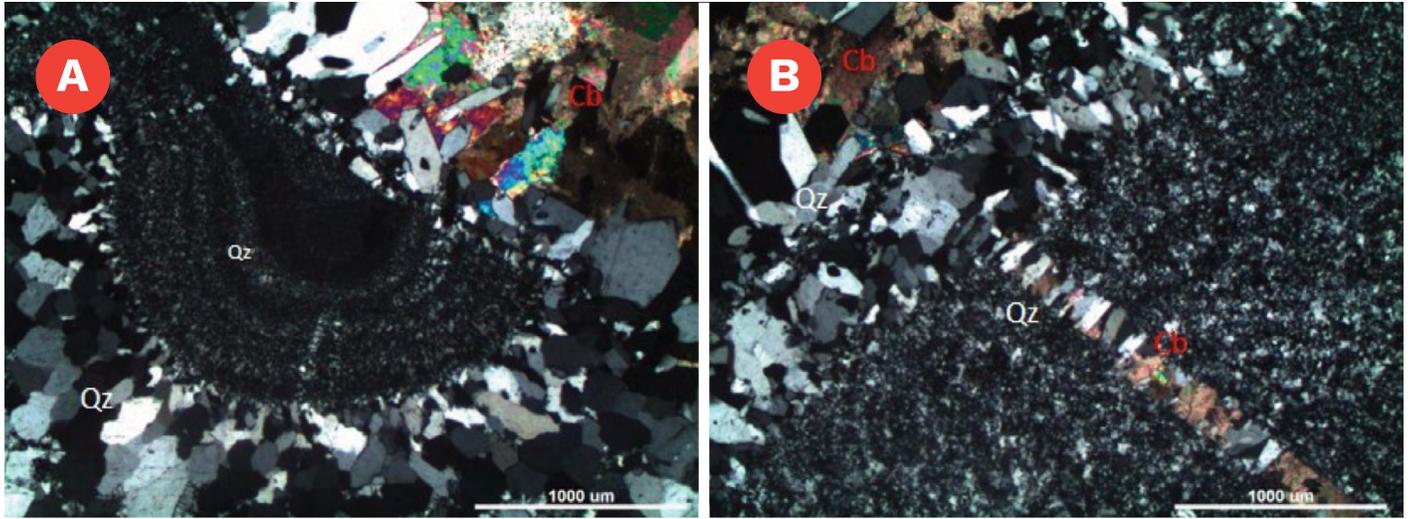
En general, la mineralización aurífera está relacionada con vetas de cuarzo blanco masivas, con texturas en peine y texturas bandeadas de cuarzo sulfuro. Se dan, principalmente, pirita, esfalerita, galena y oro, con cantidades menores de pirrotina a profundidad y calcopirita; además, altera a calcosina, covelina, bornita y, ocasionalmente, a carbonato en baja proporción y arsenopirita en algunos sectores.

Las vetas presentan espesores variables hasta de 3 m, formas tabulares y contactos netos, principalmente con rocas graníticas del batolito de Segovia al este de la falla Otú (sector central). De forma eventual, las vetas se hallan en zonas de cizalla o se encuentran internamente falladas por reactivación de los esfuerzos, en general, rumbodelizantes.

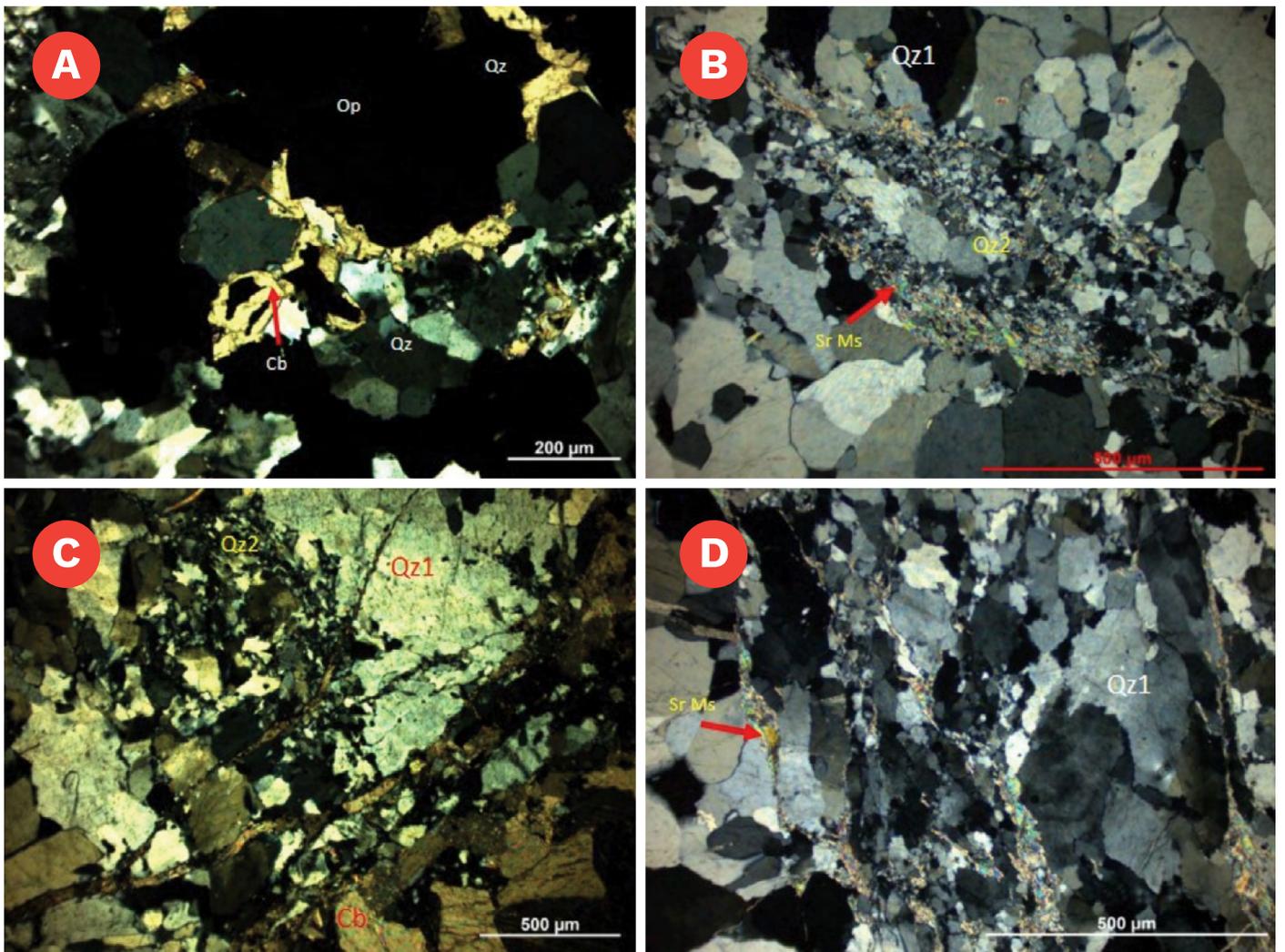
Las características metalogénicas de explotaciones tradicionales y artesanales en los sectores definidos para este trabajo, derivadas de análisis petrográficos de 11 secciones delgadas pulidas de muestras de roca y veta son las que se describen a continuación.

Para el Sector noreste, El sector noreste se localiza en la cuenca de la quebrada La Cianurada, donde se encuentran las minas de Jesús de La Buena Esperanza, El Hundidor y El Trabajo. La mineralización en general corresponde a vetas de cuarzo con porcentajes variables entre el 48 % y el 70 %; de textura masiva, igualmente se observan texturas en peine, cuyos espacios fueron rellenados por fluidos coloidales ricos en

Fotografía 4.3. Microfotografía de venas de cuarzo presente en la mina El Hundidor. A) Cuarzo (Qz) con textura en peine y bandas de textura coliforme. Se observa carbonato (Cb) rellenando espacios. B) Cuarzo (Qz) con textura en mosaico y en mortero, así como una vetilla de cuarzo y carbonato (Cb), además de rellenos de este último mineral. Fuente: autores.

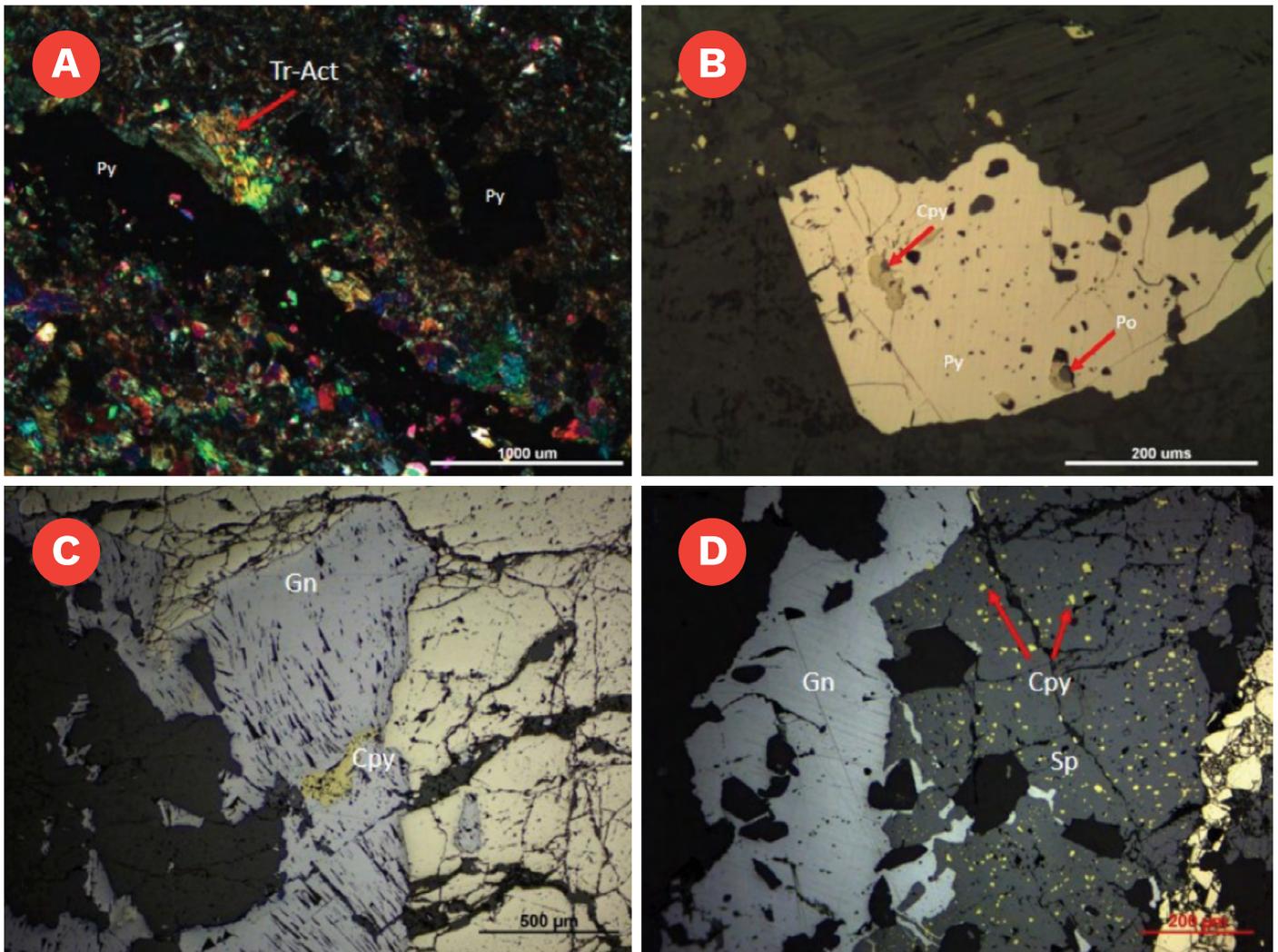


Fotografía 4.4. Microfotografías en las que se evidencia procesos de deformación en el sector noreste. A) Cuarzo (Qz) y carbonato (Cb) asociados a minerales opacos (Op). B) Cuarzo (Qz) de primera generación y cuarzo más pequeño por recristalización junto a vetillas de sericita-muscovita (Ser-Ms). C) Cuarzo (Qz) masivo y de recristalización, cortado por vetillas irregulares de carbonato (Cb). D) Textura general de la vena, nótese cuarzo (Qz) con textura mortero como producto del cizallamiento del cuarzo más grande. Nótese vetillas discontinuas sinuosas y discontinuas de sericita-muscovita (Ser-Ms). Fuente: autores.



sílice, que propiciaron la formación de una segunda generación de cuarzo con textura coloforme y localmente crustiforme. También se observan texturas en mosaico y mortero con extinción ondulante y bandas de recristalización de cuarzo que evidencian procesos de deformación, además de la presencia de múltiples facturas y vetillas, en ocasiones rellenas de carbonatos el 11 %. Son acompañadas de pirita (26 %), esfalerita (2,7 %), calcopirita (1,3 %) (alterada parcialmente a covelina-calcosina y bornita), galena (2,8 %) y pirrotina (<0,1 %). Se observaron vetillas de carbonato con pirita (4,5%) y calcopirita (1,8 %) cortando la veta principal. Las rocas hospedantes son lutitas carbonosas y margas asociadas a las sedimentitas de Segovia. Fotografías 4.3, 4.4, 4.5.

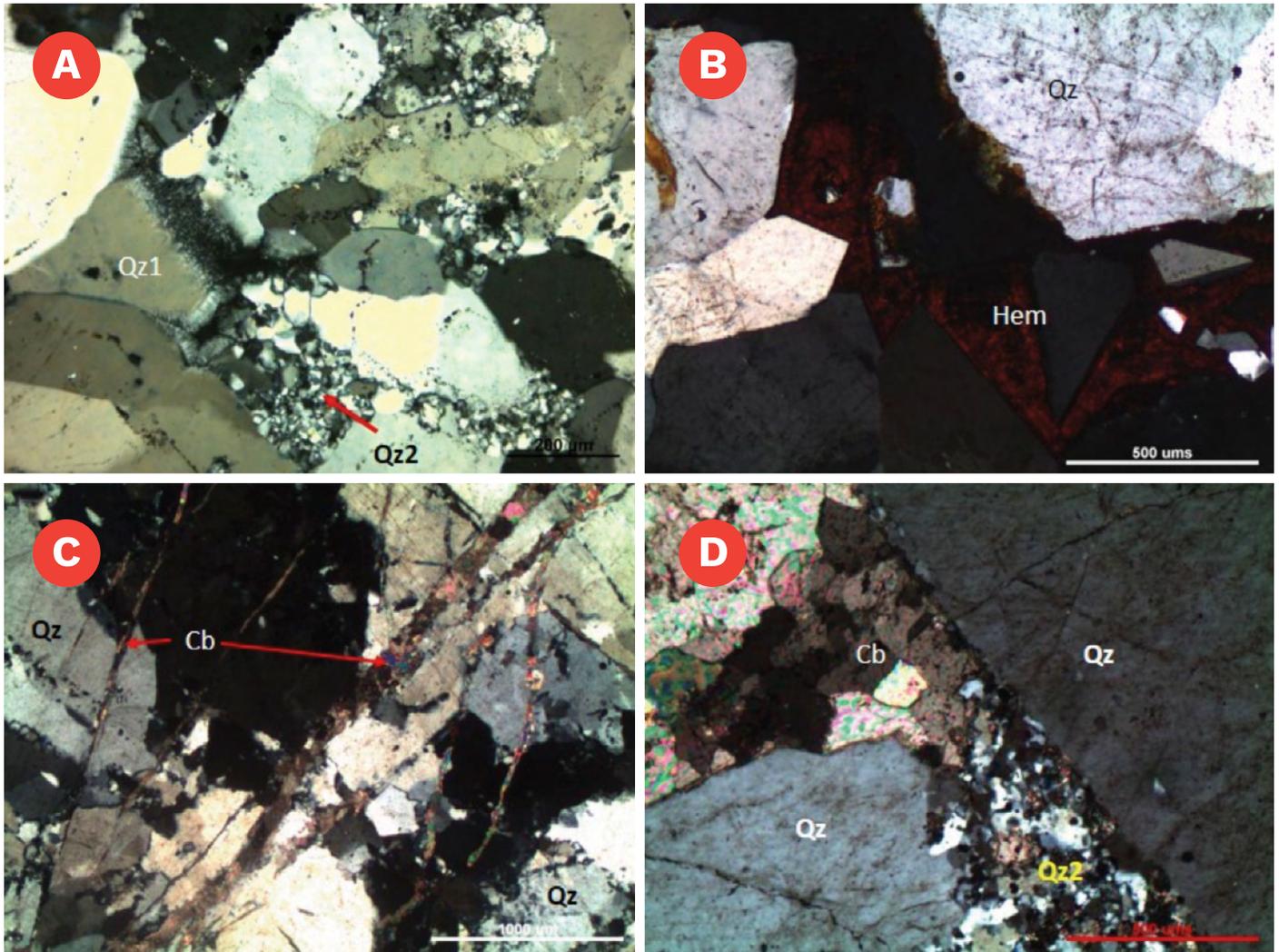
Fotografía 4.5. A) Vetilla de tremolita-actinolita (Tr-Act) asociada a pirita (Py). B) Detalle de cristal de pirita (Py) con inclusiones de pirrotina (Po) y calcopirita (Ccp). C) Asociación de pirita (Py), galena (Gn) y calcopirita (Ccp). D) Cristales de pirita (Py), galena (Gn) y esfalerita (Sp), este último con inclusiones de calcopirita (Ccp). Fuente: autores.



El sector central se localiza en las inmediaciones de los municipios de Segovia y Remedios. Allí se visitaron las labores mineras de 30 Granos, La Primavera, Los Pujidos, Vega Gold, San Pedro y La Italia. Los filones corresponden a venas de cuarzo (entre el 40 % y el 70 %), de textura masiva, localmente en peine y brechada, así como cuarzo de recristalización con carbonato (< 0,1 %), asociados a pirita con proporciones variables entre el 0,3 % y el 48 %. En menor proporción, están asociados o como inclusiones: galena (1,8-2,5 %), esfalerita (0,1-4,3 %), calcopirita (0-1 %) y oro (0-0,3 %). La presencia de pirrotina es variable en la zona, desde traza hasta el 3,4 % fuertemente alterada a pirita-marcasita. La pirita suele ser de tamaño medio a grueso, ocasionalmente fino, con esporádicas inclusiones de calcopirita, pirrotina, esfalerita, galena y oro. Petrográ-

ficamente, también fueron reconocidas dos generaciones de vetillas, cortando los minerales preexistentes. La primera corresponde a vetillas de cuarzo sin mineralización asociada, seguido por vetillas de carbonato.. (Fotografías 4.6)

Fotografía 4.6. A) Cuarzo (Qz) con textura en peine y hematita (Hem) como relleno. B) Cuarzo (Qz) masivo y con texturas mortero y mosaico por recristalización. C) Cuarzo (Qz) masivo cortado por vetillas de carbonato (Cb). Nótese cuarzo de recristalización y microdesplazamientos. D) Cuarzo (Qz) masivo y de recristalización, además de carbonato (Cb). Fuente: autores.

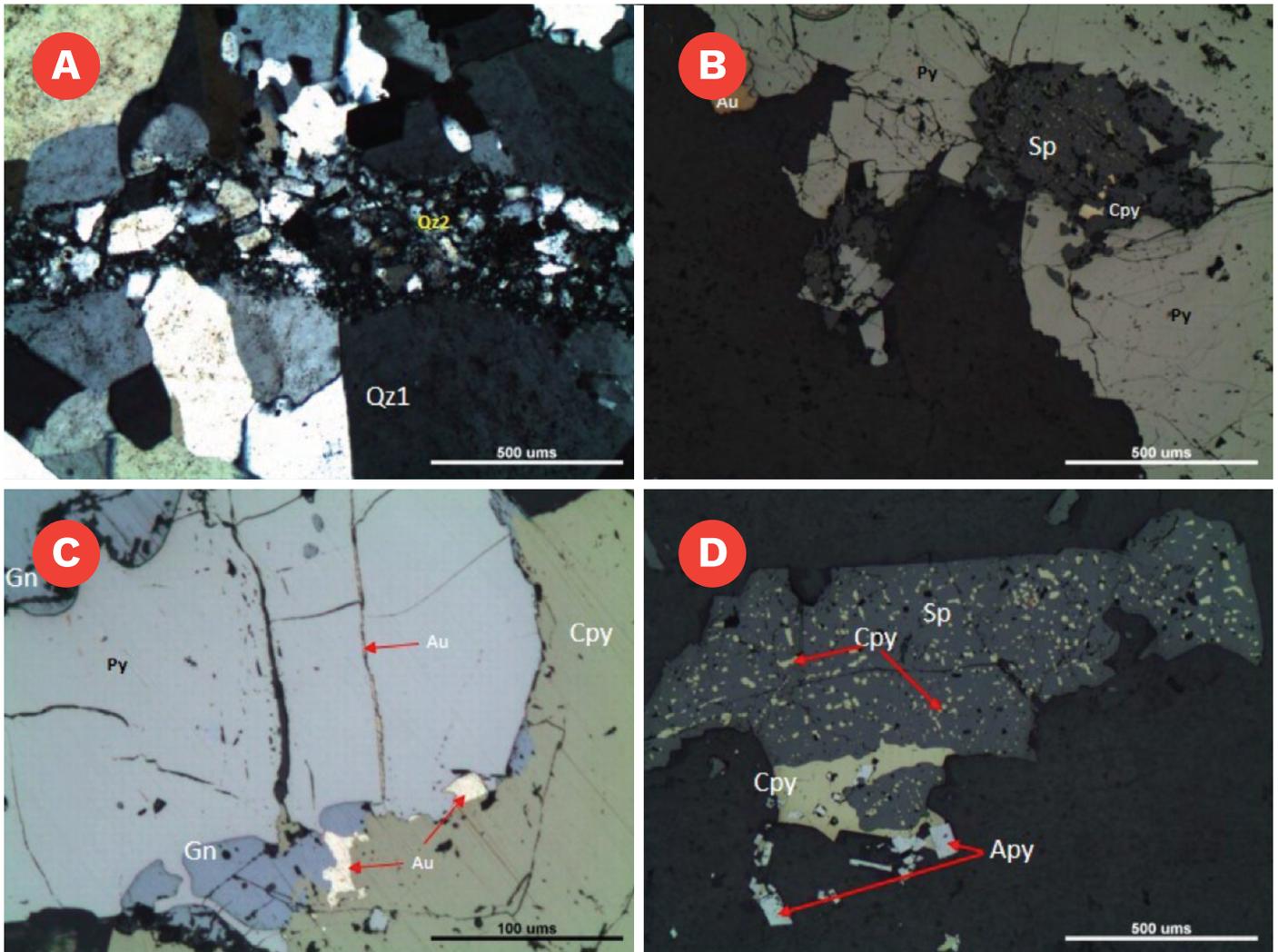


En el sector occidental la mineralización se encuentra en una vena de cuarzo de grano grueso con textura masiva y en peine (figura 4.7. A), asociado con pirita (20,1 %), arsenopirita (4 %), calcopirita (1,3 %), esfalerita (1,3 %), pirrotina (0,7 %), galena (~1,7 %) y oro (0,2 %) (figura 4.7. B, C y D). Esta estructura fue sometida a un proceso de cizallamiento que generó recristalización del cuarzo, desarrollando textura en mosaico y brechamiento de los minerales preexistentes. Estos espacios fueron aprovechados por un segundo evento de mineralización, en el que se depositó calcopirita (1 %) y oro (0,1 %); además, se relaciona con la introducción de sericita y carbonato, en forma diseminada y en vetillas con intensidad débil.

En el sector sur se encuentra la mina Quintana, donde se analizan muestras de veta en los niveles 1, 5 y 6, correspondientes a cuarzo masivo localmente brechado, con ocasionales cristales de carbonato (0 %-4 %) (figura 4.8. A). Hay presencia de un fragmento lítico encontrado en la muestra del nivel 1 constituido por cuarzo, plagioclasa y biotita como minerales primarios, donde se identificaron carbonato y clorita como minerales de alteración. Este fragmento fue arrastrado durante el primer evento de cuarzo masivo. No obs-

tante, la asociación de los minerales de mena para las tres muestras es diferente. En el nivel 1 la veta solo contiene pirita y calcopirita menores al 0,1 %, como minerales de mena, dispuestos de forma diseminada dentro de la estructura (figura 4.8. C). En el nivel 6, la mineralización corresponde a pirita, calcopirita, esfalerita y galena, en proporciones <1 %. La mineralización más significativa se relaciona con la muestra del nivel 5 con grandes cristales de pirrotina masiva (20,3 %) y en agregados: pirita (3,9 %), galena (0,7 %) y, en muy baja proporción, esfalerita, calcopirita y oro (<0,1 %); este último incluido o asociado con pirrotina y galena (figura 4.8. C). Todas las muestras evidencian un evento de cizallamiento que recrystaliza el cuarzo generando textura en mosaico (figura 4.8. D), así como alteración supérgena dada por el desarrollo de óxidos de hierro, tanto en vetillas como en reemplazo de los sulfuros.

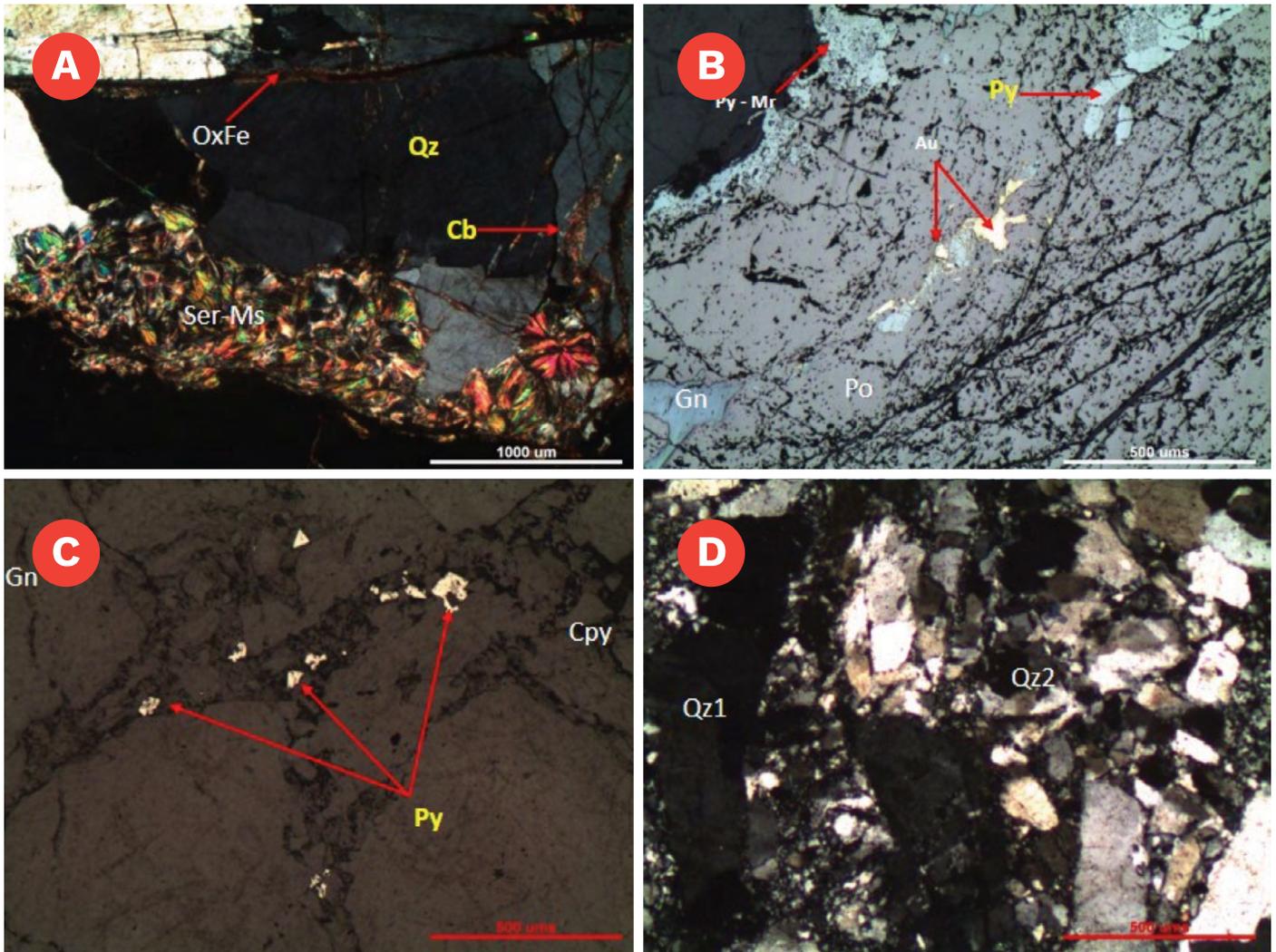
Fotografía 4.7. A) Cuarzo (Qz) masivo y de recrystalización. B) Asociación de pirita (Py), esfalerita (Sp), calcopirita (Ccp) y oro (Au). C) Pirita (Py) con fracturas rellenas de oro (Au), asociada con galena (Gn), calcopirita (Ccp) y oro. D) Esfalerita (Sp) asociada con arsenopirita (Apy) y calcopirita (Ccp). Nótese textura enferma, dada por inclusiones de calcopirita en esfalerita. Fuente: autores.



4.2.4.2. MICROTERMOMETRIA Y ANALISIS DE INCLUSIONES FLUIDAS.

Para establecer las condiciones fisicoquímicas de la mineralización aurífera del área de Remedios se realizaron análisis microtermométricos de inclusiones con muestras de las labores mineras en los sectores noreste, centro y occidente.

Fotografía 4.8. A) Vena de cuarzo (Qz) con relleno de sericita-muscovita (Ser-Ms) y presencia de óxidos de hierro (FeOx) y carbonato (Cb) en fracturas. B) Pirrotina (Po) masiva con inclusiones de pirita (Py), galena (Gn) y oro (Au). Hacia los bordes se puede observar asociación con pirita-marcasita (Py-Mrc). C) Pirita (Py) diseminada en vetillas de sericita. D) Cuarzo (Qz) con evidencias de deformación y recrystalización. Fuente: autores.



Sector noreste

Las inclusiones fluidas de la mina Río Gold (El Hundidor) muestran mayores temperaturas de homogenización y salinidad, lo que indica que el fluido hidrotermal que las generó es diferente al de las muestras de los sectores centro y occidental. Las temperaturas de homogenización están entre 252,2 y 269,8 °C y presentan una salinidad entre 9,33 y 14,30 wt% NaCl eq. (calculadas a partir de las temperaturas de fusión de clatratos, entre 6 y 10,2 °C).

Sector Central

Con los análisis microtermométricos se identificaron cuatro familias de inclusiones fluidas comunes en los sectores centro y occidental. Todas las inclusiones son bifásicas, con formas irregulares las primarias, ovoides las secundarias y rectangulares las pseudosecundarias.

La primera familia presenta temperaturas moderadas (entre 215 y 225 °C) y salinidad relativamente baja (alrededor de 8 %Wt NaCl). La segunda familia tiene una temperatura similar pero una salinidad más baja (alrededor de 6 %Wt NaCl). La tercera familia tiene salinidad similar a la primera pero con temperatura más baja (entre 170 y 190 °C). Por último, se encuentra una familia con temperatura baja (entre 190 y 204 °C) y baja salinidad (entre 4 y 6 %Wt NaCl), característica de la mina La Cirila.

En las dos primeras familias se encuentran los fluidos de las minas La Primavera, Los Pujidos y La Cirila. En la segunda, posiblemente se haya presentado un fenómeno de dilución, mientras que en la tercera familia un fenómeno de enfriamiento. La cuarta familia solo pertenece a la mina La Cirila, y se explica con un fenómeno de dilución.

Figura 4.9. A y B. Histogramas de frecuencia de los resultados microtermométricos obtenidos en las minas Los Pujidos, La Primavera y El Hundidor. (P: Primarias, PS: Pseudosecundarias, S: Secundarias). Fuente: autores.

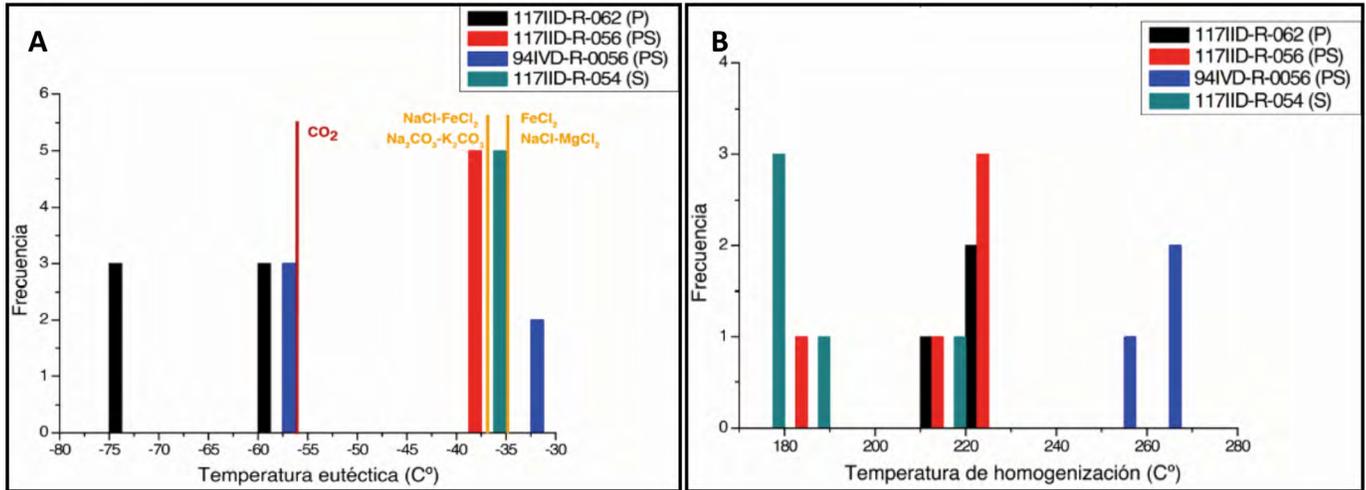
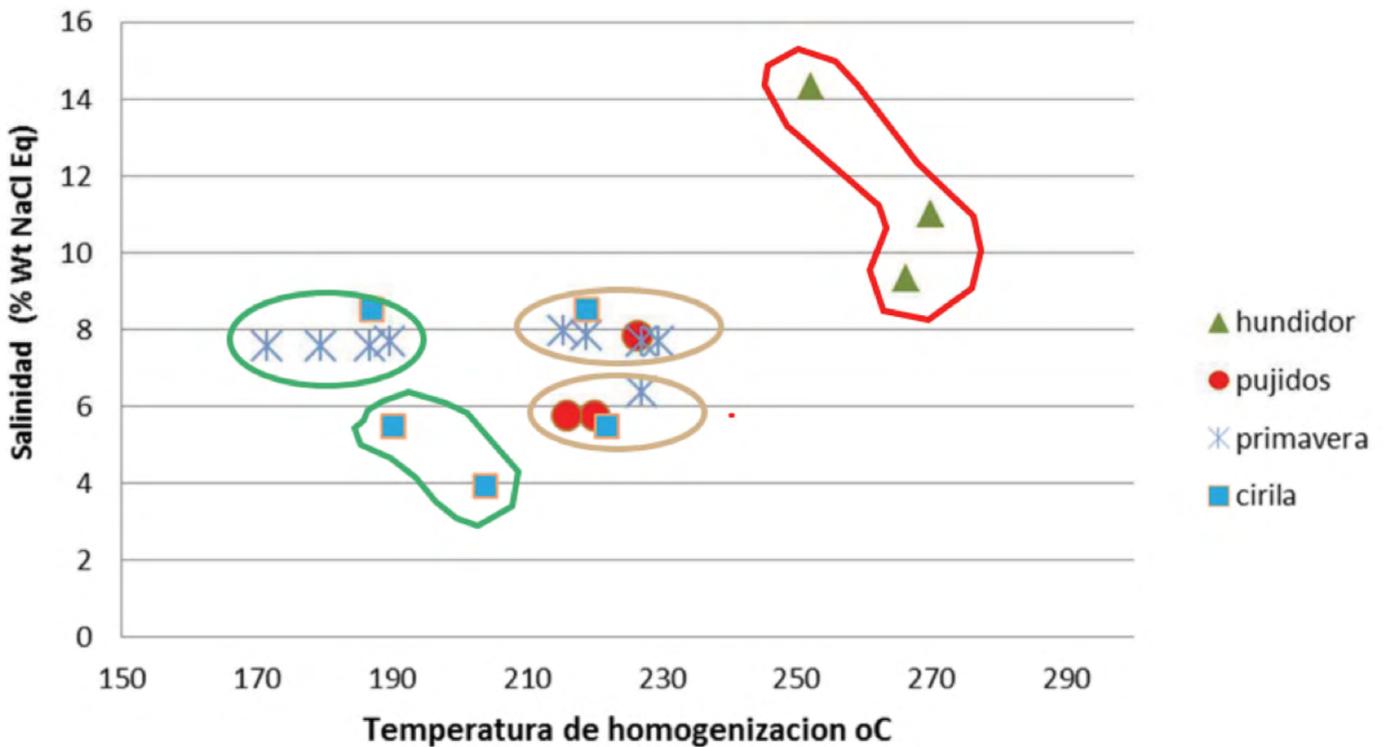


Figura 4.10. Gráfico de temperatura de homogenización vs salinidad para el sector La Primavera. P: Primarias, PS: Pseudosecundarias, S: Secundarias. Fuente: autores.



Las inclusiones primarias de la mina Los Pujidos muestran temperaturas de homogenización entre 216 y 226,5 °C y salinidad entre 5,78 y 7,83 %Wt NaCl. Son ricas en CO₂ y CH₄, e indican la existencia de fluidos acuocarbónicos con contenido de metano con temperatura eutéctica entre -73,8 y -71 °C, con fusión de CO₂ a una temperatura de -56,6 °C.

Por su parte, las inclusiones observadas en La Primavera presentan una temperatura de homogenización entre 171,7 y 229,7 °C y salinidad entre 5,78 y 7,83 %Wt NaCl eq.; corresponden a inclusiones pseudosecundarias acuosas, las cuales no presentan volátiles asociados. En estas se obtuvieron temperaturas eutécticas entre -38,9 y -35,4 °C, que indican un fluido con cationes de Na, Fe, Mg y K. Por tanto, las inclusiones primarias, secundarias y pseudosecundarias del sector central presentan una salinidad baja a moderada, producto de un fluido diluido y temperaturas de homogenización más bajas.

Sector occidental

Las muestras de la mina La Cirila presentan inclusiones fluidas de tipo secundario, se caracterizan por ser bifásicas y tener formas irregulares alargadas. Los datos microtermométricos del sector indican temperaturas de homogenización a fase líquida entre 187,2 y 221,9 °C y salinidad entre 3,91 y 8,53 %Wt NaCl eq. (calculada a partir de una temperatura de fusión final de hielo entre -5,4 y -2,3 °C). Por su parte, las inclusiones presentan temperatura eutéctica entre -43,1 y -39,9 °C correspondiente a fluido es rico en cationes de Na, Fe y K. En algunas de las inclusiones pseudosecundarias se identificó la presencia de dióxido de carbono.

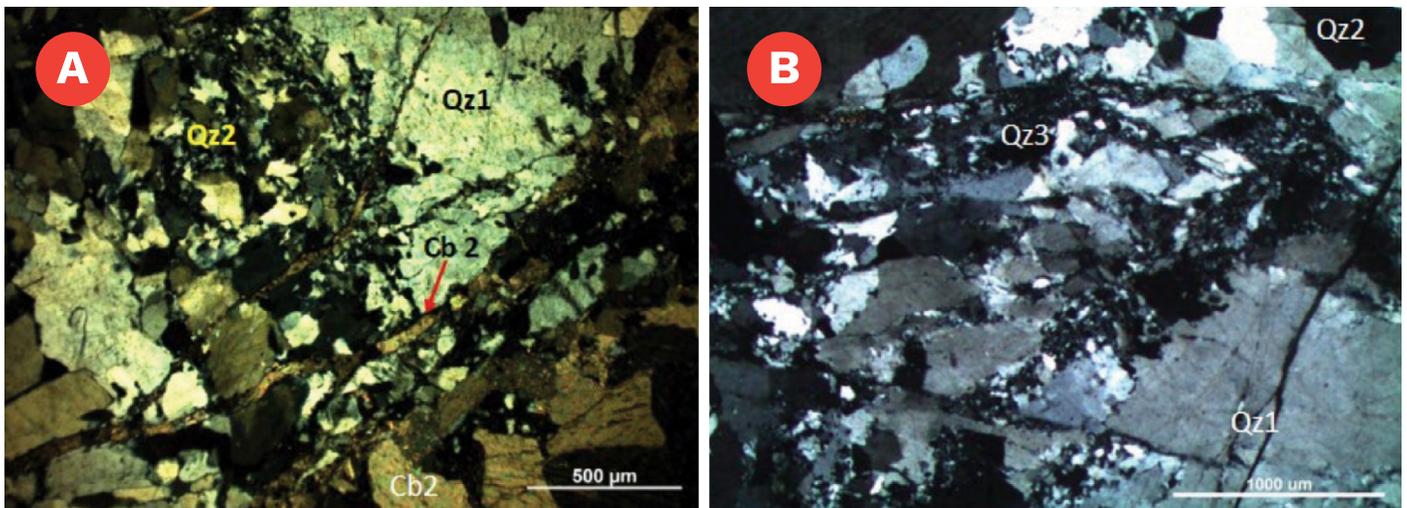
Los análisis de espectroscopía Raman confirmaron la existencia de CO₂ y CH₄ en las inclusiones primarias de la muestra de la mina Los Pujidos, así como la presencia de CO₂ en las inclusiones pseudosecundarias de la mina El Hundidor y la ausencia de volátiles asociados en el sector occidental. Teniendo en cuenta la salinidad y temperaturas de homogenización de los fluidos mineralizantes, se sugiere que la fuente de las mineralizaciones estudiadas podría ser de origen metamórfico, compatible con lo que ha sido descrito para depósitos de tipo oro orogénico.

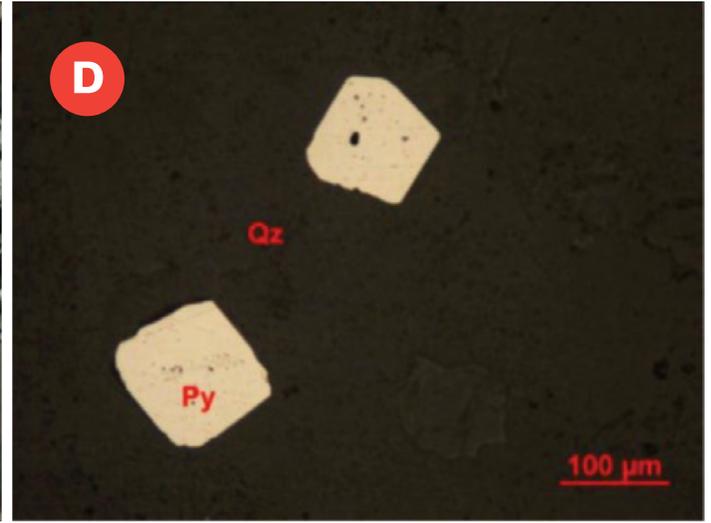
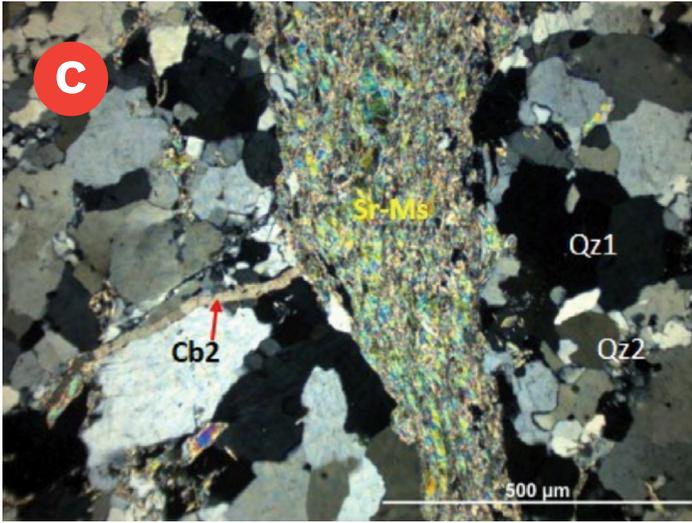
4.2.4.3. SECUENCIA PARAGENÉTICA

El análisis de 20 secciones delgadas de frentes mineralizados muestra principalmente una mineralización de pirita, esfalerita, galena, calcopirita, pirrotina y oro, con presencia de arsenopirita en el sector de La Cirila. Figura 4.9.

Un primer evento mineralizante favorece la cristalización de sulfuros. El mineral de mena más abundante es la pirita. Se presenta como cristales masivos, diseminados de formas subhedrales a euhedrales. En algunas zonas ha sido fuertemente fracturado por eventos de cizallamiento y atravesados por vetillas de carbonatos. En general, se encuentra acompañado de cuarzo 1 masivo, con texturas en peine, y cuarzo 2 recrystalizado con texturas en mosaico.

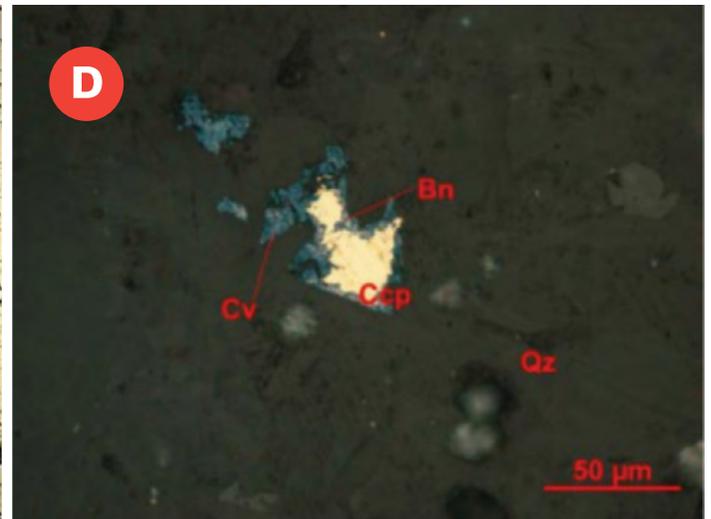
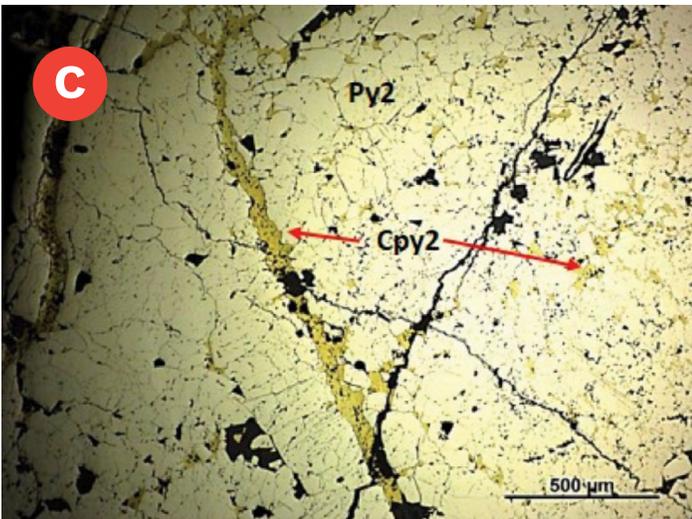
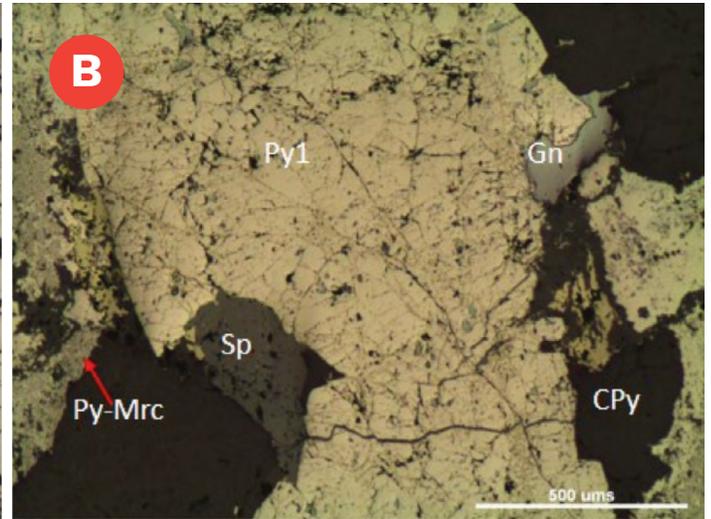
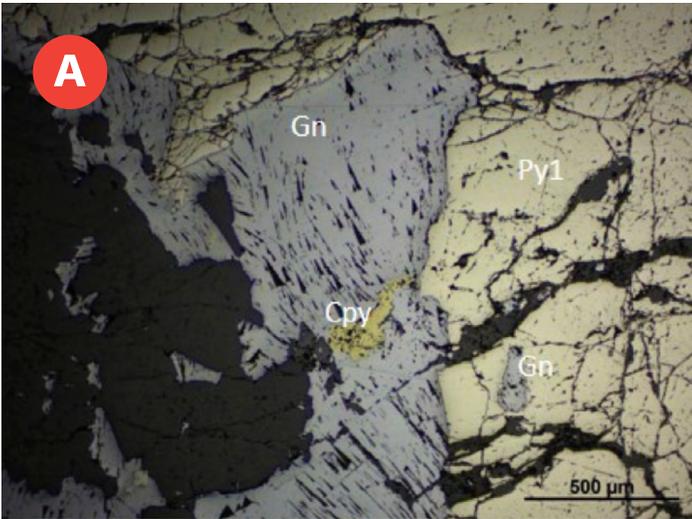
Fotografía 4.9. Mineralización de textura y relaciones de cuarzo, pirita y carbonato en la mena. A) Cristales de cuarzo 1 (Qz1) y zona de recrystalización de cuarzo 2 (Qz2) atravesada por vetillas de carbonato (Cb). B) Vena de cuarzo 1 (Qz1) recrystalizada a cuarzo 2 (Qz2) y cortada por vetillas de cuarzo 3. C) Textura general de la vena. Cristales de cuarzo 1 (Qz1) con extinción ondulante y cristales más pequeños de cuarzo 2 (Qz2) en los bordes del cuarzo 1 (izquierda). En la esquina inferior izquierda, vetilla compuesta de carbonato 2 (Cb2) y en la parte central vetilla de sericita-muscovita (Ser-Ms). D) Cristales subhedrales de pirita (Py1) de tamaño medio, asociada con cuarzo (Qz1). Fuente: autores.





La pirita exhibe inclusiones de calcopirita, galena, esfalerita, pirrotina y oro (figura 4.10. A y B). La pirrotina está prácticamente ausente hacia la superficie, pero incrementa considerablemente su porcentaje en los

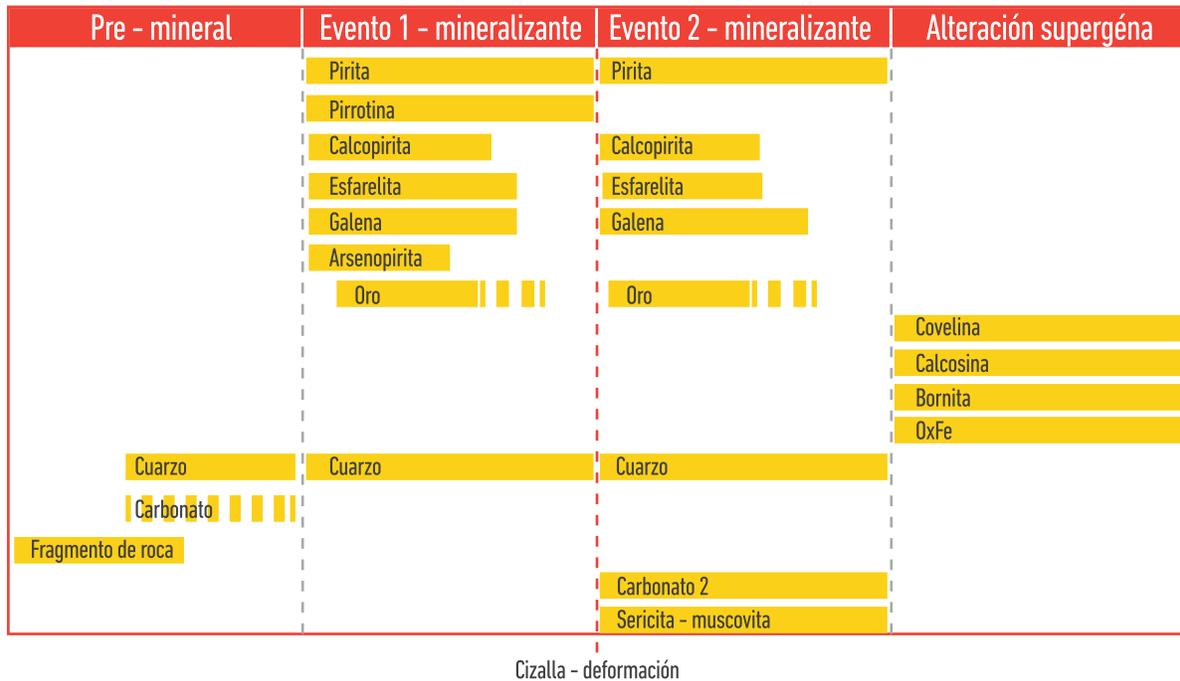
Fotografía 4.10. Cristales de pirita 1 (Py1) asociados con galena (Gn). Dentro de la pirita 1 se observa inclusión de galena y dentro de la galena inclusión de calcopirita 1 (Ccp1). A) Pirita 1 (Py1) relacionada con pirrotina, la cual se encuentra alterada a pirita 2-marcasita (Py2-Mrc). B) En los bordes de la pirita 1 se encuentran cristales de esfalerita (Sp), galena (Gn) y calcopirita (Ccp). C) Cristales de pirita 2 (Py2) con calcopirita 2 (Ccp2) en venillas y como inclusiones. D) Calcopirita (Ccp2) alterándose en los bordes a covelina (Cv) y bornita (Bn). 50 X, PPL. Fuente: autores.



niveles más profundos de las labores mineras, observándose principalmente asociada o incluida en pirita 1 y alterando a pirita marcasita.

Un segundo evento mineralizante deposita pirita diseminada en pequeñas fracturas y venillas rellenas de cuarzo 2 criptocristalino con carbonatos, sericita y muscovita. Este evento, a su vez, deposita calcopirita, esfalerita, galena y pirrotina en menores proporciones e incluidos principalmente en pirita 2, además como relleno de fracturas de pirita del primer pulso (fotografía 4.10. C). La mineralización de oro se asocia principalmente al segundo evento, presentándose como inclusiones en galena 2 y esfalerita 2. En los sectores centro y noreste es común observar cristales de covelina, calcosina, bornita producto de alteración de la calcopirita, así como óxidos de hierro asociados a alteración supergénica (fotografía 4.10. D).

Figura 4.11. Secuencia paragenética de la mineralización aurífera en Remedios. Fuente: autores.



4.2.5. OCURRENCIA DE ORO EN VETA.

El análisis para determinar la ocurrencia de oro en veta intacta se realiza teniendo en cuenta la distribución geográfica de las muestras recolectadas en los cuatro sectores anteriormente definidos. Para toda la zona se prepararon 28 secciones delgadas pulidas para análisis petrográfico. En el sector central, donde se concentra la mayor actividad minera, se prepararon 16 secciones delgadas pulidas, mientras que en el sector nororiental 4 muestras, en el sector occidental 2 y en el sector sur 6.

En todas las secciones analizadas de la zona aurífera de Remedios se identificaron un total de 1823 partículas de oro, de los cuales 1565 pertenecen al sector central, 141 al sector sur y 117 al sector occidental; para el sector noreste no se observaron granos de oro en las muestras analizadas. Se consideró el análisis de 413 partículas reportadas, distribuidas en tres de los cuatro sectores así: sector central (minas Vega Gold, Italia, La Primavera, Los Pujidos, 30 Granos), con un total de 292 partículas de oro; sector occidental (mina La Cirila), con 81 partículas de oro; y sector sur (mina Quintana), con 40 partículas de oro. Se establece que las partículas de oro analizadas en su mayoría se encuentran por debajo de 50 micrometros (μm) y solo algunas son de tamaño entre 100 y 160 μm de diámetro equivalente (figura 4.12.).

La distribución en peso muestras que el oro se encuentra principalmente incluido en sulfuros hasta en un 50,15 %, asociado a sulfuros en el 43,75 % y el oro incluido en cuarzo y carbonatos, considerado libre, corresponde al 6,11 % restante.

Se observan 3 poblaciones según su asociación a sulfuros como pirita, pirrotina, galena, arsenopirita y cuarzo. La principal población está relacionada con la asociación de oro con pirita, galena y esfalerita, importante por gran número de partículas y pertenece al sector central de Remedios; otra población está asociada a pirrotina en el sector sur; otra se asocia a arsenopirita, cuarzo y +/- telururos en el sector occidental (figuras 4.13 y fotografía 4.11.).

Figura 4.12. Tamaño de partículas de oro (D2Eq) identificadas en el municipio de Remedios. Fuente: autores.

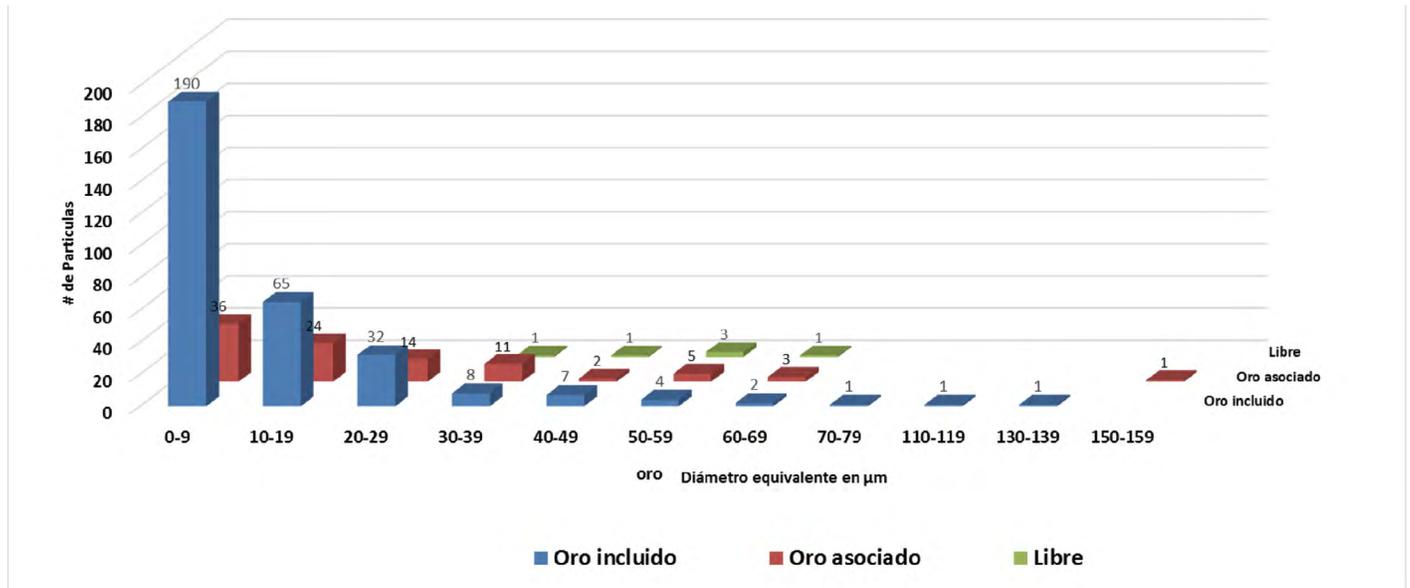
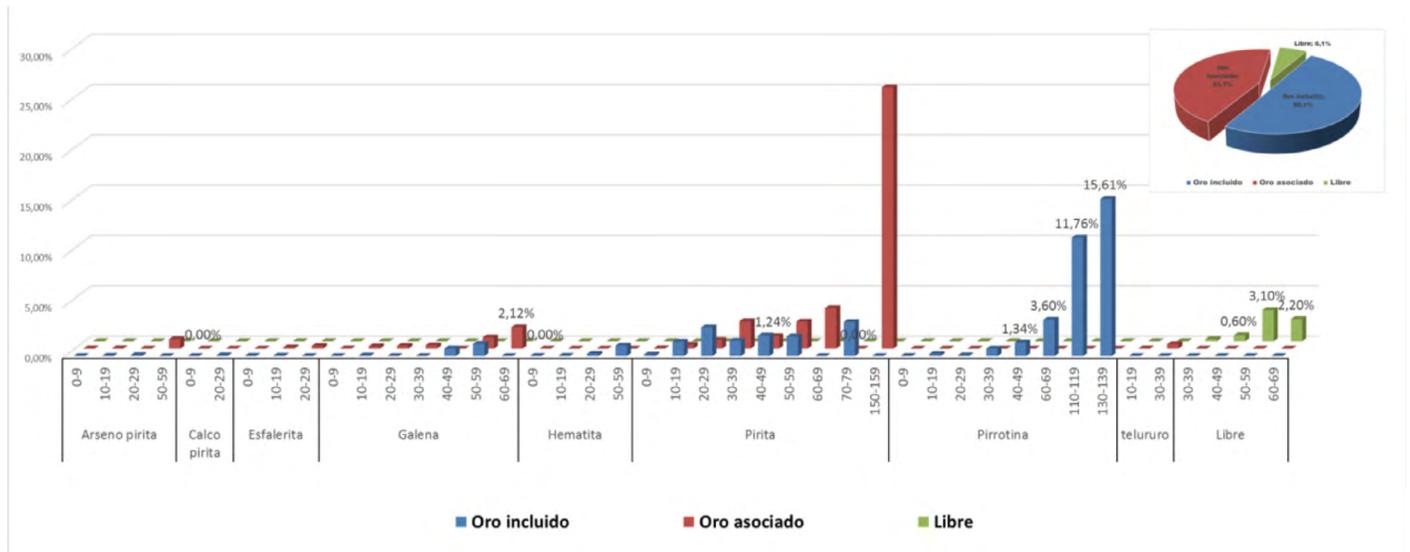


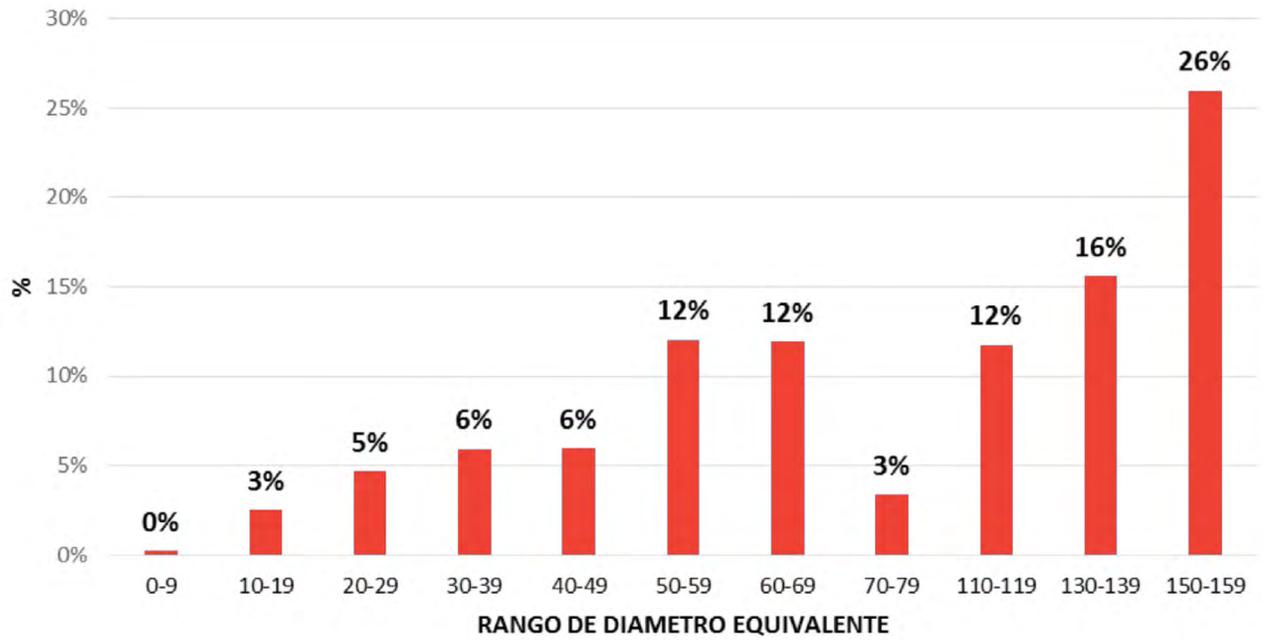
Figura 4.13. Asociación de partículas de oro identificadas en el Municipio de Remedios. Fuente: autores.



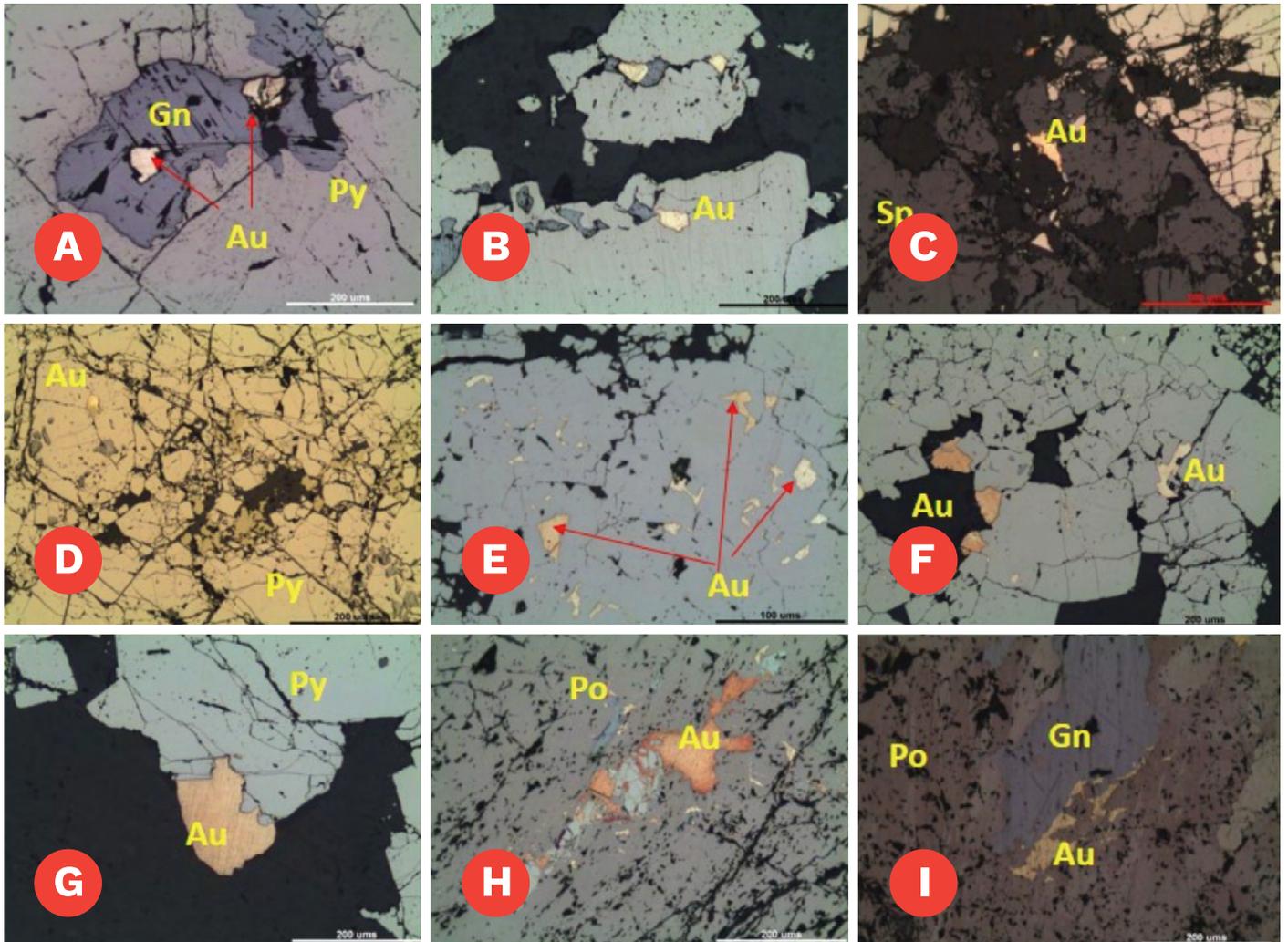
La distribución general de partículas de oro por rango de tamaño (D2Eq) indica 3 poblaciones diferenciables, la más importante por su tamaño es aquella con partículas mayores a 110 μm , que representa cerca del 54 % de la distribución. Una segunda población entre 50 y 80 μm , representa el 27 %; y una tercera población por debajo de 50 μm , representa el 20 % restante. Para fines de beneficio se considera que las 2 primeras de mayor tamaño pueden ser beneficiadas por concentración gravimétrica, que representan cerca del 80 % (figura 4.14).

Para establecer las características propias de las partículas de oro se analiza cada sector, teniendo en cuenta número de granos, porcentaje en peso asociación mineralógica y distribución en peso con fines de beneficio.

Figura 4.14. Tamaño de partículas de oro identificadas en el municipio de Remedios. Fuente: autores.



Fotografía 4.11. Granos de oro observados en A) Mina La Italia. B) Mina La Primavera. C) Mina 30 Granos. D) Mina Vega Gold. E y F) Mina Los Pujidos (sector central). G), Mina La Cirila (sector occidental). H e I) Mina Quintana. Fuente: autores.



4.2.5.1. CALIDAD DEL ORO (EPMA)

En cuanto a las características químicas, algunos de los granos de oro se analizaron por microsonda electrónica, en los que 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 que en ausencia de cobre (0.1%). la proporción de plata es muy alta en las menas; Electrum predomina y la plata puede alcanzar valores hasta del 70% (figura 4.15).

Figura 4.15. Diagrama triangular Au-Ag-Cu, para las partículas de oro analizadas con microsonda electrónica. Fuente: autores.

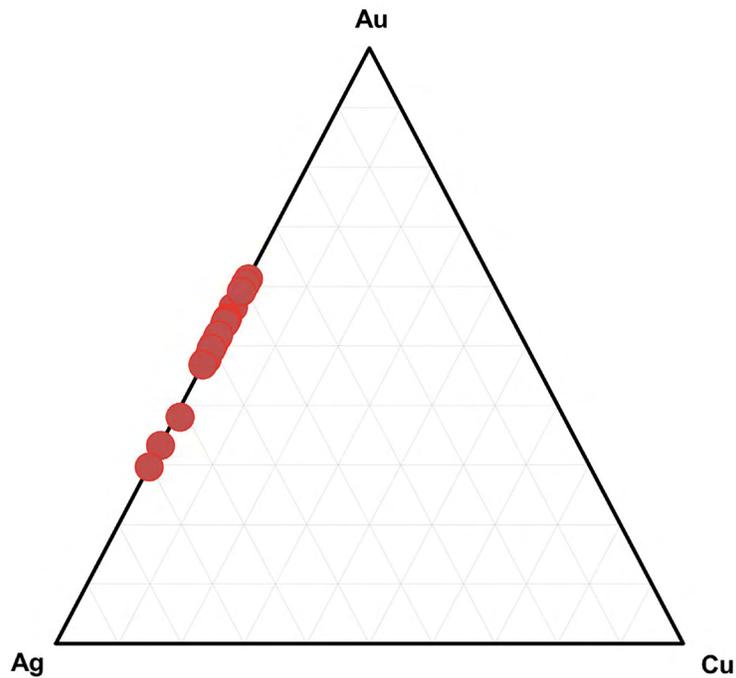
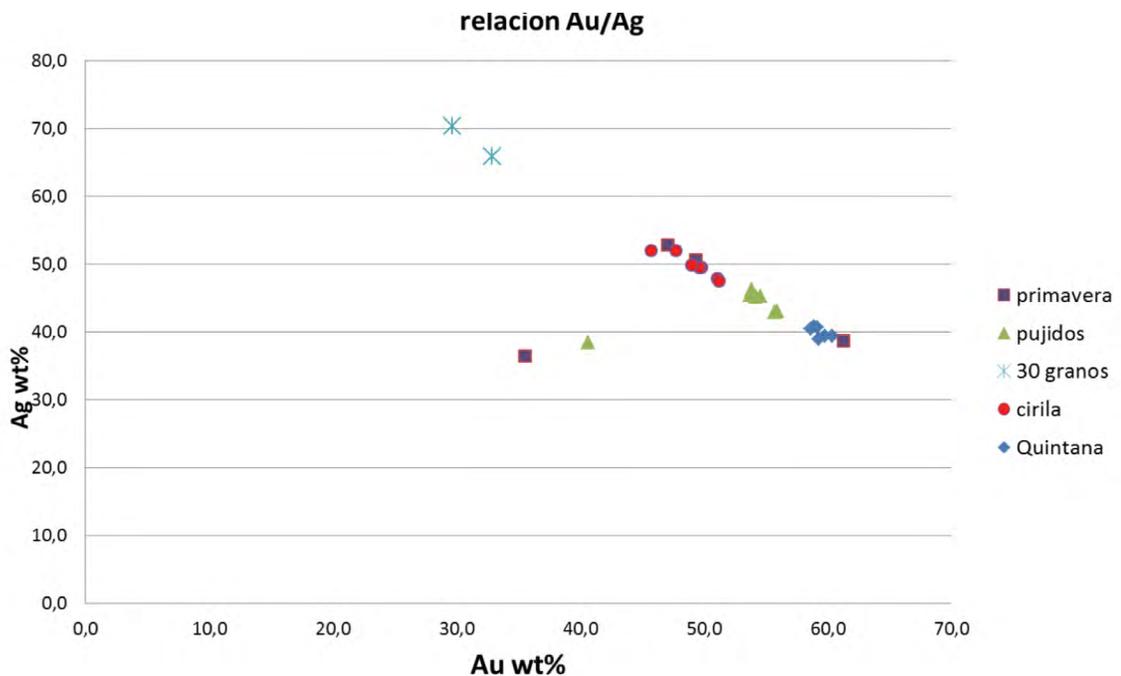


Figura 4.16. Relación Au/Ag de partículas de oro analizadas con microsonda electrónica. Fuente: autores.



Análisis por EPMA de algunas partículas de oro seleccionadas aleatoriamente muestras que la variación de los contenidos de Au oscila entre 61 Wt% y 32 Wt%, considerando que en su orden la concentración de Au de mayor a menor está dada por Mina Quintana, mina Pujidos, Cirila, Primavera y 30 granos. 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 4.16.).

Calidad del oro sector Central

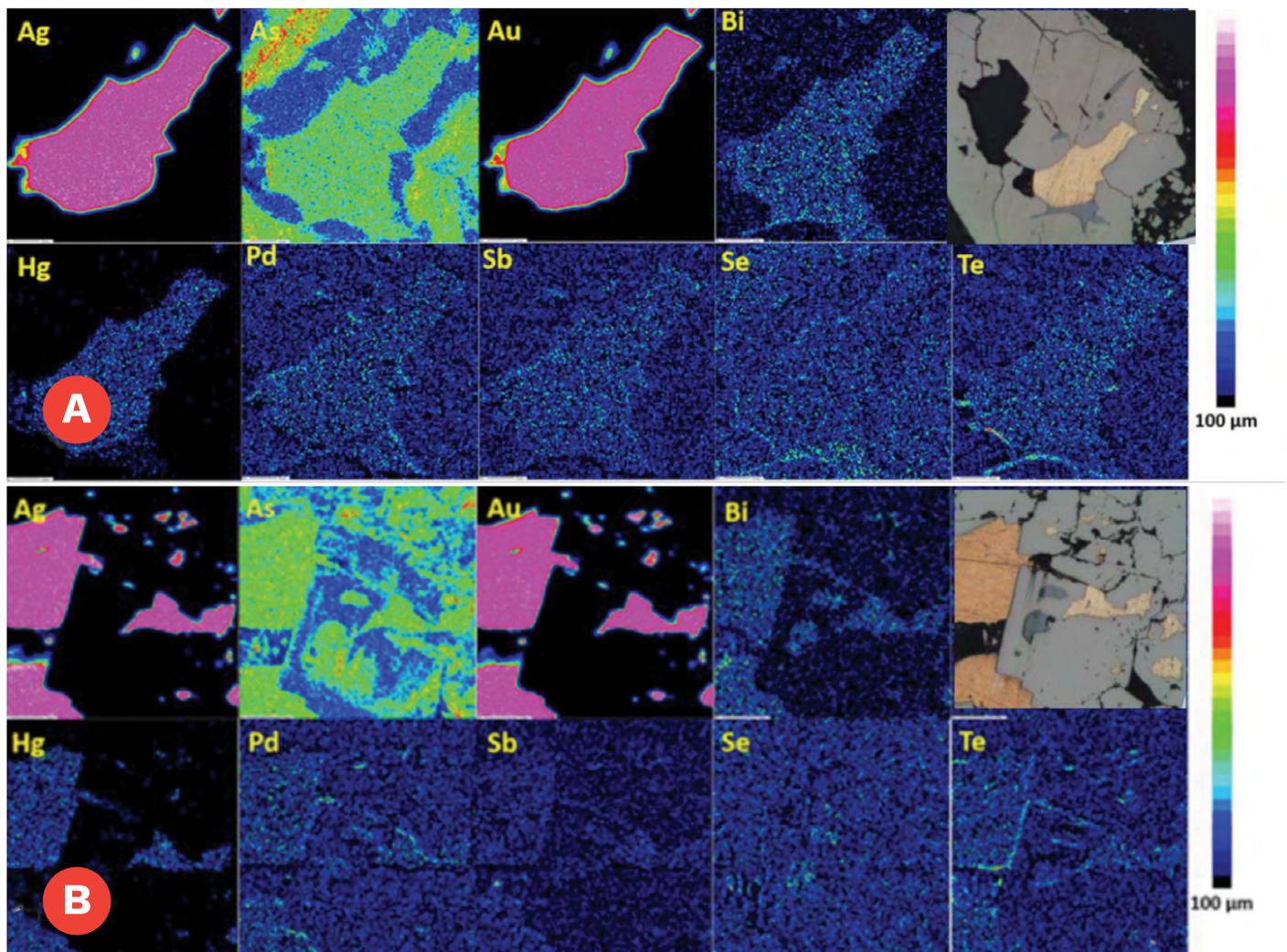
En las minas del sector central del área de Remedios se analizaron partículas de oro para determinar su composición microelemental, se encontró que el contenido de Au es relativamente bajo con valores que no superan el 70 wt%

En la mina los Pujidos se identificaron la mayor cantidad de partículas de oro con valores elementales entre 53,74 y 55,9 wt%, por su parte, la plata tiene valores entre 42,85 y 46,2 wt%. Algunos de los granos presentan bajos contenidos de arsénico (0,063 wt%) y bismuto (~0,01 wt%).

El oro proveniente de la mina 30 granos presenta el más bajo contenido de Au, entre 29,69 y 32,88 wt%, mientras la plata presenta un mayor valor, entre 65,85 y 70,29 wt%. Asimismo, hay presencia en muy baja proporción de mercurio (~0,1 wt%) y antimonio (~0,02 wt%).

Adicionalmente, en la mina Vega Gold se determinó contenidos de oro con valores elementales entre 47,1 y 61,3 wt%, mientras que plata presenta entre 38,6 y 52,8 wt%. El oro contiene baja concentraciones de bismuto (0,009-0,01 wt%), cobre (0,008-0,037 wt%), selenio (0,001 wt%) y telurio (0,012-0,021 wt%).

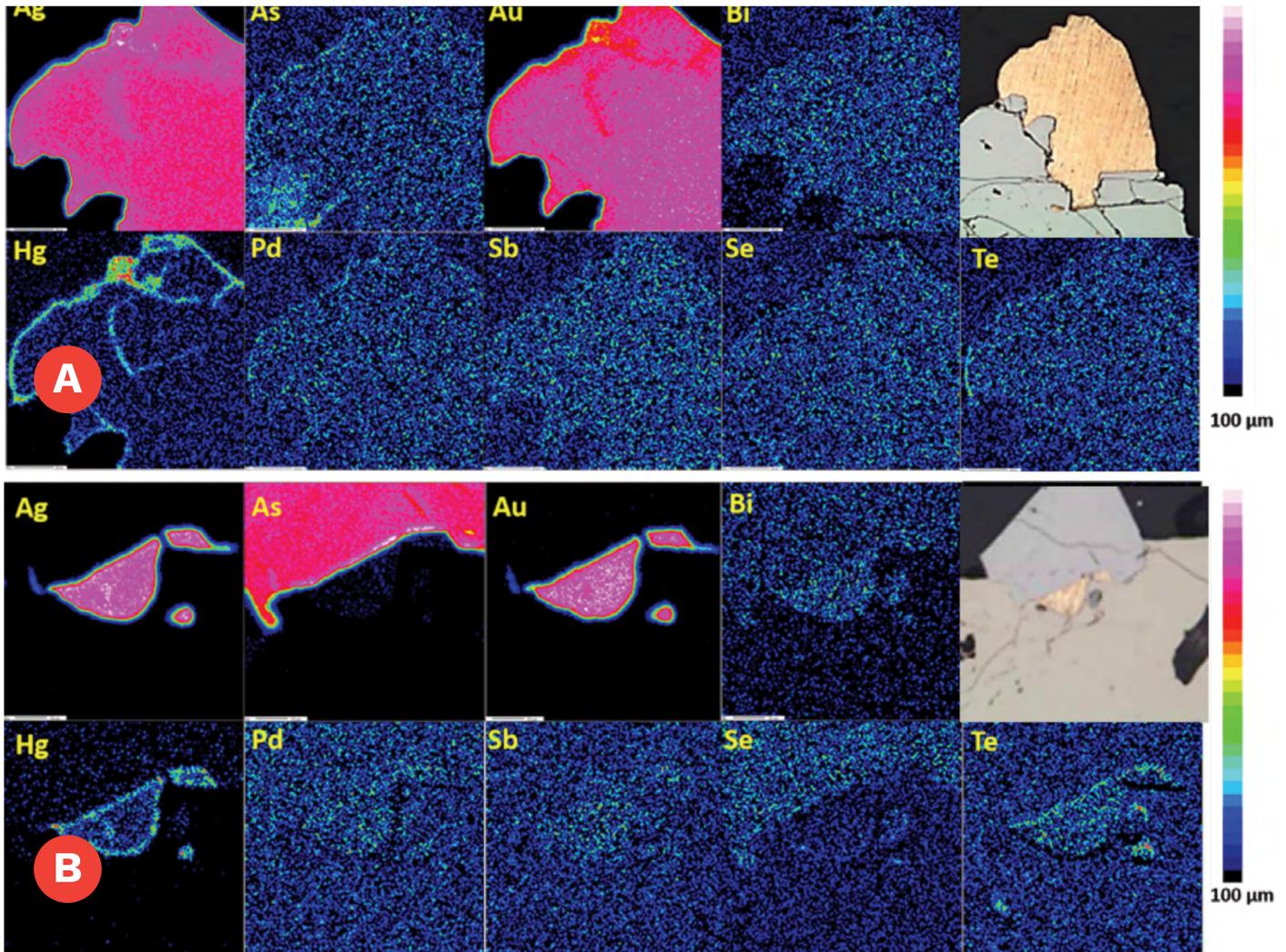
Figura 4.17. A y B. Mapas composicionales para oro electrum. Mina Los Pujidos (N: 1 271 509, E: 1 263 906, 652 msnm). Fuente: autores.



Calidad del oro sector occidental.

Dos partículas de oro analizadas de la mina La Cirila presentan concentraciones de oro y plata, entre 45,76 y 51,23 wt% y 47,46 y 51,98 wt% respectivamente, es notable el contenido de arsénico y telurio en el oro, lo mismo que segregación de mercurio en los bordes de grano del oro (figura 4.18.).

Figura 4.18. A y B. Mapas composicionales para oro electrum pertenecientes a la mina La Cirila (N: 1 270 780, E: 1 253 396 msnm). Fuente: autores.



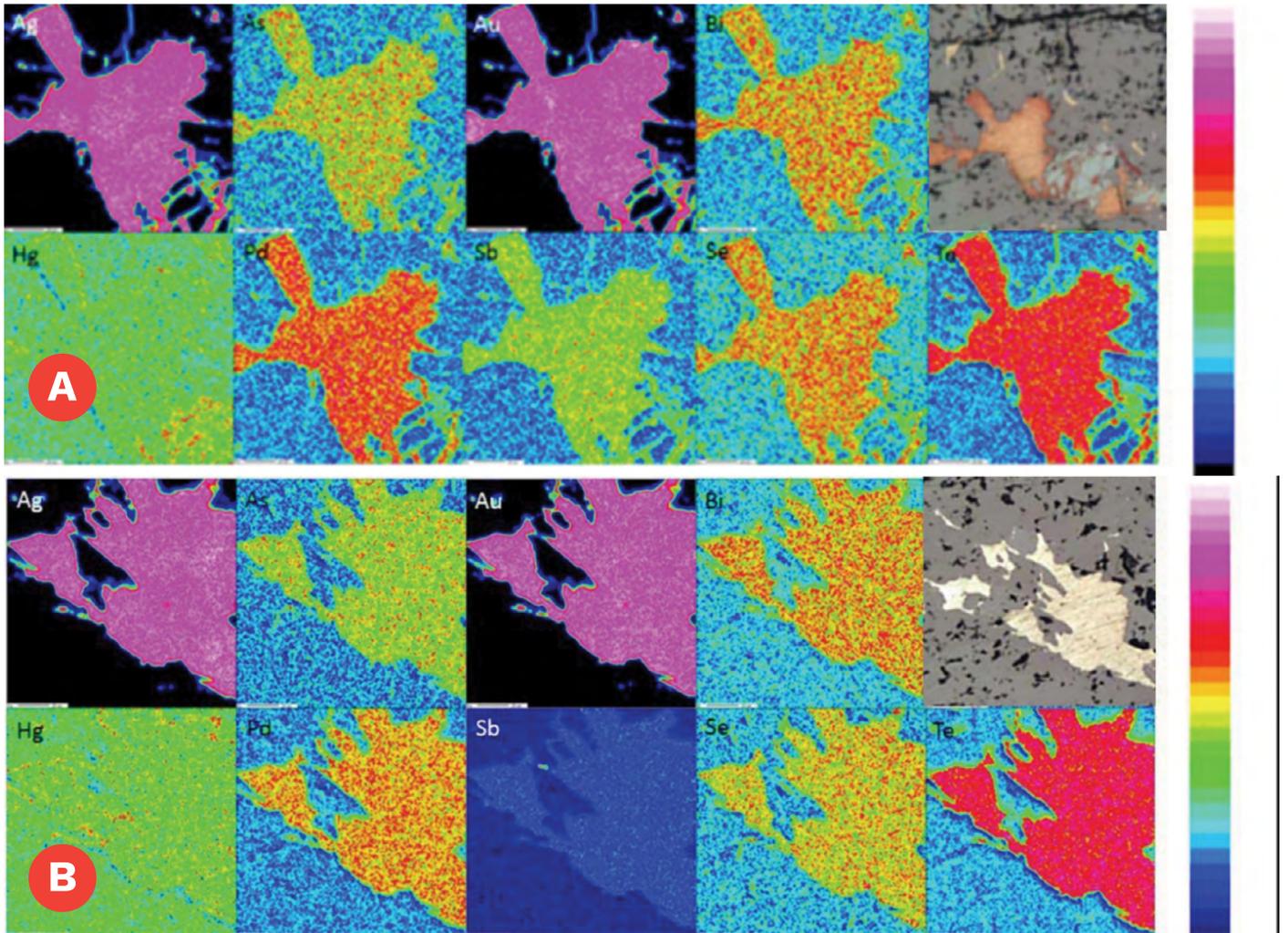
Calidad del oro sector sur.

Para la mina Quintana la relación es de oro entre 58,6 y 60,4 wt% y de plata entre 38,9 y 40,7 wt%. De igual forma, algunos granos tienen valores muy bajo de arsénico (0,06 wt%), bismuto (~0,01 wt%) y telurio (~0,01 wt%), (figura 4.19.).

4.2.6. 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). Eventos mineralizantes consecutivos fueron observados, algunos de ellos con precipitación de sulfuros y oro en vetas de cuarzo ya deformadas, otros relacionados con di-

Figura 4.19. A y B. Mapas composicionales para oro electrum pertenecientes a la mina Quintana (N: 1 270 780, E: 1 253 396 msnm). Fuente: autores.



ques máficos emplazados en zonas de cizalla, con desarrollo de alteración sericítica adyacente a las zonas proximales mineralizadas.

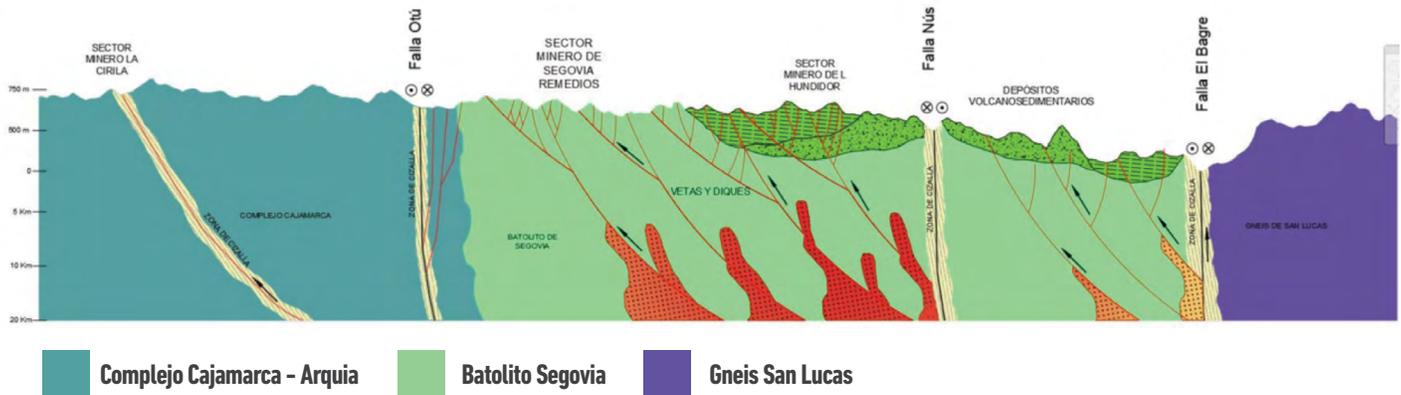
Hacia la zona central las vetas se encuentran encajadas dentro del batolito de Segovia, mientras que en las zonas periféricas la mineralización se presenta fuera de la franja limitada por las fallas de Otú y Nus (figura 4.20.).

Teniendo en cuenta la información bibliográfica disponible, las relaciones de campo observadas y los resultados de análisis petrográficos, a la par que se considera la fuente de los fluidos mineralizantes de las mineralizaciones estudiadas, podría afirmarse que son de origen metamórfico, compatibles con depósitos de tipo oro orogénico.

4.2.7. UNIDADES GEOMETALÚRGICAS (UGMS).

Considerando que el conjunto de propiedades mineralógicas, texturales, físicas y químicas de un yacimiento que repercuten sobre el tratamiento metalúrgico, cada tendencia o grupo de minas descrito con anterioridad puede representar una única unidad geometalúrgica (UGM). Una vez caracterizadas las menas, se concluye que una única UGM de mineralogía simple de pirita hasta de un 5 %, con rocas encajantes de origen ígneo con alteración hidrotermal incipiente, de fácil liberación y con tamaño de grano esencialmente menor a 60 µm, pero poco representativo en peso, reúne las características propias del área minera

Figura 4.20. Modelo metalogénico generalizado para la zona de Remedios. Fuente: autores.



4.2.8. LIBERACIÓN DE SULFUROS

Los análisis petrográficos son útiles en la caracterización de minerales que sometidos a procesos de beneficio y son analizados en sus diferentes etapas, considerando composición mineralógica, grado de liberación y ocurrencia de oro.

Liberación de minerales metálicos

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 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 a los mineros y sus procesos metalúrgicos no fueron evaluados.

El material de cabeza se analiza considerando 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 La Primavera, La Cirila, Los Pujidos y Quintana.

4.2.8.1. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA LA PRIMAVERA

Los análisis mineralógicos realizados a la muestra de cabeza de proceso colectada, indican que la distribución mineralógica en porcentaje en peso de la mena está representada por ganga de cuarzo (66 %) y pirita (29 %), fundamentalmente con pequeñas cantidades de galena y esfalerita, lo mismo que pequeñas cantidades de fragmentos líticos derivados de la roca encajante (figura 4.21.).

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 % y por debajo de 425 micrones. Menos del 5 % prevalece asociado.

La distribución total de sulfuros muestra partículas paulatinamente libres desde el 50 % en malla de 1000 μm , hasta 150 μm , por debajo de los cuales una insignificante fracción permanece asociada e incluida en ganga (figura 4.22.).

La distribución por sulfuros ponderados al 100 % por cada fracción indica que, en las fracciones menores a 150 μm , se encuentran las primeras partículas asociadas y por debajo de 45 μm aparecen partículas incluidas en ganga (figura 4.23.).

Figura 4.21. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina La Primavera. Fuente: autores.

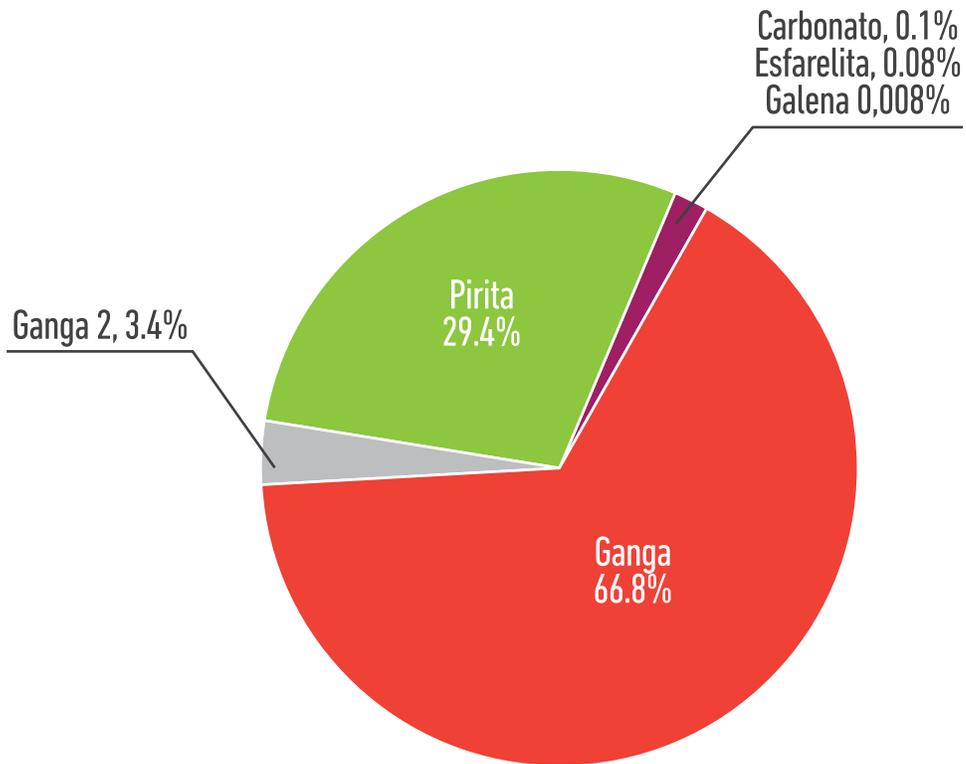


Figura 4.22. Distribución total de minerales metálicos en la mina La Primavera. Fuente: autores.

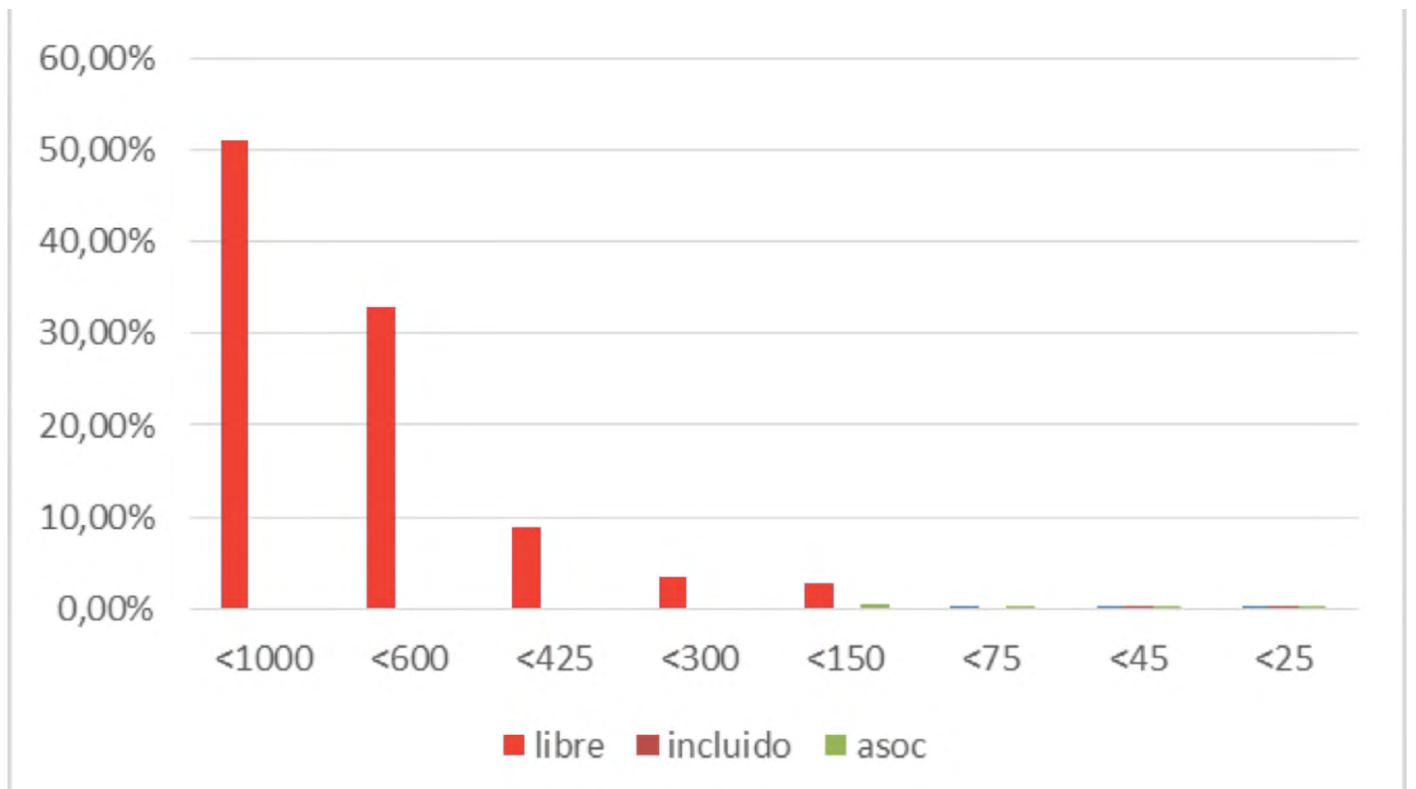


Figura 4.23. Asociación de minerales metálicos por cada fracción de tamaño en la mina La Primavera. Fuente: autores.

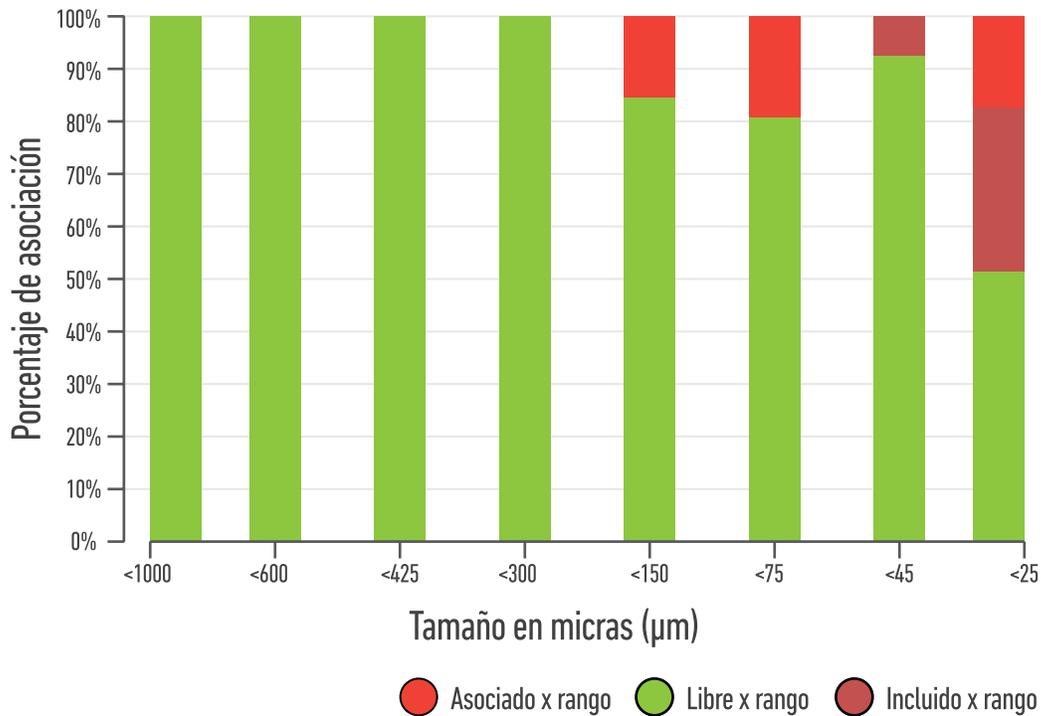
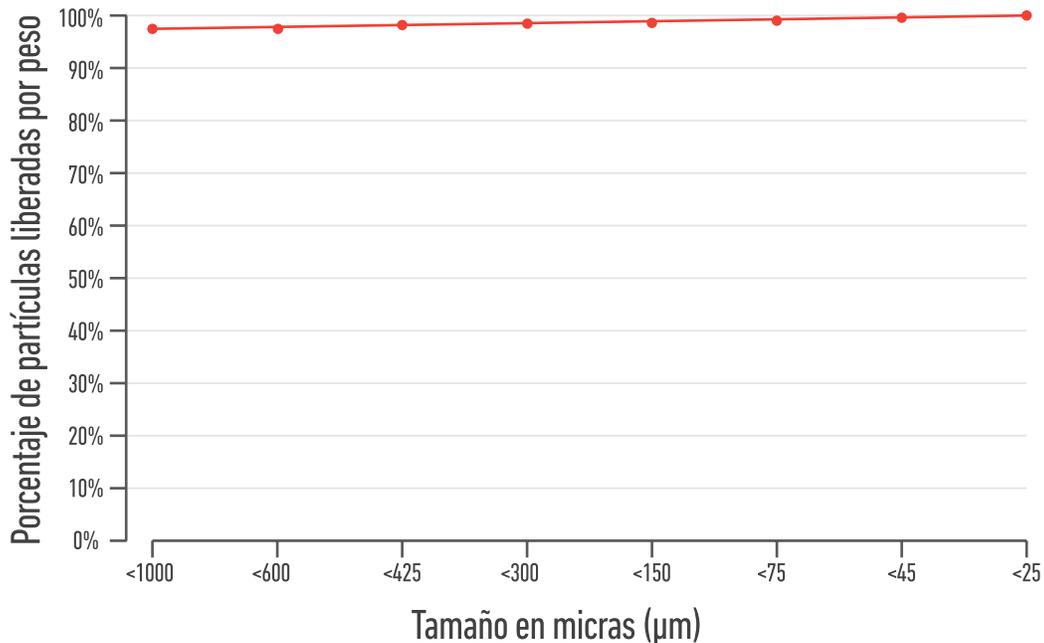


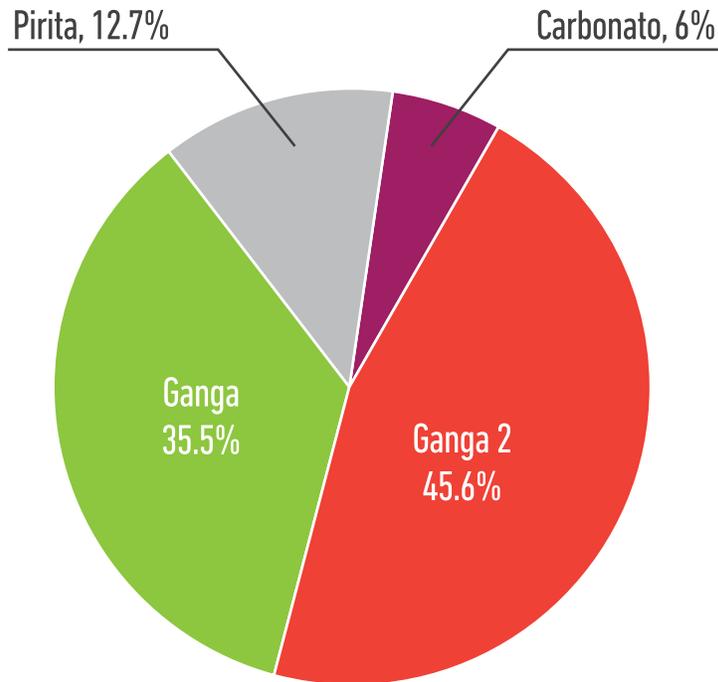
Figura 4.24. Grado de liberación material de cabeza en la mina La Primavera. Fuente: autores.



4.2.8.2. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA LOS PUJIDOS.

Los análisis mineralógicos realizados a la muestra de cabeza de proceso colectada indican que la distribución mineralógica en porcentaje en peso de la mena está representada por ganga de cuarzo (35 %), fragmentos líticos (45 %) y pirita (12,7 %), con pequeñas cantidades de carbonato de calcio. Cerca del 80 % de la mena corresponde a ganga de cuarzo y de fragmentos líticos derivados de la roca encajante. La presencia de carbonatos en la mena contribuye a facilitar las etapas de cianuración y la neutralización de las pilas de relave (figura 4.25.).

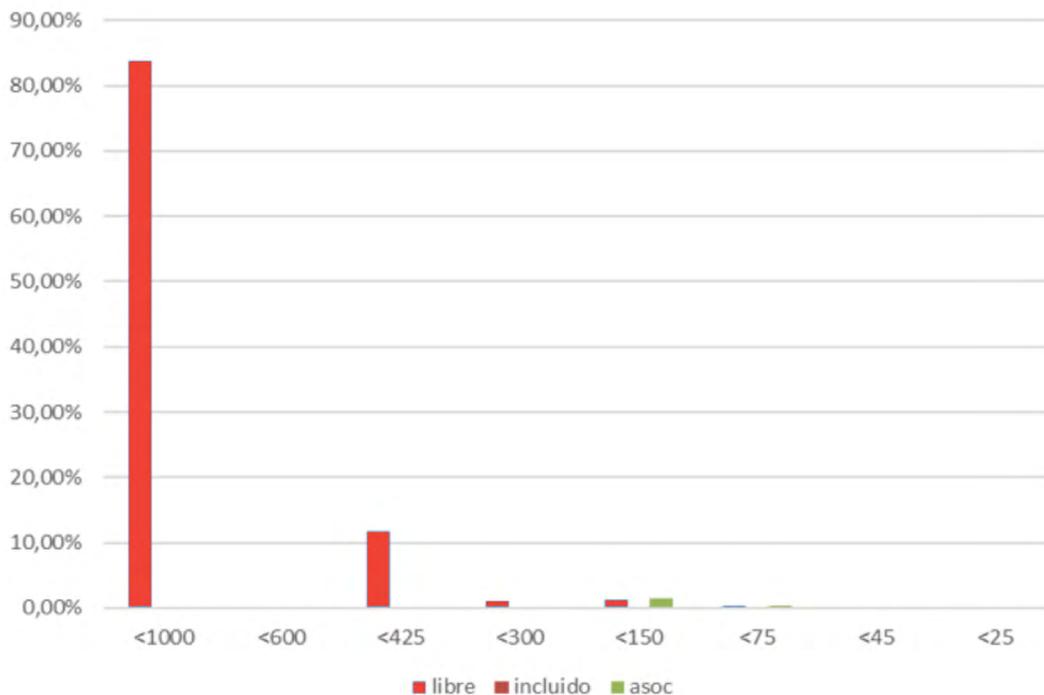
Figura 4.25. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.



La liberación de partículas ocurre en las primeras etapas de molienda. Considerando el sistema binario de ganga-sulfuros, se observa que en su mayoría los sulfuros se hallan liberados en la molienda primaria y, por encima de 300 micrones, prevalecen en varios porcentajes de asociación en proporciones menores al 3 %. Una pequeña porción está representada en la fracción de menor tamaño; ello puede deberse a la presencia de sulfuros microcristalinos diseminados en fragmentos líticos de la roca hospedante.

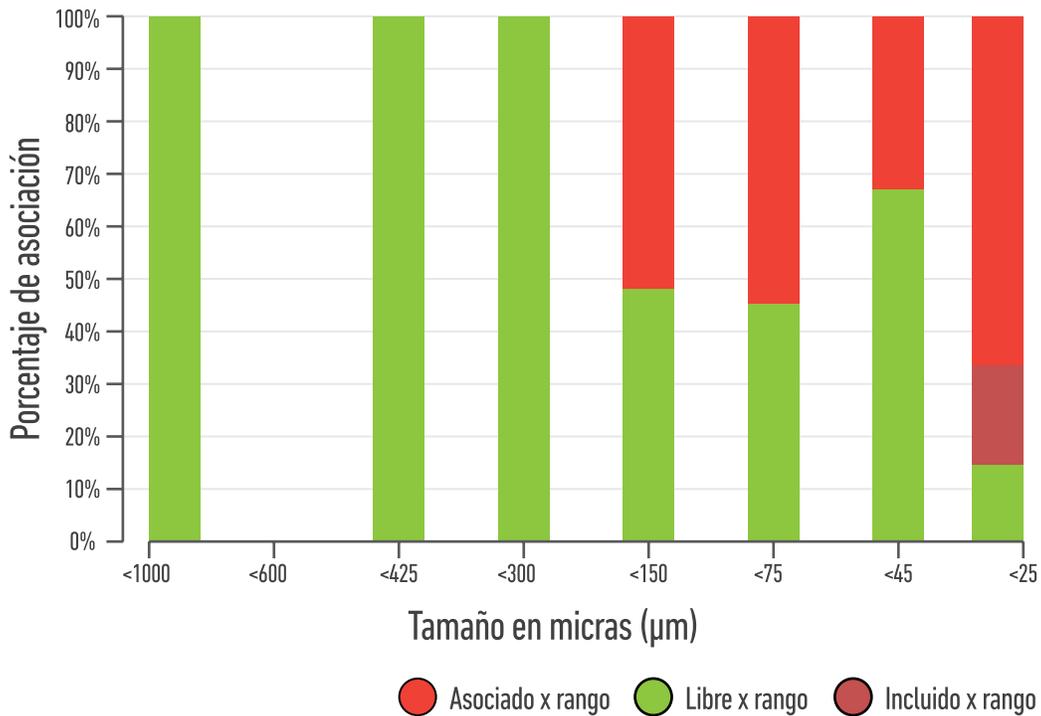
La distribución de sulfuros totales muestra alta proporción de partículas libres por encima de 1000 µm e incremento en la fracción de 425 µm (figura 4.26.).

Figura 4.26. Distribución total de minerales metálicos en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.



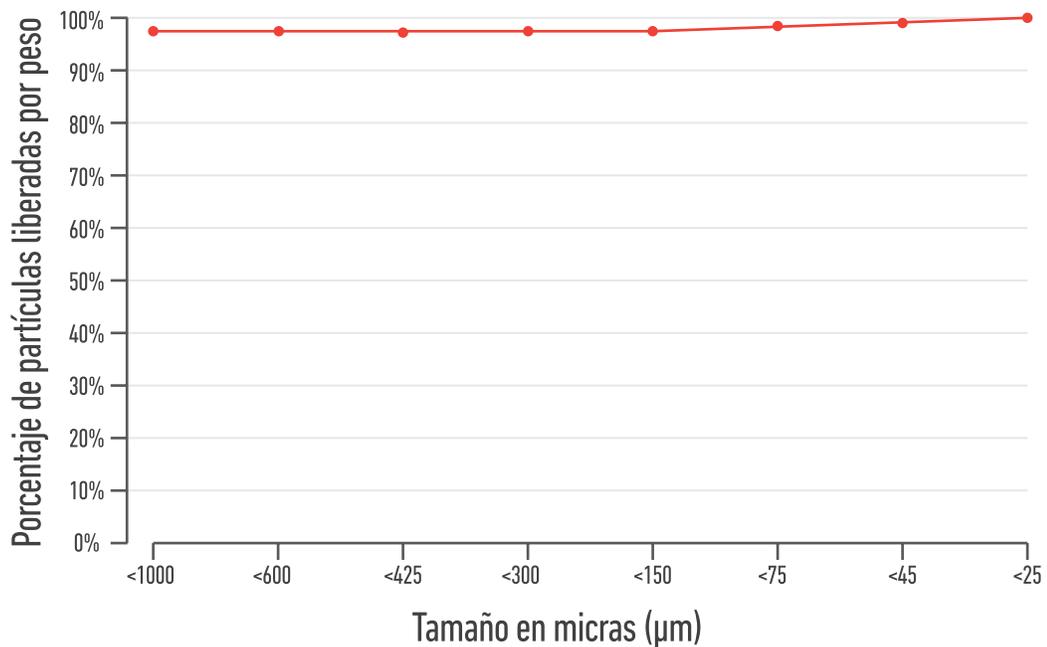
La distribución por sulfuros ponderados al 100 % por cada fracción indica que en las fracciones menores a 150 μm se encuentran las primeras partículas asociadas y que por debajo de 25 μm aparecen partículas incluidas en ganga (figura 4.27.).

Figura 4.27. Asociación de minerales metálicos por fracción de tamaño en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.



Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso esta triturado a 1,4 mm, la distribución de tamaño general de sulfuros corresponde a un alto grado de liberación de las partículas por debajo de 1000 micrones, muy similar a la distribución de la mina La Primavera (figura 4.28.).

Figura 4.28. Grado de liberación de material de cabeza en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.



4.2.8.3. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA LA CIRILA

Los análisis mineralógicos de la muestra de cabeza de proceso de la mina La Cirila muestran que la distribución mineralógica en porcentaje en peso de la mena está dominada por ganga de cuarzo (43 %), fragmentos líticos (42 %) y pirita (4,2 %) con pequeñas cantidades de carbonato de calcio (11 %). Cerca del 85 % de la mena corresponde con ganga de cuarzo de la mena y de fragmentos líticos derivados de la roca encajante. La presencia de carbonatos en la mena contribuye a facilitar las etapas de cianuración y la neutralización en las pilas de relave (figura 4.29.).

Figura 4.29. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina La Cirila Fuente: autores.

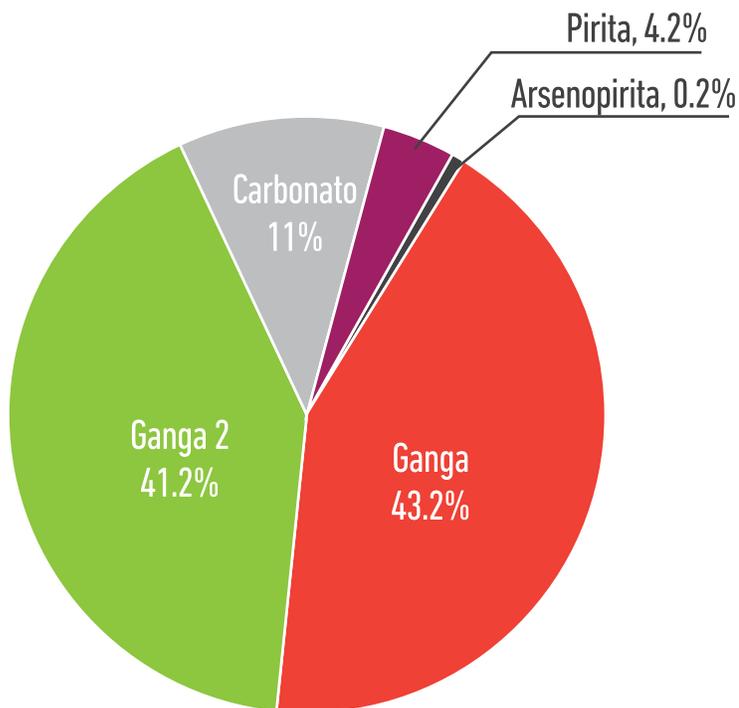


Figura 4.30. Distribución total de minerales metálicos en mina La Cirila. Fuente: autores.

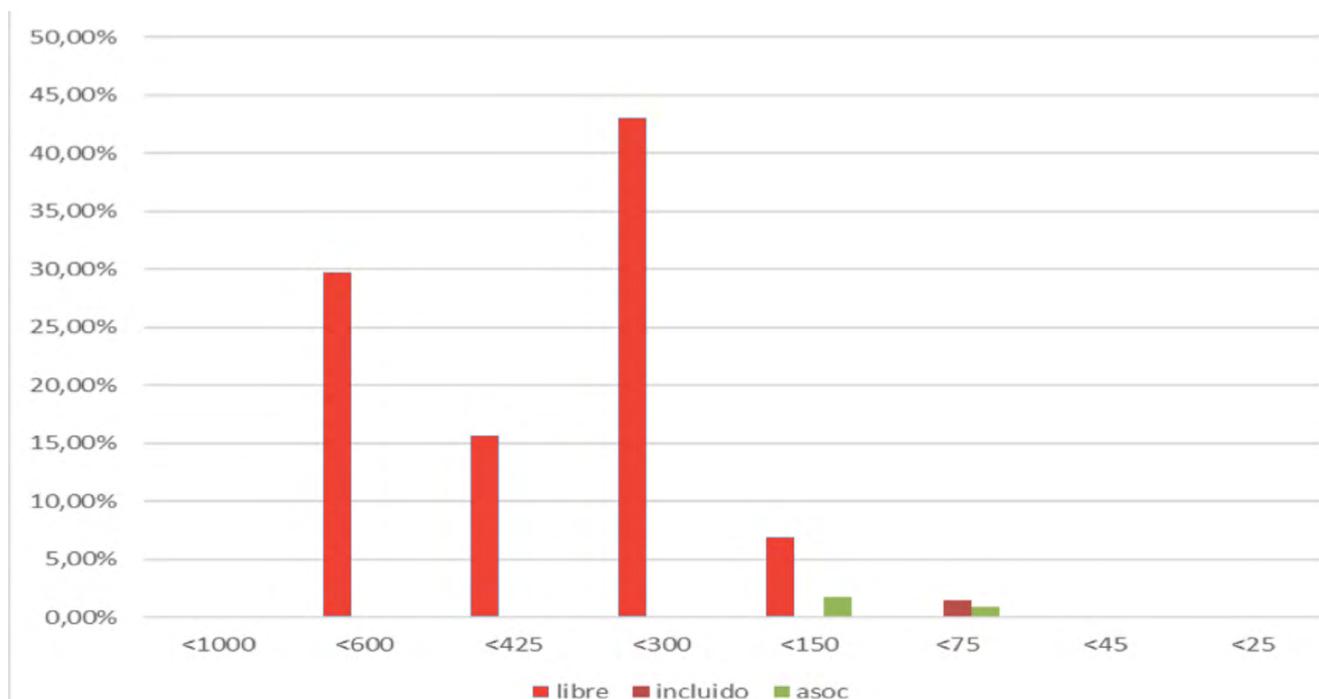
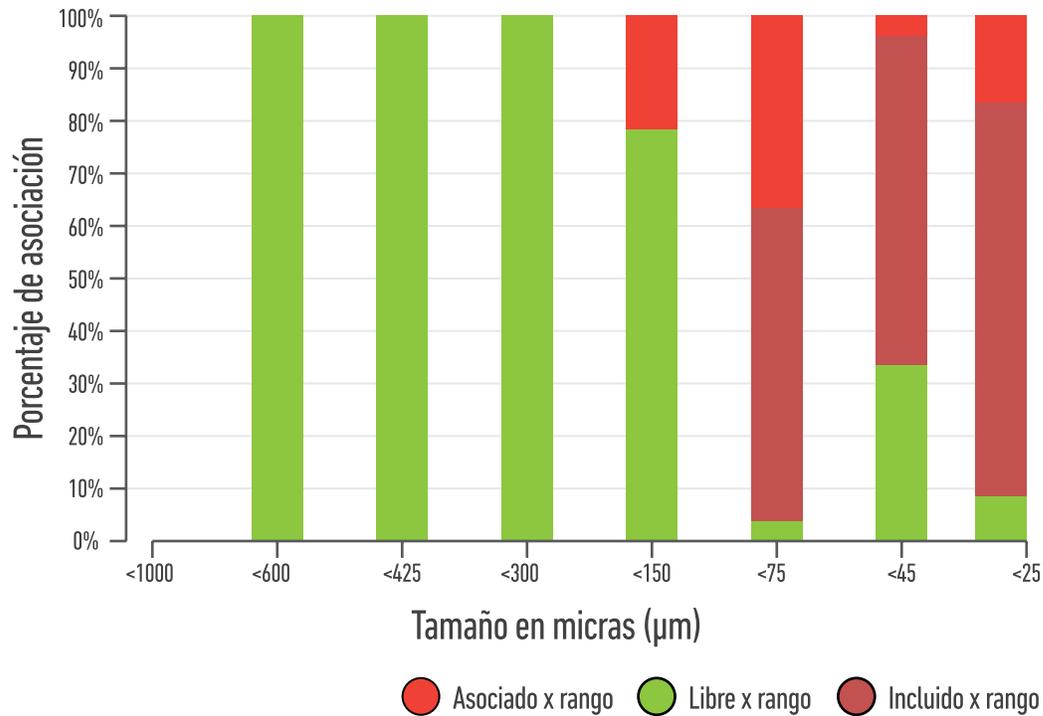


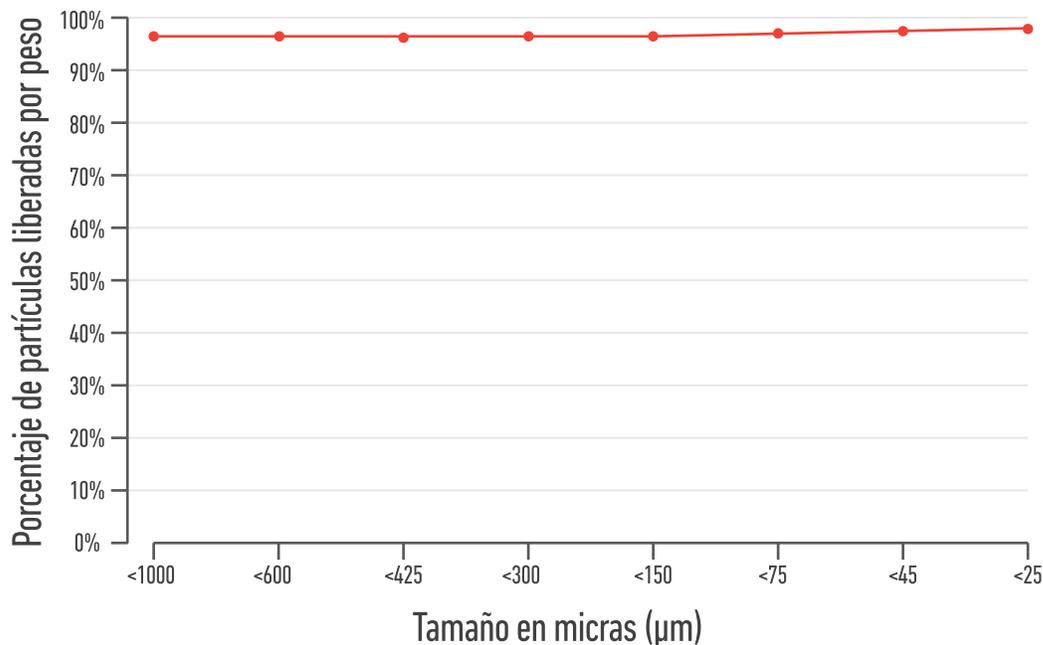
Figura 4.31. Asociación de minerales metálicos por fracción de tamaño. Mina Cirila. Fuente: autores.



La liberación de partículas ocurre en las primeras etapas de molienda, considerando el sistema binario de ganga-sulfuros, se observa que en su mayoría los sulfuros se hallan liberados en la molienda primaria y que por debajo de 300 micrones prevalecen en proporciones menores al 3 % los sulfuros asociados. Esta pequeña porción de menor tamaño indica la presencia de sulfuros microcristalinos diseminados en fragmentos líticos de la roca hospedante.

La distribución de minerales metálicos totales indica alta proporción de partículas liberados en la molienda primaria, particularmente en la fracción de 300 a 425 μm . Por debajo de 150 μm se observan partículas asociadas e incluidas (figura 4.30.).

Figura 4.32. Grado de liberación material de cabeza, mina Cirila. Fuente: autores.



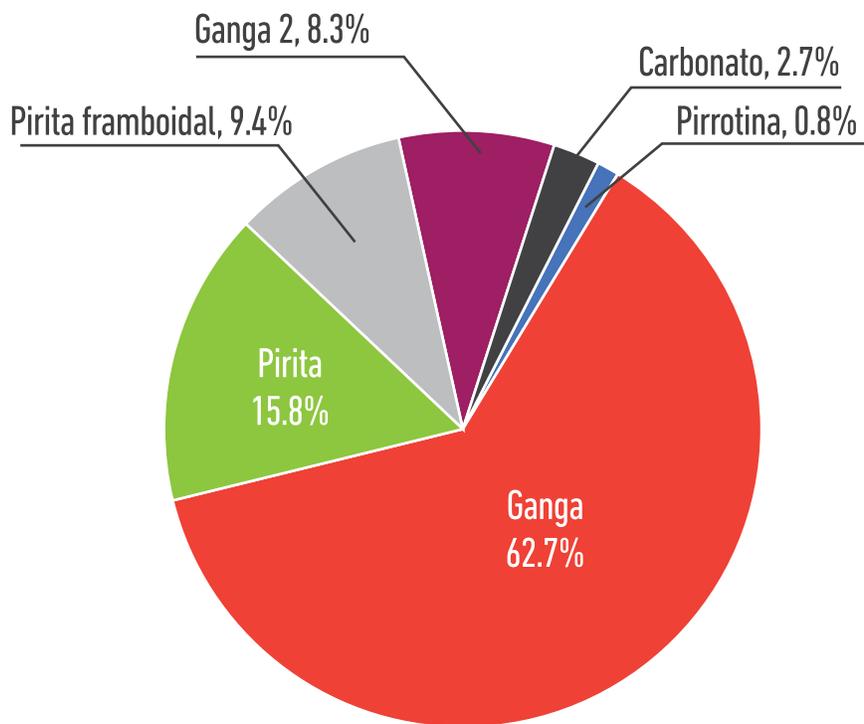
La distribución por sulfuros ponderados al 100 % por cada fracción indica ocurrencia de sulfuros asociados por debajo de 150 μm , y permanencia de sulfuros incluidos en las fracciones menores, lo cual se explica cuando sulfuros de tamaño muy pequeño se hallan diseminados en la ganga (figura 4.31.).

Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso está triturado a 1,4 mm, la distribución de tamaño general de sulfuros corresponde a un alto grado de liberación de las partículas por encima del 95 % de liberación (figura 4.32.).

4.2.8.4. LIBERACIÓN DE SULFUROS EN LA MINA QUINTANA

La distribución mineralógica de la muestra de cabeza de proceso de la mina Quintana muestra que la mena está dominada por ganga de cuarzo (63 %), fragmentos líticos (8 %) pirita y pirita framboidal (25 %), con pequeñas cantidades de pirrotina, esfalerita y calcopirita. La ganga de la mena corresponde a ganga de cuarzo, carbonatos y fragmentos líticos derivados de la roca encajante. La presencia de pirita framboidal es importante, pues es reactiva en los procesos de cianuración (figura 4.33.).

Figura 4.33. Distribución mineralógica de material de cabeza de proceso en la mina Quintana. Fuente: autores.



La liberación de partículas ocurre en la molienda primaria. Considerando el sistema binario de ganga-sulfuros, se observa, en las fracciones gruesas, partículas cuya relación de sulfuros-ganga está entre 50 y 70 %. A medida que disminuye el tamaño de grano se observa el incremento de partículas metálicas libres.

La distribución de minerales metálicos totales indica baja proporción de partículas liberadas en la molienda primaria, particularmente por debajo de 300 micrones se observan partículas metálicas libres (figura 4.34.).

La distribución por sulfuros ponderados al 100 % por cada fracción indica ocurrencia de sulfuros asociados por encima de 600 μm , predominio de partículas libres con constante presencia de sulfuros asociados a ganga hasta la fracción más fina (figura 4.35.).

Teniendo en cuenta que el material cabeza de proceso está triturado a 1,4 mm, la distribución de tamaño general de sulfuros es creciente por fracción. Se inicia con partículas liberadas en proporción menor al 20 % y se va incrementando constantemente en las fracciones más finas hasta alcanzar un grado de por encima del 95 % (figura 4.36.).

Figura 4.34. Distribución total de minerales metálicos en la mina Quintana. Fuente: autores.

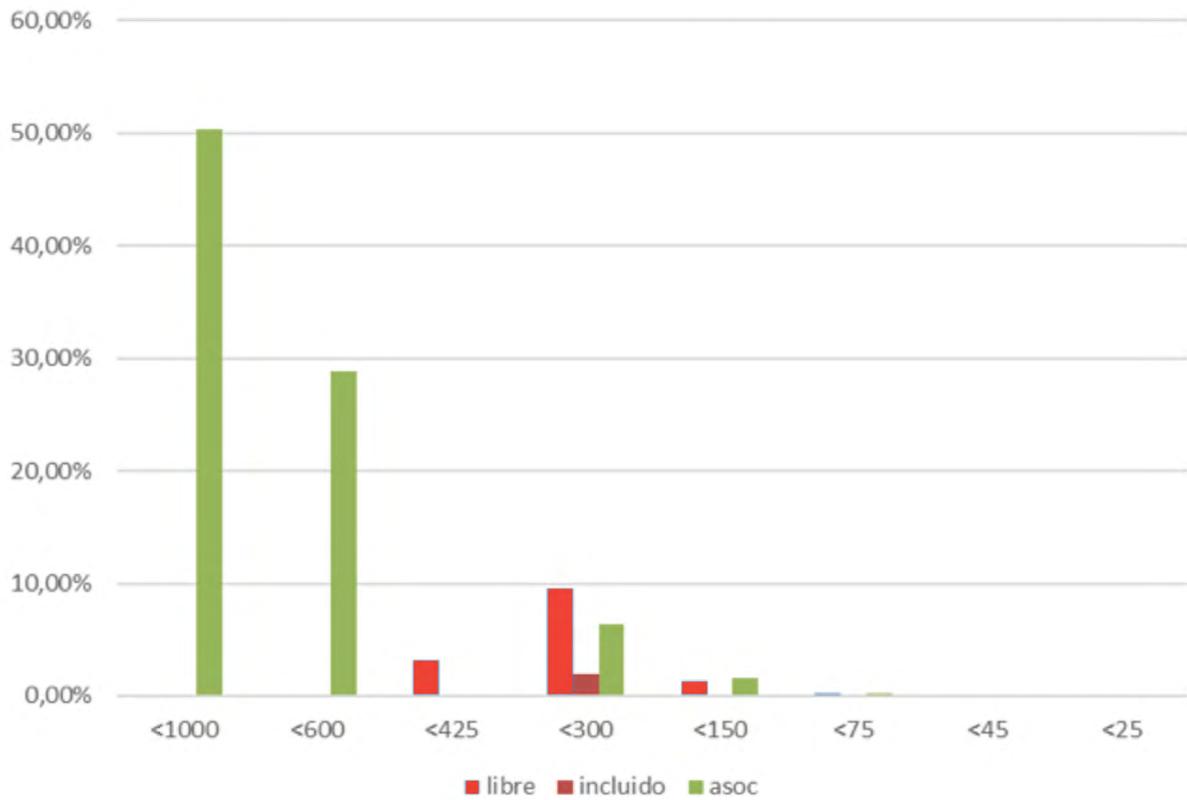


Figura 4.35. Asociación de minerales metálicos por fracción de tamaño en la mina Quintana. Fuente: autores.

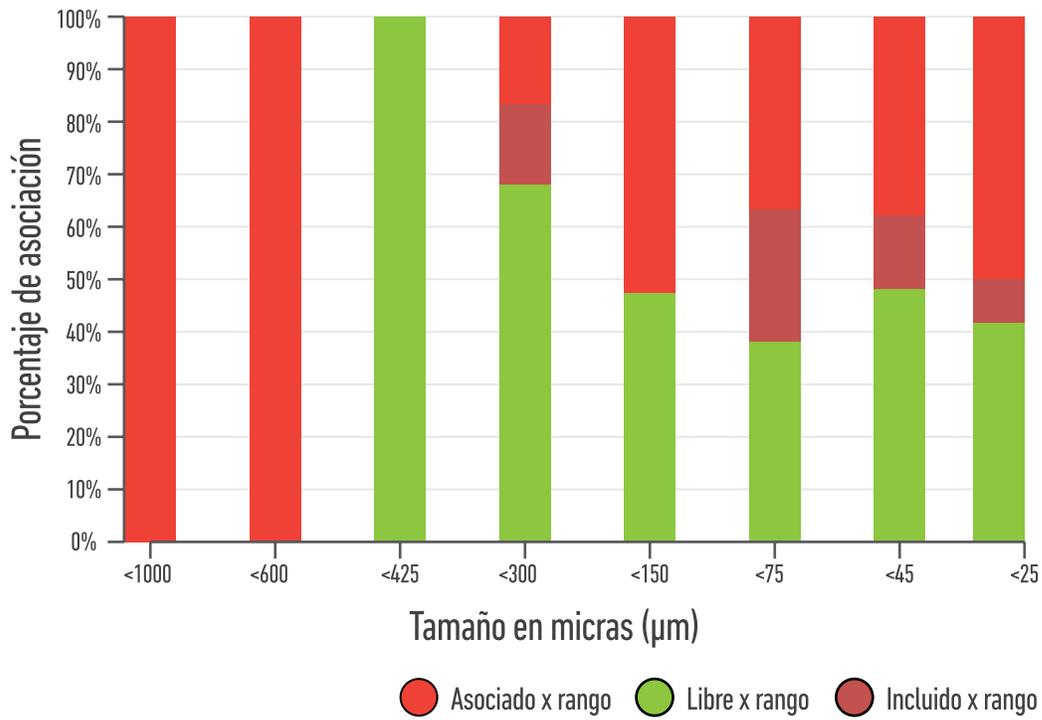
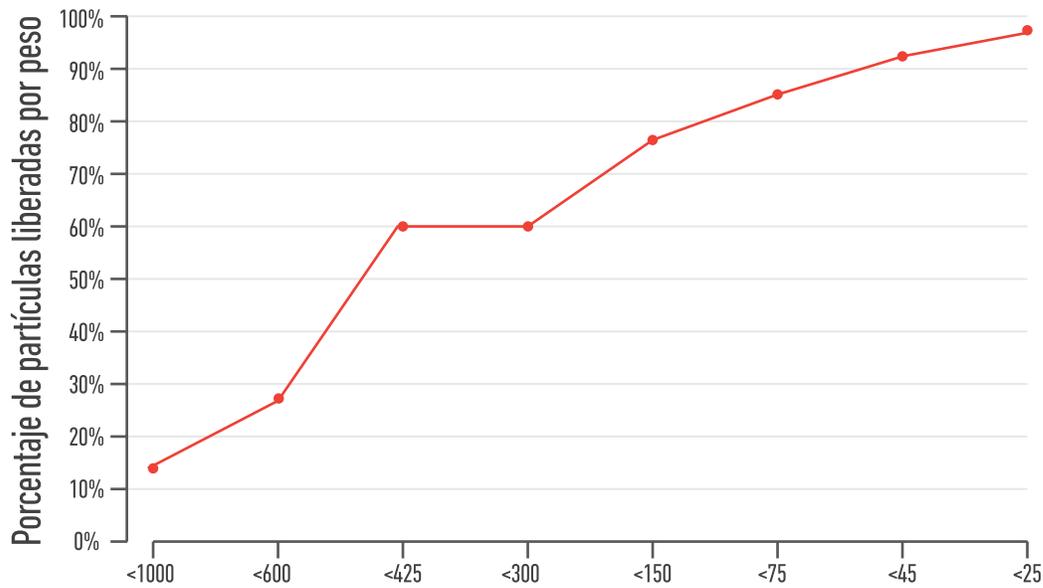


Figura 4.36. Grado de liberación de material de cabeza en la mina Quintana. Fuente: autores.



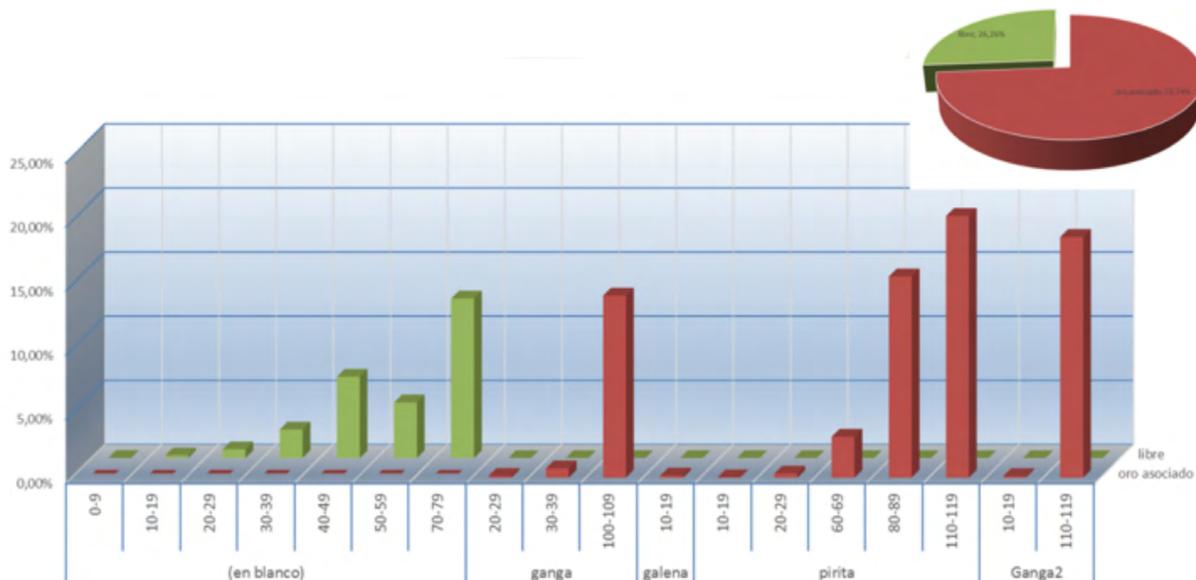
4.2.9. LIBERACIÓN DE ORO

4.2.9.1. LIBERACIÓN DE ORO PRIMAVERA

Un total de 43 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina La Primavera, de las cuales 20 están libres y 14 asociadas. Considerando el diámetro equivalente, se observa predominio de las partículas libres menores a 80 µm y una distribución bimodal para las partículas asociadas, unas partículas menores de 70 µm y otra entre 80 y 120 µm. Estas últimas no fueron descritas en el análisis de veta intacta.

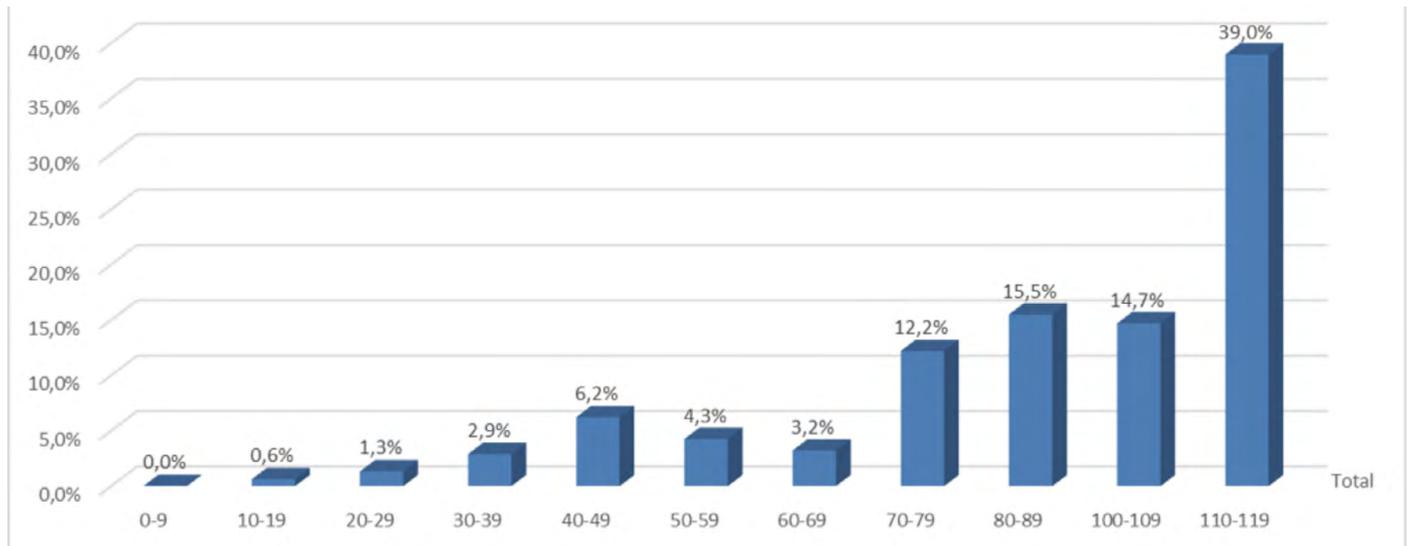
Para la distribución en peso de las partículas de oro, considerando el diámetro equivalente de un círculo (D2Eq), se obtienen 3 poblaciones: una relacionada con las partículas liberadas que representan el 26 % y su tamaño se encuentra entre 30 y 80 µm; una segunda población asociada a pirita con tamaños entre 60 y 120 µm; y una tercera asociada a ganga de cuarzo de tamaño entre 100 y 120 µm. La asociación del oro con pirita, cuarzo y eventualmente con galena representan el 74 % del oro restante (figura 4.37.).

Figura 4.37. Distribución de partículas en peso, por rango de tamaño y asociación en la mina La Primavera. Fuente: autores.



La distribución general del oro indica prevalencia de tamaño según diámetro equivalente por encima de 70 micrómetros y representa cerca del 82 %. Este oro es recuperable por métodos convencionales, mientras que el 18 % restante de menor tamaño requiere de técnicas no convencionales (figura 4.38.).

Figura 4.38. Distribución de oro en peso total de la mina La Primavera. Fuente: autores.

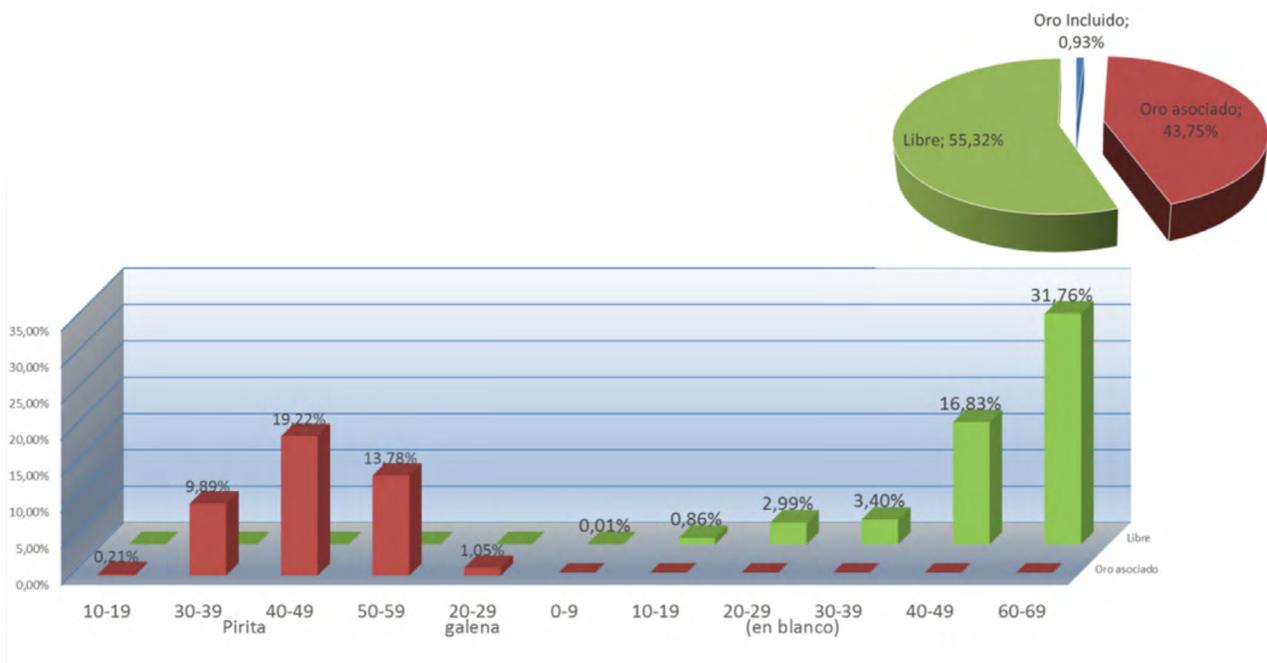


4.2.9.2. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LOS PUJIDOS

Un total de 23 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina Los Pujidos, de las cuales 9 están libres, 7 asociados y 7 incluidos. Considerando el diámetro equivalente, se observa predominio de las partículas menores a 70 µm, mientras que las partículas incluidas son menores a 20 µm.

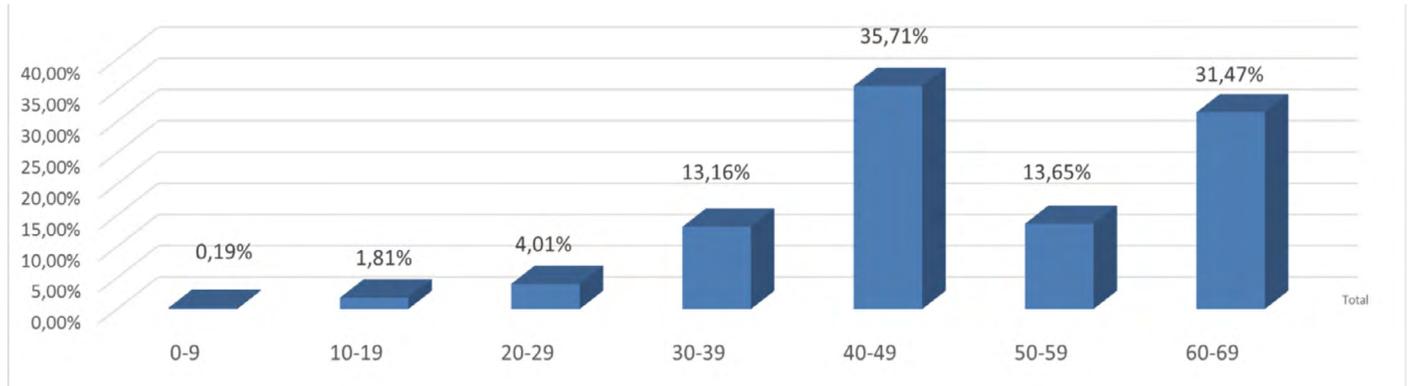
En la distribución en peso de las partículas de oro, considerando el diámetro equivalente de una esfera (D2Eq), se obtienen 2 poblaciones: una relacionada con las partículas liberadas que representan el 55 %, cuyo tamaño se encuentra entre 30 y 70 µm; y una segunda población asociada a pirita con tamaños entre 30 y 60 µm, la cual representa el 43 % restante. En la muestra analizada no se encontraron las partículas de oro de gran tamaño descritas en el análisis petrográfico (figura 4.39.)

Figura 4.39. Distribución de partículas en peso, por rango de tamaño y asociación en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.



La distribución general del oro indica prevalencia de tamaño según diámetro equivalente a entre 40 y 70 μm , y representa cerca del 80 %. Este oro no es totalmente recuperable por métodos convencionales y requiere, junto con el 20 % restante de oro menor a 40 μm , de técnicas no convencionales para su recuperación (figura 4.40.).

Figura 4.40. Distribución de oro en peso total en la mina Los Pujidos. Fuente: autores.

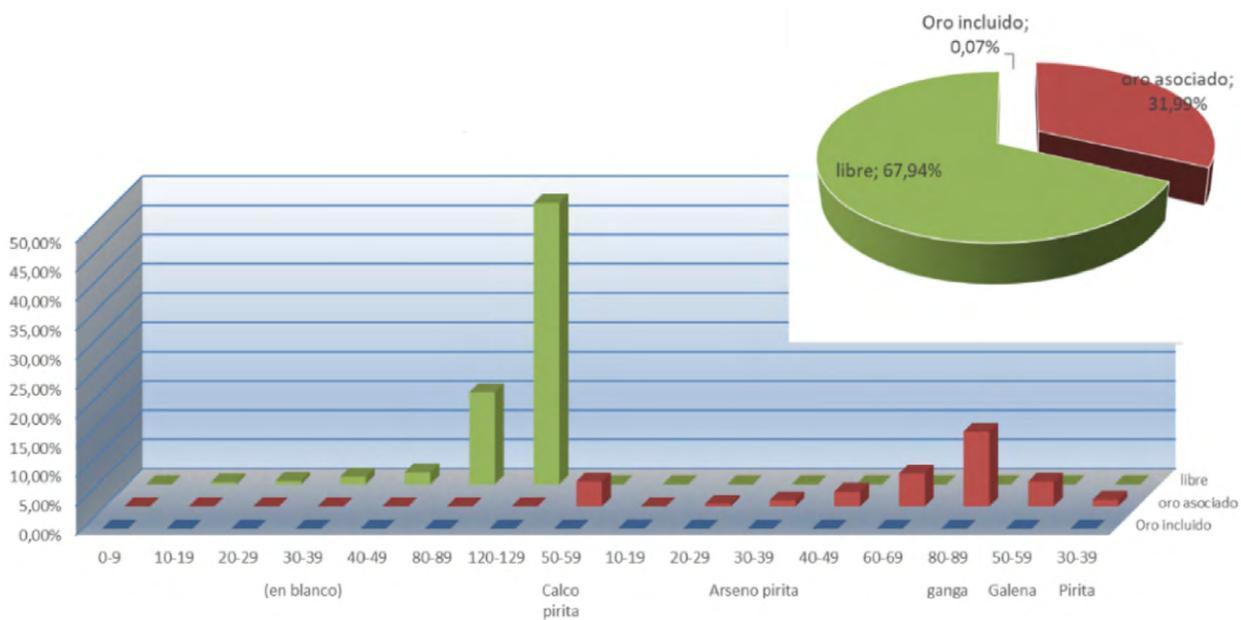


4.2.9.3. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA LA CIRILA

Un total de 21 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina La Cirila, de las cuales 12 están libres, 8 asociados y 1 incluida en pirita. Considerando el diámetro equivalente, se observa predominio de las partículas menores a 70 μm , mientras que hay unas partículas cuyo tamaño varía entre 80 y 130 μm .

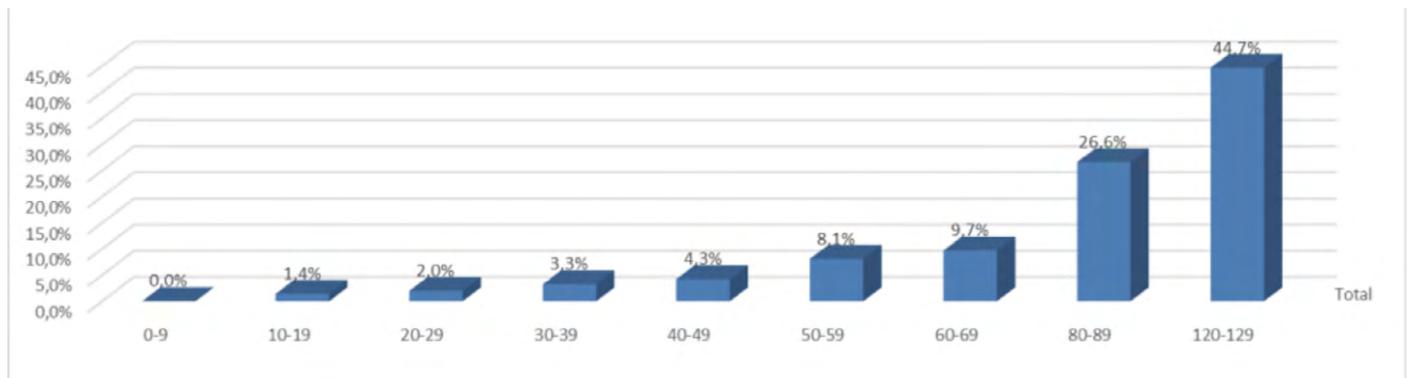
La distribución en peso de las partículas de oro, considerando el diámetro equivalente de una esfera (D2Eq) de partículas liberadas, representan el 68 % y su tamaño se encuentra entre 80 y 130 μm , mientras que las partículas asociadas se encuentran junto a cuarzo, arsenopirita, pirita y galena, y representan el 32% restante (figura 4.41.).

Figura 4.41. Distribución de partículas en peso, por rango de tamaño y asociación en la mina La Cirila. Fuente: autores.



La distribución general del oro indica prevalencia de tamaño según diámetro equivalente. Tiene una tendencia siempre creciente y por encima de 60 μm cerca del 80 %; el 20 % restante de oro es menor a 60 μm y requiere para su recuperación de técnicas no convencionales (figura 4.42.).

Figura 4.42. Distribución de oro en peso total en la mina La Cirila. Fuente: autores.

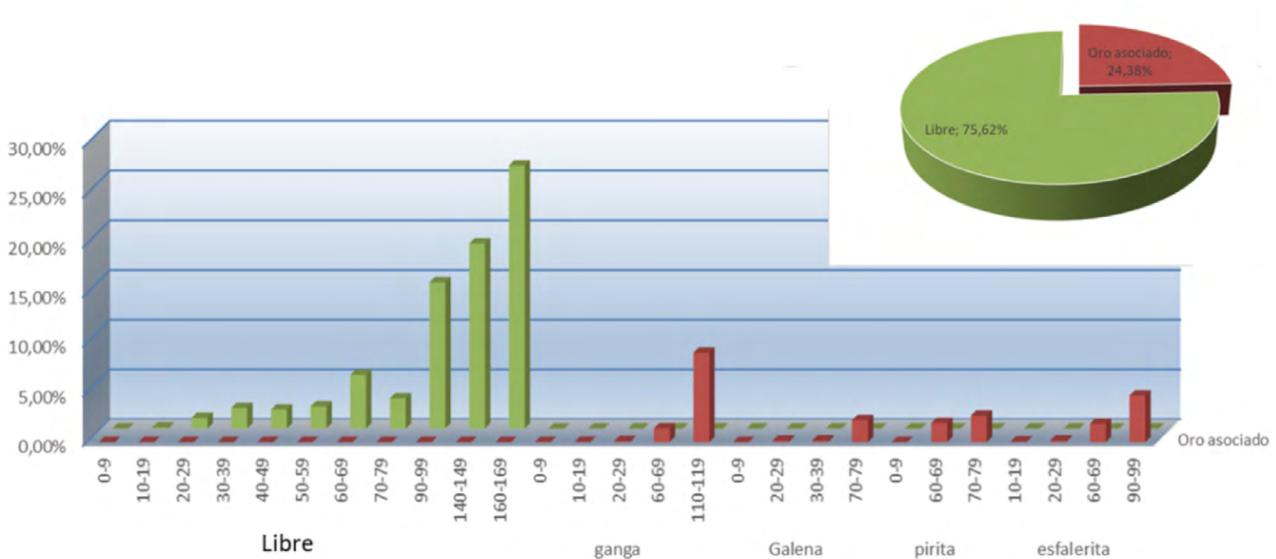


4.2.9.4. LIBERACIÓN DE ORO EN LA MINA QUINTANA

Un total de 63 partículas de oro fueron halladas en el material de la mina a Quintana, de las cuales 41 están libres, y 21 asociados a pirita, esfalerita y galena. Considerando el diámetro equivalente, se observa un mayor número de partículas menores a 50 µm, mientras que hay menor número de partículas entre 60 y 170 µm.

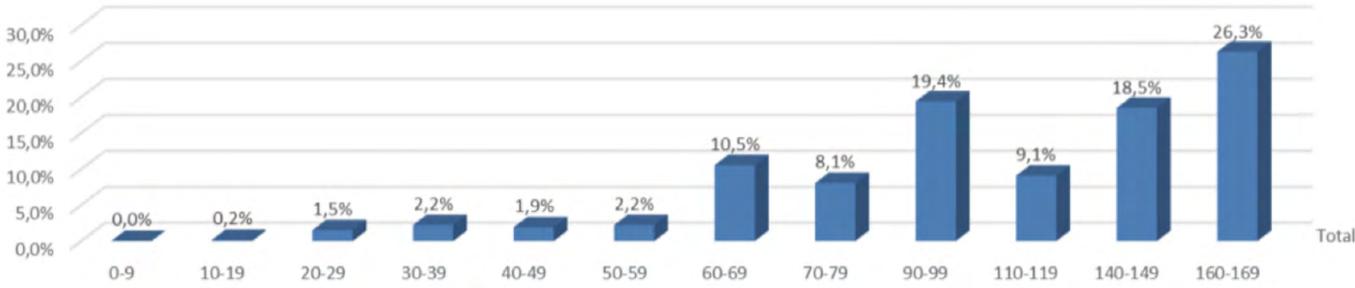
En la distribución en peso de las partículas de oro, considerando el diámetro equivalente de una esfera (D2Eq), las partículas liberadas representan el 75 % y su tamaño se encuentra entre 60 y 170 µm, mientras que las partículas asociadas a cuarzo, arsenopirita, pirita y galena representan el 25 % restante, y su tamaño está por encima de 60 µm (figura 4.43.).

Figura 4.43. Distribución de partículas en peso, por rango de tamaño y asociación. Mina Quintana. Fuente: autores.



La distribución general del oro en peso considerando su tamaño (D2Eq) indica tendencia creciente; por encima de 60 µm se encuentra cerca del 92 % del total, el cual eventualmente puede ser recuperable por métodos gravimétricos convencionales (figura 4.44.).

Figura 4.44. Distribución de oro en peso total y asociación en la mina Quintana. Fuente: autores.



4.3. 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 que ha sido considerada como una zona de sutura entre bloques tectónicos.
- Se han diferenciado 4 sectores, según su localización geográfica y el contexto geológico de las rocas encajantes: sector nororiental, sector central, sector occidental y sector sur. Solo en el sector nororiental existen diferencias notables de mineralización, roca encajante y fluidos mineralizantes.
- Dos eventos mineralizantes fueron diferenciados en las zonas visitadas: el primero, con pirita predominante y pirrotina, arsenopirita, calcopirita, galena y oro, precedidos de cuarzo y carbonatos; el segundo, con menos pirita y más esfalerita, calcopirita y galena con oro.
- El oro de la parte central de Segovia está asociado esencialmente con pirita, mientras que en la parte sur se asocia a pirrotina y en el sector occidental con arsenopirita.
- El tamaño del oro observado en veta intacta es generalmente menor a 70 μm .
- Por lo general, hay correlación entre rangos de tamaño de oro descritos en mena y en material de proceso, como en el caso de la mina Quintana. Sin embargo, en la mina La Primavera las partículas de oro de tamaño mayor a 80 μm no fueron detectadas en los análisis de veta intacta, sino que aparecen en las cabezas de proceso y representan una proporción alta del recurso recuperable por gravimetría convencional. Por su parte, en las minas Los Pujidos y La Cirila sucede lo contrario: partículas de gran tamaño no se observan en los concentrados de cabeza de proceso.
- Con respecto a la calidad del oro, se establece que varía entre 30 y 70 wt%, con lo cual se clasifica como tipo electrum. Los valores más altos se hallan en la mina La Primavera y los valores más bajos se hallan en la mina 30 Granos, mientras que para la mina La Cirila oscilan alrededor del 50 wt% y para la mina Quintana en el 60 wt%.
- La composición mineralógica de las cabezas de proceso muestra contenidos mayores de pirita y cuarzo en las minas La Primavera y Quintana, mientras que en las minas Los Pujidos y La Cirila, la pirita es menor y predomina la ganga de fragmentos líticos de menor dureza para la conminución.
- La liberación de partículas en la etapa primaria de molienda del 95 % y superior en todas las minas, con excepción de la mina Quintana, donde la liberación se viene presentando a medida que se reduce el tamaño de grano.
- Los carbonatos son comunes en la mena, sin embargo, los carbonatos en la mina La Cirila es superior a las demás minas analizadas.
- La presencia de pequeñas cantidades de pirrotina y pirita framboidal son notables en la mina Quintana y estos, por su reactividad, podrían afectar los procesos de beneficio.
- En las cuatro plantas evaluadas el oro que se libera totalmente en molienda a 212 μm representa la porción dominante, con excepción de la mina La Primavera, donde partículas grandes de oro (>100 μm) contienen fragmentos de pirita y esfalerita en sus bordes, y la mina Los Pujidos, donde se halló oro menor a 10 μm incluido en pirita.
 - La distribución del tamaño de

- oro liberado también es bimodal en fracción menor a 50 μm y fracción mayor entre 80 y 170 μm , ligeramente mayor en las minas La Cirila y Quintana.
- La distribución en peso del oro liberado siempre es creciente y está por encima de 60 μm ; más del 90 % de estas partículas pueden ser beneficiadas por métodos convencionales de concentración.

5. ASPECTOS MINEROS

En este capítulo se describen los aspectos mineros de las pequeñas explotaciones y minas artesanales (MAPE) que se visitaron en el Municipio de Remedios. Para el desarrollo del proyecto inicialmente se realizó la socialización de las guías metodológicas con la comunidad minera.

Equipo técnico del SGC dentro de la galería de mina Quintana - Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por Philly Abueta, Servicio Geológico Colombiano





SERVICIO
GEOLOGICO
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 y 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, donde, como su nombre lo dice, se instalan y realizan las obras y accesos necesarios para ejecutar la etapa de explotación del mineral. Esta última cuenta con tres tipos de labores: desarrollo, preparación y operación. Estas etapas constituyen el ideal para que un proyecto minero se lleve a cabo, debido a que es fundamental determinar si se cuenta con recursos y reservas mineras en las fases de exploración, prefactibilidad y factibilidad, donde se establece la viabilidad de continuar con el desarrollo del negocio minero.

La descripción detallada de las etapas de un proyecto minero se puede considerar de la siguiente manera (figura 5.1.):

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. 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.

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. 1) 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. 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. Incluye la fase de producción” (MME, 2015).

“Preparación. 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: 1) inclinados y tambores, 2) subniveles y sobreguías y 3) algunas cruzadas...” (MME, 2015).

Producción. Durante la producción se extraen y procesan los materiales de interés económico, se readecuan los terrenos intervenidos y se conduce la mina. “Durante esta etapa se ejecuta una serie de actividades y ciclos que permiten que la mina permanezca en operación y producción. Estas son denominadas operaciones unitarias, y se clasifican entre las ejecutadas para desprender el mineral (arranque), para cargarlo (cargue) y para transportarlo hasta la planta o sitio de mercado (transporte). Estas operaciones se apoyan en las denominadas operaciones auxiliares” (MME, 2015).

Beneficio. “Conjunto de operaciones empujadas en el tratamiento de [...] minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados [ganga] con el uso de las diferencias en sus propiedades” (MME, 2015).

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).

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 la 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, Hustrulid 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, el cual 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. Así como 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) y Darling Peter y SME (2011).

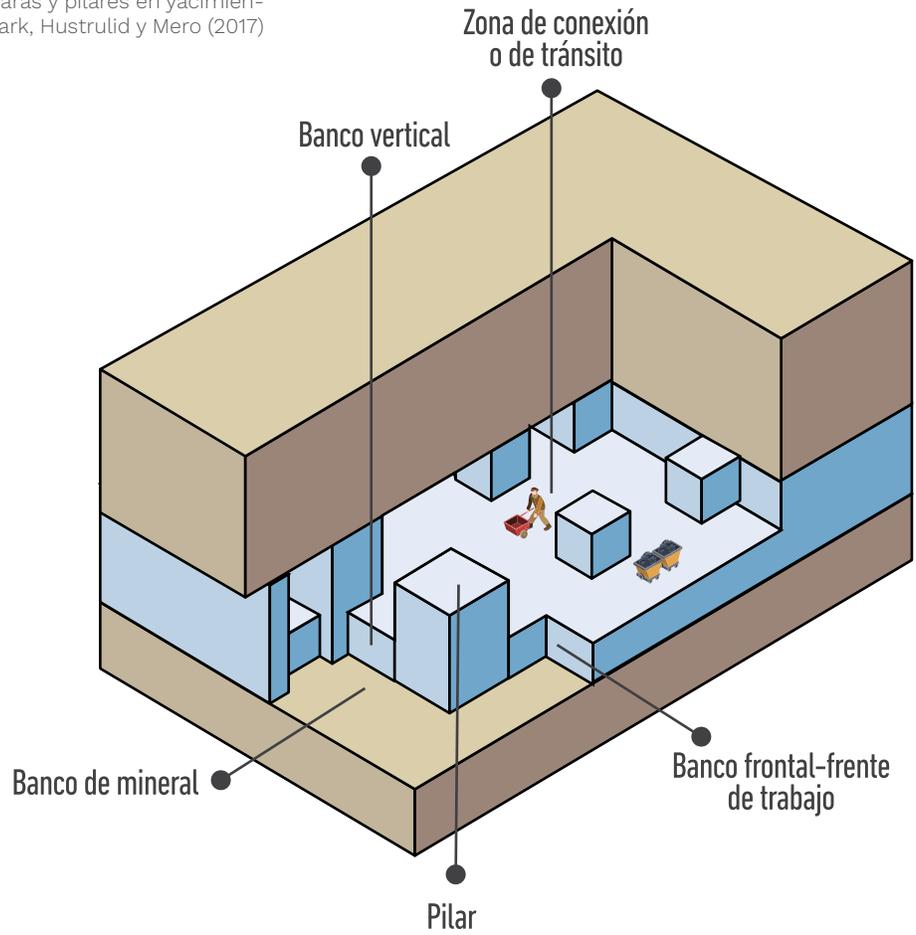
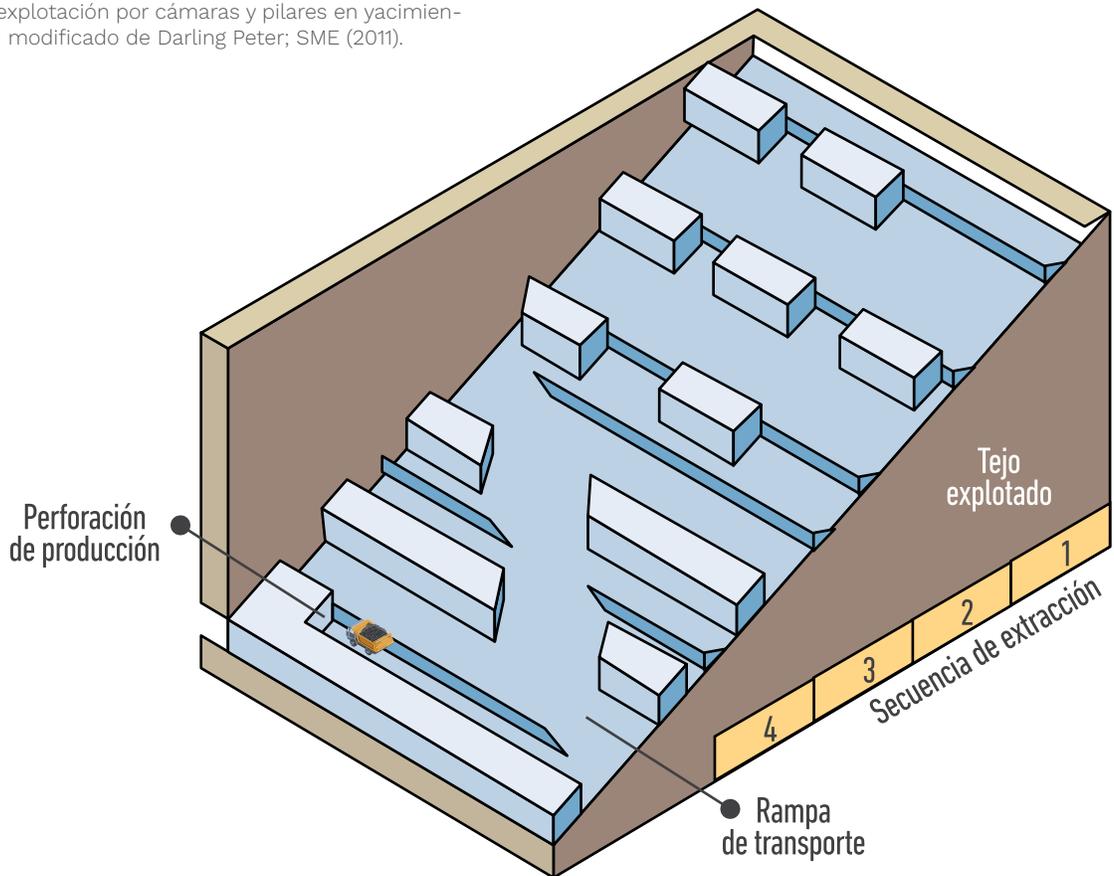


Figura 5.4. Método de explotación por cámaras y pilares en yacimientos inclinados. Fuente: modificado de Darling Peter; SME (2011).



En corte y relleno vertical, la variación más común, la minería comienza en el nivel inferior y funciona hacia arriba. En esta técnica, el mineral se excava en rodajas 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. También ayuda a proporcionar una superficie de trabajo para que los mineros excaven secciones más altas del depósito de mineral (Chavan, 2018).

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

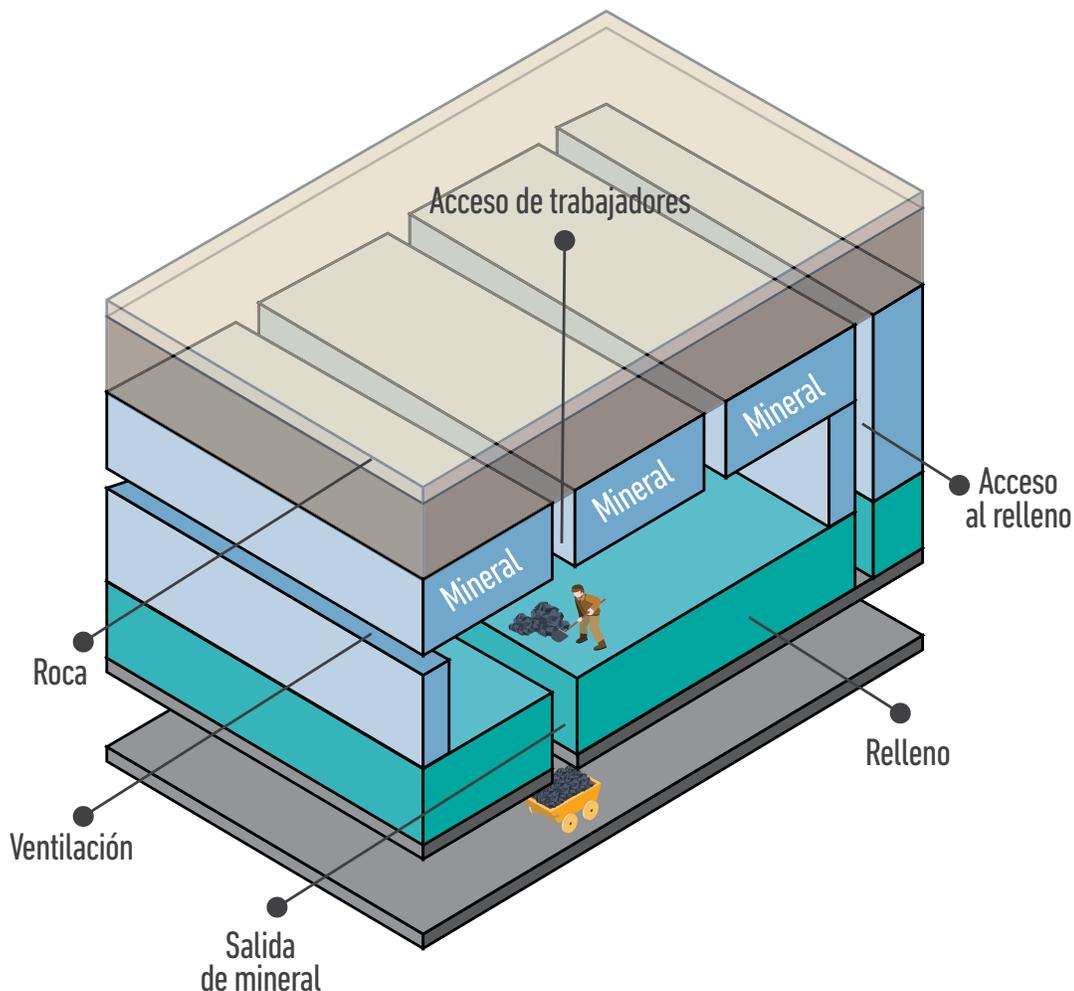
Variaciones:

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.

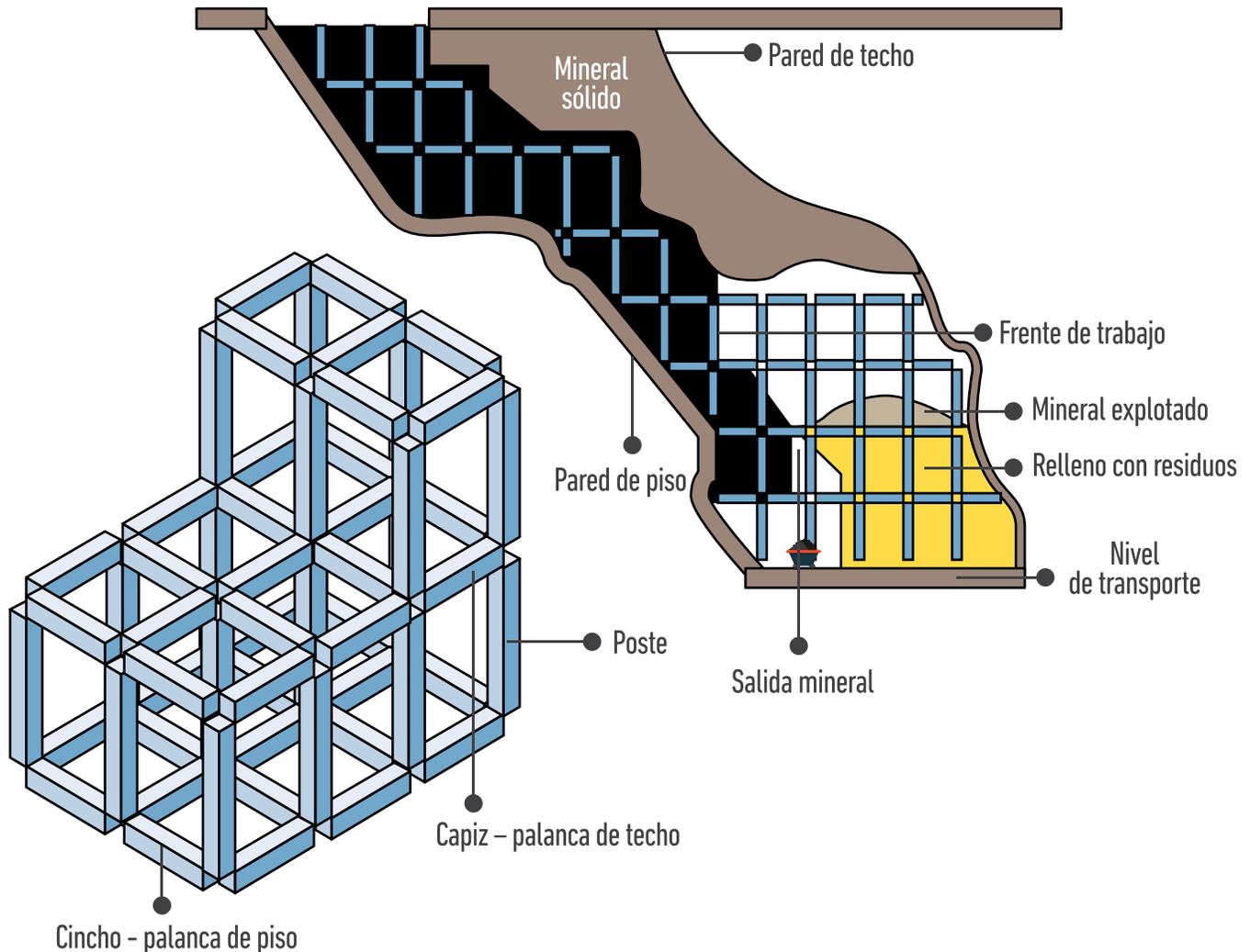
Figura 5.5. Método de explotación corte y relleno. Fuente: modificado de Here are the types... (2018).



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 (conjunto de cuadros de madera). Un conjunto cuadros de madera 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, y los conjuntos de cuadros de sostenimiento de cada piso sucesivo se enmarcan en la parte superior del piso anterior (911 Metallurgist, 2017).

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

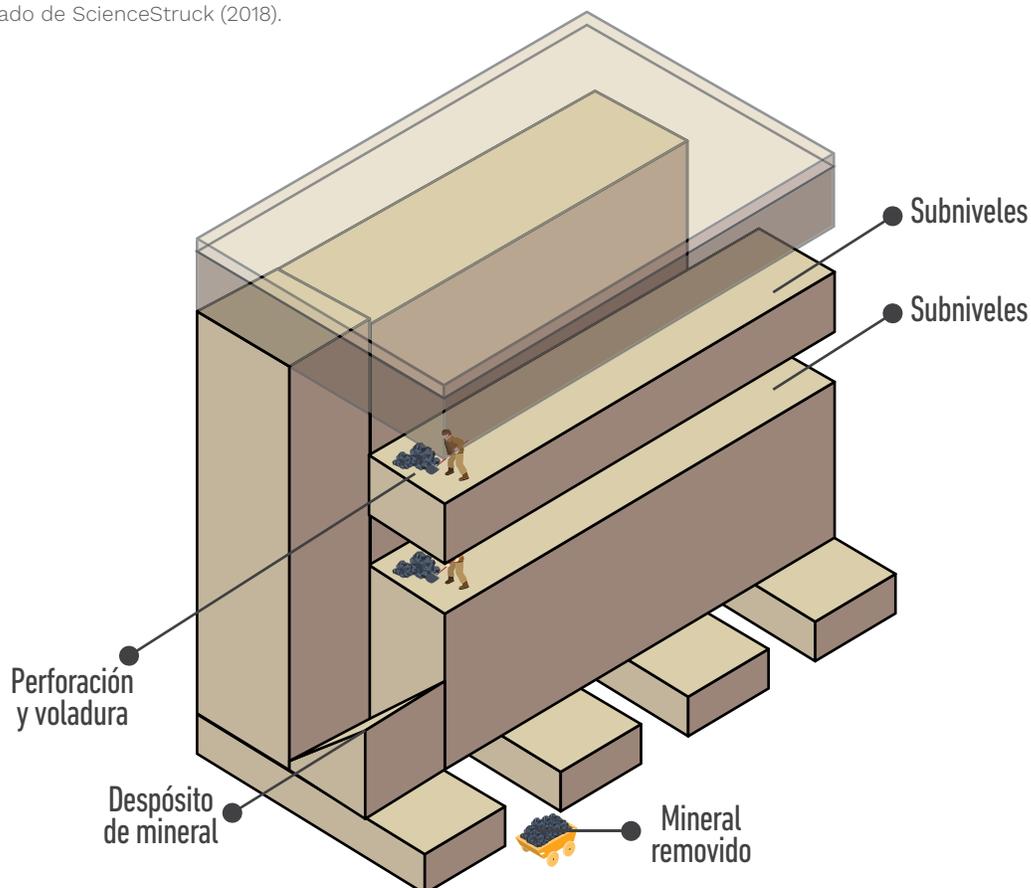
- Forma: la forma del cuerpo mineralizado debe ser tabular y regular.
- Buzamiento Dip mayor de 50° . El buzamiento debe ser mayor que el ángulo de reposo del material quebrado.
- Geotecnia: la resistencia de la roca mineralizada debe ser moderada a competente, y la roca de caja debe ser competente.
- 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 ajustándose a las condiciones de la mineralización. Por ejemplo, puede ser por subniveles en retirada; se requiere un solo nivel para llevar a cabo las actividades de producción, la extracción se realiza en un solo sentido (Chavan, 2018; Universidad Politécnica de Madrid, 2007).

Método de tambores paralelos

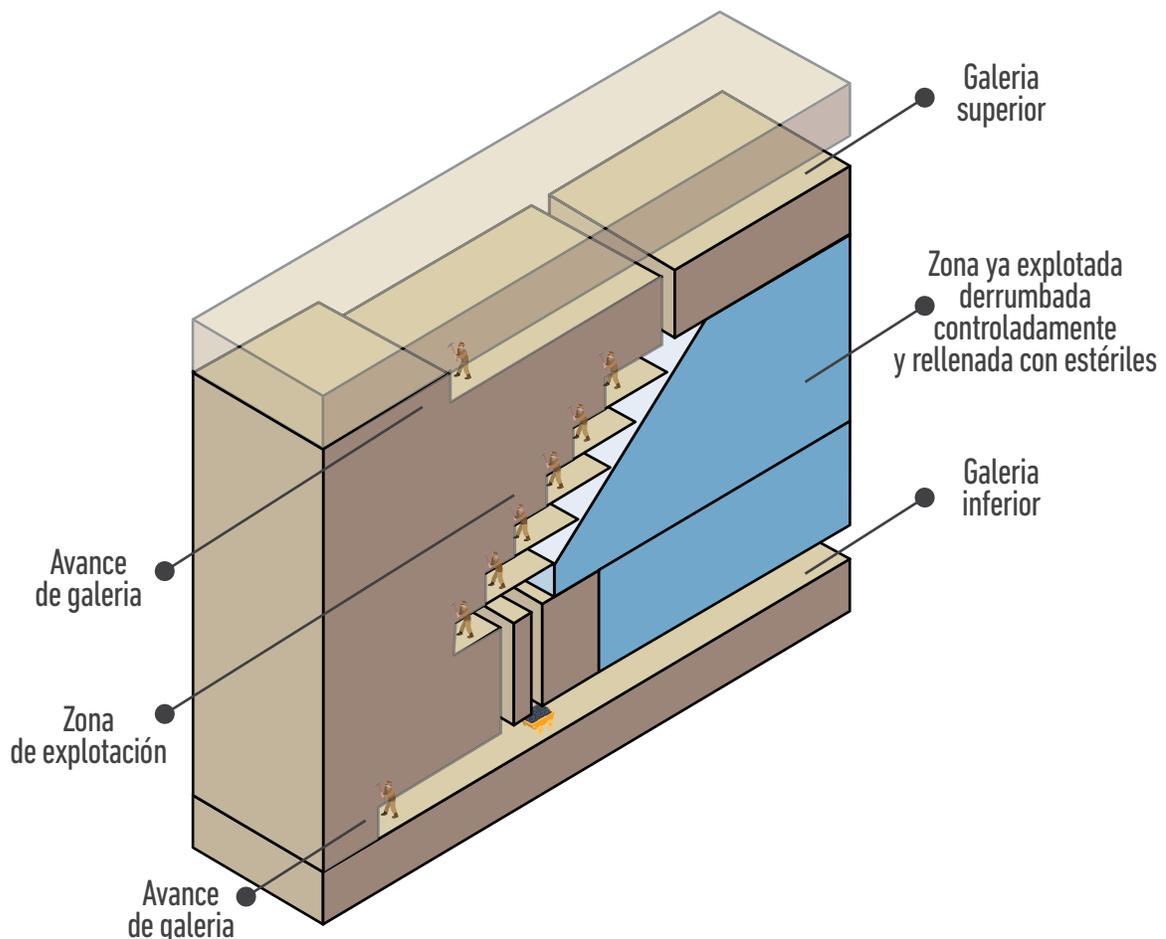
- Se utiliza en mineralizaciones con inclinaciones superiores a los 35°.
- Dependiendo de la dureza de los respaldos, se define si se requiere sostenimiento. Cuando los respaldos son inconsistentes se utiliza sostenimiento en cuadros.
- Los tambores avanzan por el filón siguiendo el buzamiento.
- Se 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 y el avance se realiza descendentemente y en frentes cortos cuando el buzamiento es fuerte (80-90°) (Ministerio de Minas y Energía, 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 ensanchando 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 a la planta de beneficio. El arranque puede ser realizado con métodos mecánicos (forma continua y discontinua) y también por medio de la perforación con sustancias explosivas (forma discontinua) (MinMinas, 2015).

”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 rpiado 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.

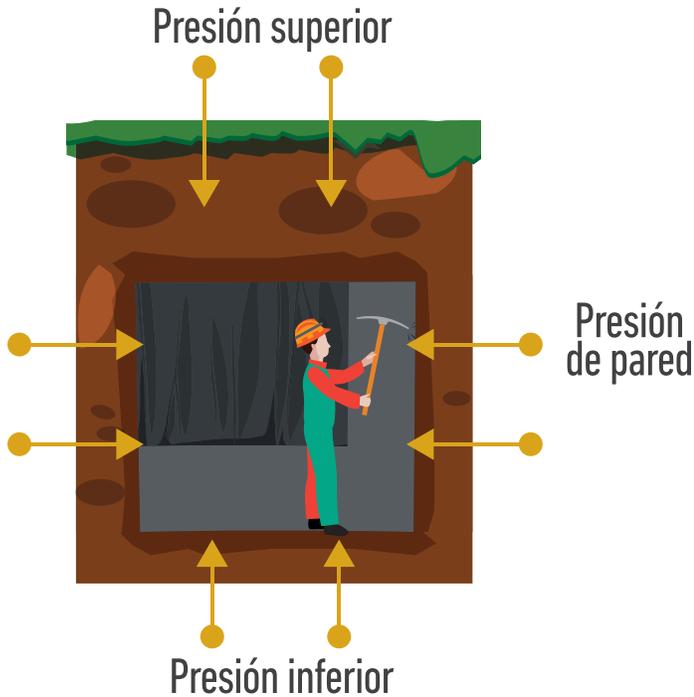
El **arranque con martillo** picador se realiza con aire comprimido y es empleado en rocas de dureza media.

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 explotador minero debe garantizar que el área de las labores definidas para el transporte sea 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. Así, el área mínima de excavación minera debe ser de tres metros cuadrados (3 m²) con una altura mínima de 1,80 m (Decreto 1886 de 2015)

Figura 5.11. 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) Clases según Brown .
- (b) Para rocas con una resistencia en compresión uniaxial menor que 25 Mpa los resultados del ensayo de carga puntual son poco confiables.
- (c) Esta caracterización no exime los análisis de laboratorio y estudios geoestructurales de las rocas para definir su geomecánica y planes de sostenimiento.

Figura 5.12. Tipos de sostenimiento. Fuente: autores.



Puerta de madera



Taco de madera



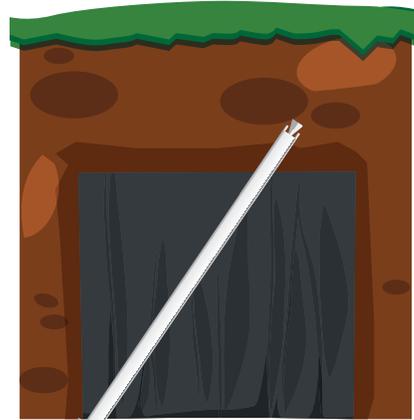
Arco de acero



Palanca de acero



Concreto



Perno de anclaje

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 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 manguera-

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 Sulfhídrico	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 más de 4 veces en la jornada de trabajo.

ras 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

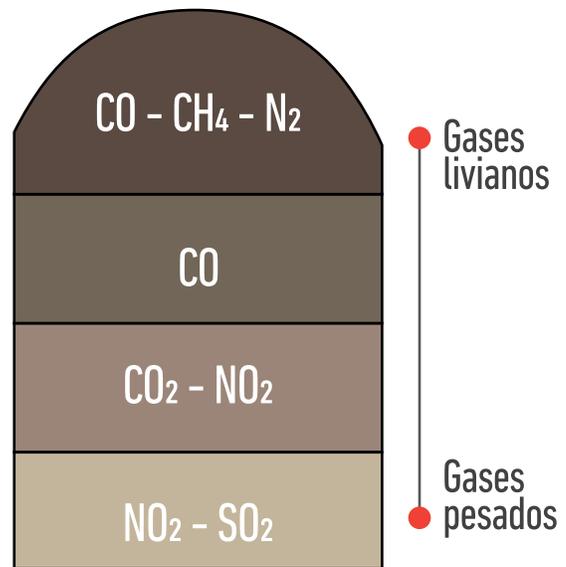


Figura 5.15. Concentraciones máximas de metano (CH₄). Fuente: Minminas, 2015, Decreto 1886. Reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas.

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

5.2.1. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las siguientes actividades se realizaron para el análisis minero:

- Revisión de antecedentes mineros 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 Remedios.
- Planeación de las actividades de campo.
- 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.
- 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, utilizó los datos de campo para describir, de cada mina artesanal en pequeña escala (MAPE), aspectos como el sistema y el método de explotación:

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.

- 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.

En el capítulo minero se describen algunas características de explotaciones mineras del Municipio de Remedios. Estas explotaciones se identificaron en los recorridos de trabajo del equipo de profesionales de la Guía Metodológica. Del total de minas que se seleccionaron para este proyecto solamente fue posible realizar caracterización minera a cinco minas, lo anterior por diferentes motivos como desplazamientos, seguridad, logística.

Con la información obtenida de las minas se plantearon consideraciones mineras que pueden servir en los procesos de planificación minera de las explotaciones. Las minas estudiadas son artesanales y en pequeña escala (MAPE) y para este estudio se clasificaron según el avance minero, las herramientas y técnicas utilizadas como mina artesanal o pequeña explotación, así:

- 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.
- Explotaciones pequeñas: son extracciones en pequeña escala, 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 (MinMinas, 2015).

5.2.2. EXPLOTACIONES MINERAS VISITADAS

Las MAPE de veta objeto de análisis desde el punto de vista minero fueron: Río Gold (El Hundidor), La Cirila, San Pedro N.º 2, San Pedro-Napoleón y Quintana.

Figura 5.16. Minas visitadas en la zona de Remedios. Fuente: Autores.

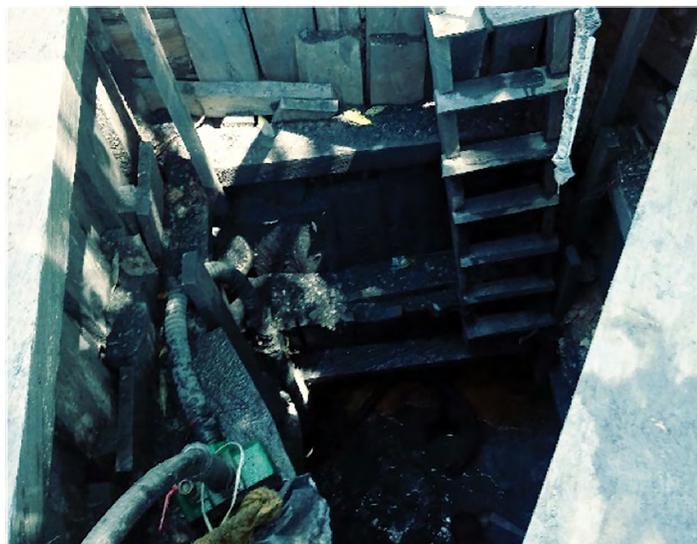
NOMBRE MINA
Río Gold (El Hundidor)
La Cirila
San Pedro No 2
San Pedro Napoleón
Quintana

5.2.2.1. MINA RÍO GOLD (EL HUNDIDOR)

La Labor minera de Río Gold se localiza en la vereda El Hundidor y está bordeada por la quebrada Río Gold. Esta actividad no ha iniciado labores de explotación, solamente al momento de la visita de campo se estaban realizando labores de desarrollo minero mediante la construcción de una clavada de acceso principal

adyacente a la quebrada con una profundidad de 7 m. Para desarrollar las labores mineras a esta profundidad tienen que bombear el agua de infiltración.

Las rocas observadas en alrededores de la quebrada corresponden a “lodolitas capas medias con tendencia general NS y buzamientos entre 20 y 30° al este, que son la caja de una veta de cuarzo blanco lechoso de dirección N80°W/30°E”. El objetivo de los mineros es profundizar unos metros más para desarrollar guías laterales e iniciar con la primera etapa de explotación.



Fotografía 5.1. Mina Río Gold en construcción. Fuente: autores.



Fotografía 5.2. Garrucha para extracción de material de la clavada. Fuente: autores.

Las características de la Mina Río Gold se resumen en la siguiente tabla:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina Río Gold
VEREDA	El Hundidor.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso por carretable hasta el Punto La Cianurada, luego continua por sendero. La actividad minera se encontraba en labores de desarrollo para el acceso. Se estaba construyendo una clavada de 7m de profundidad. sin haberse iniciado labores encontrado la mineralización.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Al momento de la visita solamente se realizaban labores de desarrollo. No se habían iniciado la fase de explotación minera. Según lo informado por los mineros se extrae material de las orillas de la quebrada el Hundidor y también se realiza lavado de arenas con canalón. Según lo referenciado en el capítulo geológico la veta de cuarzo blanco lechoso de dirección N80°W/30°E. Las labores de desarrollo se realizan con arranque y cargue manual utilizando herramientas como picas, palas.
FORMA DE VENTILACIÓN	Natural.
SOSTENIMIENTO	La clavada en construcción presenta sostenimiento en cuadros de madera y forro con tablones.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque manual.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual en baldes y transporte con garrucha y motor eléctrico.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	La clavada de la mina Río Gold se encuentra a menos de 5m de distancia de la quebrada El Hundidor interviniendo las franja de protección de la quebrada. Por otra parte la cercanía a la quebrada ocasiona alto nivel freático y necesidad de bombeo de agua con motobomba para poder desarrollar las actividades mineras.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación laboran generalmente cinco (5) mineros. En la planta de beneficio laboran cuatro (4) personas. En el área se encuentran molinos de bolas.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Información no disponible debido a que no se había iniciado etapa de explotación.
BENEFICIO	Molinos de bolas y amalgamación. Según lo informado esta planta beneficia material de la veta que se encuentra en las orillas de la quebrada El Hundidor y también de pequeñas explotaciones informales que se localizan en la zona montañosa aledaña a la mina.

5.2.2.2. MINA LA CIRILA

Esta actividad minera artesanal se localiza en la vereda San Mateo del municipio de Remedios. La mina se encuentra en un proceso de formalización minera mediante la constitución del área de Reserva Especial La Cirila. Esta mina es una explotación artesanal que ha sido trabajada por diversos propietarios, quienes han inyectado recursos para ampliar las labores de desarrollo de la mina, que cuenta con una labor de acceso con longitud aproximada de 393,4 m. Está conformada principalmente por una guía y tramos de cruzadas. La labor principal tiene “dirección N40-60 W y luego se sigue una zona de cizalla mineralizada con dirección N-S y N30-40E”. La mineralización corresponde a una zona de cizalla donde se presenta una veta multifracturada de cuarzo, carbonato y sulfuros en baja proporción. El sulfuro predominante es pirita, seguido de arsenopirita, calcopirita y galena. La franja mineralizada se encuentra encajada en el contacto entre rocas ígneas granitoides y rocas metamórficas gnéissicas.

Las características de Mina La Cirila se resumen en la siguiente tabla:



Fotografía 5.3. Bocamina La Cirila. Fuente: autores.



Fotografía 5.4. Combinación de sostenimiento natural y artificial con puertas alemanas. Fuente: autores.

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina La Cirila
VEREDA	La Cirila.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso por carreteable hasta la Mina.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	A la mina se ingresa por una guía hasta llegar a los frentes de explotación dirección N40-60 W y luego se sigue una zona de cizalla mineralizada con dirección N-S y N30-40E . La explotación se realiza siguiendo el rumbo de la veta la cual se encuentra en vetas delgadas.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural y extractor para aire viciado o contaminado.
SOSTENIMIENTO	La roca de caja presenta estabilidad por lo que se utiliza sostenimiento natural en algunos sectores de la guía. Los primeros metros de ingreso a la guía presentan inestabilidad por encontrarse la roca más meteorizada por lo cual se instalaron puertas alemanas cada metro.
FORMA DE ARRANQUE	Martillos perforadores neumáticos.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual, transporte con vagones tracción manual.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Manejo de esteriles y aguas de mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación laboran generalmente ocho (8) mineros. cocheros, paleros, machineros. Explotación por guías y tambores. La mina cuenta con dos niveles superiores y un nivel principal En la planta de beneficio laboran tres (3) personas. En el área se encuentran molinos 9 molinos californianos para el proceso de beneficio. En esta actividad participan grupos de 2 a 3 personas por molino.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	Tenor reportado: 16-30 reales/ton. Producción mes: 10-40 ton/mes de mineral estéril.
BENEFICIO	Se cuenta con trituración primaria, molino de bolas continuo, tromel, mesa wifley, molinos de bolas, desarenador.

5.2.2.3. MINA SAN PEDRO N.º 2

Localizada a 1 km al NE de la cabecera municipal de Remedios, es una pequeña operación artesanal con dos entradas, la principal por cruzada y la secundaria en guía. Sigue una estructura de cuarzo blanco lechoso con piritita hasta del 2 % y trazas de galena y esfalerita. El rumbo de la estructura es N buzando 40° al E; tiene un espesor de 50 a 60 cm.

La roca de caja es de textura fanerítica con tamaño muy grueso a pegmatítico de composición de granítica, con cristales de feldespato potásico y plagioclasa. La hornblenda se ha transformado en clorita.



Fotografía 5.5. Bocamina Principal San Pedro. Fuente: autores.



Fotografía 5.6. Malacate para transporte. Fuente: autores.

Las características de Mina San Pedro se resumen en la siguiente tabla:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina San Pedro
VEREDA	San Pedro No 2.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Desde la cabecera Municipal de Remedios en trayecto de 30 minutos vía de acceso por carretable hasta la Mina. A la mina se ingresa por una guía hasta llegar a los frentes de explotación dirección N40E.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La explotación se realiza siguiendo el rumbo de la veta la cual se encuentra en vetas delgadas.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación artificial.
SOSTENIMIENTO	La roca de caja presenta estabilidad por lo que se utiliza sostenimiento natural en algunos sectores de la guía. En algunos puntos de debilidad se ha instalado puertas alemanas debido a la alta meteorización de la roca.
FORMA DE ARRANQUE	Herramientas manuales y martillos perforadores neumático.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual y con carretillas.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Manejo de esteriles de mina.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación laboran generalmente cinco (5) mineros. En esta mina no se cuenta con planta de beneficio, el material se acomoda en costales de 50 kilos y se destina a una planta de la zona.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	10-50 ton/mes de mineral y estéril. No reportador datos de tenor. Relación estéril mineral: 1 ton estéril / 2 mineral.
BENEFICIO	No se cuenta con planta de beneficio, el material se vende como concentrado a plantas de beneficio de la zona.

5.2.2.4. MINA SAN PEDRO-NAPOLEÓN

Esta mina se encuentra localizada en la cabecera municipal de Remedios en la salida hacia el NE. Los trabajos se encuentran en el título minero 6325 y se tiene un contrato de operación con la empresa Napoleón Gold Minas. Al momento de la visita de campo se informó que la mina principal se encontraba derrumbada y que no había posibilidad de ingresar. Por lo tanto, se visitó otro trabajo que se encontraba en labores de desarrollo, el cual corresponde a un inclinado de 50° denominado El Palo, con 7 m de longitud para acceder a una pequeña estructura (20 cm) de cuarzo oxidada con manganeso; la roca de caja saprolitizada es un granito con textura fanerítica de grano grueso a pegmatítico y alteración clorítica de distribución parchosa.



Fotografía 5.7. Bocamina Principal San Pedro. Fuente: autores.



Fotografía 5.8. Transporte de material con costales y amarras, llamadas katangas. Fuente: autores.

Las características de Mina San Pedro Napoleón se resume en la siguiente tabla:

PEQUEÑA EXPLOTACIÓN O MINA ARTESANAL	Mina San Pedro Napoleón
VEREDA	San Pedro Napoleón.
SISTEMA	Subterráneo.
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso pavimentada. Se localiza en un barrio de la cabecera municipal de Remedios. Los administradores manifestaron que La mina principal se encontraba derrumbada por lo que no fue posible ingresar a la labor. Se informó también que el acceso a la mina era por un inclinado y un desarrollo minero se realiza por una guía de 130 m de longitud. La labor visitada corresponde a un trabajo de desarrollo donde se estaba conformado un inclinado de acceso para luego conectarse con los trabajos principales de la mina.
FORMA DE EXPLOTACIÓN	Según lo informado los trabajos se realizan en dirección del rumbo de la veta mediante guías y tambores.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural.
SOSTENIMIENTO	En el trabajo El Palo. La roca de caja estaba muy meteorizada y alterada por lo que se presentaba inestabilidad, requiriendo sostenimiento con puertas alemanas cada metro y forro para control del material suelto.
FORMA DE ARRANQUE	En la labor El Palo se realizaba el arranque manual. Al momento no se contaba con frente de trabajo, se compra material para el beneficio de la planta.
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue manual, transporte con el personal minero, mediante uso de katangas (amarres para transportar los costales de material en la espada). En la mina principal se utiliza en malacate.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	La zona minera cuenta con una fuente hídrica San Pedro por lo que es necesario que se tomen medidas preventivas para evitar la contaminación.
No DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación y beneficio laboran generalmente siete operarios. Un técnico ambiental. Un jefe de proyecto o labores mineras.
PRODUCCIÓN REPORTADA EN CAMPO	10 a 70 ton/mes de mineral y estéril. 10 castellanos/tonelada.
BENEFICIO	En el área se encuentran una trituradora primaria, molinos de bolas procedo de amalgamación, mesa wifley.

5.2.2.5. MINA QUINTANA

La mina Quintana pertenece a la Empresa Quintana SAS. Cuenta con un departamento de exploración, un departamento de minería, una planta de beneficio y oficinas de administración. La explotación se localiza en el corregimiento de Santa Isabel del municipio de Remedios. Se desarrolla un trabajo que inició en labores artesanales y se han implementado la tecnificación e implementación de técnicas y prácticas mineras, de seguridad y ambientales.

La mina presenta una estructura principal con rumbo N-S a N5°W buzando entre 45 y 60°E. Es una estructura bandeada muy continúa, compuesta de cuarzo blanco lechoso con espesor variable promediando en 45 cm y espesor máximo de hasta 2,2 m con pinchamientos y bifurcaciones. El respaldo con la roca de caja de composición granodiorítica. La explotación cuenta con nueve (9) niveles de trabajo espaciados entre 40 y 45 m, con inclinación variable entre 30° y 45° a los cuales se accede a través de una cruzada de aproximadamente 120 m en dirección SW, e inclinados entre niveles.



Fotografía 5.9. Bocamina Quintana. Fuente: autores.



Fotografía 5.10. Galería. Fuente: autores.

Las características de la mina Quintana son las siguientes:

MINA	Mina tecnificada Quintana
VEREDA	Mina Quintana
SISTEMA	Subterráneo
LABORES DE DESARROLLO	Vía de acceso carretable
FORMA DE EXPLOTACIÓN	La mina cuenta con nueve (9) niveles de explotación. Se utilizan dos métodos de explotación Corte y relleno y Cámaras y Pilares. Las colas de planta y estériles van a la mina para rellenos de las cámaras explotadas. Los niveles se comunican por inclinados de transporte los cuales cuentan con escaleras y pasamanos.
FORMA DE VENTILACIÓN	Ventilación natural. se utilizan extractores para succión de aire viciado.
SOSTENIMIENTO	Sostenimiento natural y con Puerta Alemana, dependiendo de los requerimientos se encuentra en distancias entre 1.5m-2m. En las secciones donde la roca es competente el sostenimiento es natural.
FORMA DE ARRANQUE	Arranque con voladura
CARGUE Y TRANSPORTE	Cargue y transporte con winche. Transporte con malacate.
ASPECTOS AMBIENTALES MINEROS	Los estériles de explotación en su mayoría son utilizados como relleno al interior de la mina. El material sobrante de del beneficio se dispone en un relaveras. Se tiene programa de reforestación.
Nº DE PERSONAS VINCULADAS	En el frente de explotación y beneficio laboran generalmente tres turnos de trabajo de 8 horas donde laboran aproximadamente en cada turno 30 operario 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. Producción estimada al momento de la visita.
BENEFICIO	En el área se encuentran una trituradora primaria, zaranda, trituradora secundaria, molino continuo, celdas de flotación, cianuración.

5.2.3. MINERÍA ALUVIAL

Desde la población de Remedios hacia el sector denominado El Hundidor se debe atravesar la población de Segovia y el sector de La Cianurada, donde se evidencia que hubo intensa actividad minera artesanal informal de tipo aluvial en el cauce y orillas de la quebrada. En el trayecto de la quebrada se observaron algunas minidragas con canalones y algunas retroexcavadoras con zarandas mecánicas para separación del oro por concentración gravimétrica. Según lo informado por personal de la zona, esta actividad se redujo por los controles de las instituciones, sin embargo, los daños ambientales son evidentes y requerirán tiempo de autorrecuperación por parte de la fuente hídrica, así como acciones antrópicas de mitigación de los impactos ambientales.

En la rivera de la quebrada La Cianurada el desarrollo indiscriminado de la minería de aluvión ha dejado pasivos ambientales, debido a operaciones sin planeamiento técnico. Existen, además, innumerables trabajos en ambos lados de la quebrada que explotan venas, vetas de cuarzo y brechas mineralizadas de manera artesanal. En las fotografías 5.11. a 5.14. se observan los trabajos de minería aluvial.



Fotografía 5.11. Quebrada La Cianuradaa. Fuente: autores.



Fotografía 5.12. Extracción de material aluvial para obtención de oro. Fuente: autores.



Fotografía 5.13. Draga artesanal. Fuente: autores.



Fotografía 5.14. Dragado Quebrada La Cianurada. Fuente: autores.

5.3. ANÁLISIS MINERO

El análisis minero sintetiza las condiciones actuales de las minas cinco minas que se visitaron en el municipio de Remedios y, con base en esta caracterización, se presentan unas consideraciones técnicas que pueden servir en los procesos de planificación minera que se puedan desarrollar en las explotaciones de esta región. En el análisis minero se establecen consideraciones técnico-mineras para incluir y aplicar en el planeamiento minero con base en los resultados de la exploración geológica, acorde con los lineamientos de nacionales e internacionales, como de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Mineras (CRIRSCO).

La planificación minera determina qué mineral será extraído, acorde con la ley de corte, mediante la cual se determina la rentabilidad del proyecto minero. En la planificación se determinan variables del yacimiento mineral, geomecánica y estructura de las rocas, método de explotación, diseño y secuencia de explotación, así como estudio financiero.

El planeamiento minero se fundamenta en los estudios de exploración geológica, donde se determinaron aspectos como tipo de minerales, recursos, reservas, geometría del depósito, características como la cantidad y calidad del mineral económicamente explotable.

El planeamiento de la explotación se condensa en el documento *Programa de trabajos y obras*, donde se establecen los siguientes componentes: **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, 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.

Según lo observado en las MAPE Río Gold (El Hundidor), La Cirila, San Pedro N.º 2 y San Pedro-Napoleón, se estableció el análisis de los posibles métodos de explotación que pueden adaptarse a las condiciones de la zona. Generalmente, un pequeño minero primero explota la veta y posteriormente procede 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 presentan mineralización.

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.

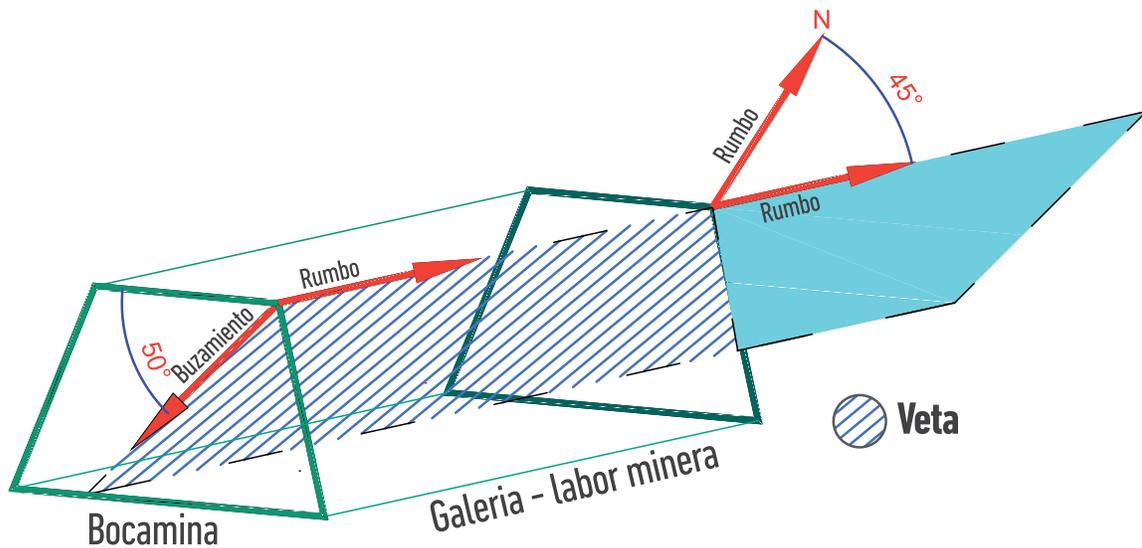
Las características geológicas de cada veta son las principales condiciones que determinan la elección del método de explotación, debido a que se debe estudiar de manera detallada la forma del yacimiento, el tipo de depósito, la estabilidad de las rocas, el rumbo, el buzamiento de la veta, la resistencia de la roca de caja y de la veta, al igual que el grosor. Debido a que no se cuenta con información detallada de las mineralizaciones, se tomaron datos puntuales y disponibles de la información levantada por los geólogos en campo.

Con el propósito de identificar posibles métodos de explotación, se realizó la proyección inferida de un punto de muestra de la veta y se infirió una longitud en rumbo y en buzamiento. Lo anterior debido a que no se cuenta con información a profundidad de exploración, como son las perforaciones para determinar la continuidad de la veta, la estructura y la geometría de la mineralización.

Con estos datos se establece 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 con base en métodos cualitativos como el sistema de Boschkov y Wrigth (1973).

En la siguiente figura 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.

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



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.

Para mejorar la producción en las pequeñas explotaciones se requiere contar con un planeamiento minero, el cual parte de la caracterización geológica del yacimiento mineral —el tamaño, la forma y el grado de mineralización—; posteriormente, se hace la definición del método de explotación con base en sus características geométricas —la orientación del yacimiento, el rumbo, el buzamiento, la resistencia de roca y los factores económicos que influyen sobre la ejecución del proyecto minero—.

Actualmente las pequeñas explotaciones y minas artesanales siguen la mineralización a través de guías y tambores o clavadas, y en labores antiguas ya intervenidas se desarrollan cruzadas para encontrar la veta más amplia.

Para seleccionar un método de explotación hay diversos sistemas cuantitativos, como cualitativos. 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 (figura 5.18.).

En el capítulo geológico se identificó que las minas objeto de este análisis presentan mineralizaciones de oro de tipo vetiformes, brechas hidrotermales y stockworks. “El estilo de mineralización predominante corresponde a vetas de cuarzo sulfuro (pirita, esfalerita, galena, en menor cantidad pirrotina) carbonatos, vetas de cuarzo blanco masivas. Las vetas se encuentran encajadas dentro o en la periferia de rocas del batolito Jurásico calco-alcalino de Segovia (cuarzo diorita a tonalita).

Los espesores de las vetas oscilan entre 0,15 y 3 m, con formas tabulares (metalogénesis y geología estructural de este estudio).

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 Handbook 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		
				NA	Fuerte	Hundimiento controlado Subniveles Corte y relleno Combinación de métodos		
				Masivos	NA	Débil	Fuerte o débil	Subniveles Bloques -camaras Cámaras con sostenimiento en cuadros Combinación de métodos

Las características metalogenéticas de explotaciones tradicionales y artesanales en los sectores definidos para este trabajo se presentan en la figura 5.19.

Figura 5.19. Características metalogenéticas de explotaciones tradicionales y artesanales. Fuente: Metalogénesis y geología estructural este estudio.

TIPO DE VETAS	SECTOR DISTRITO MINERO SEGOVIA-REMEDIOS	MINAS
Venas de cuarzo masivas (con porcentajes 48%-70%) ocasionalmente fracturados con pirita 26% de grano grueso en bandas y manchas. Relleno de vetillas de carbonato con pirita (4,5%) y calcopirita (1,8 %) cortando la veta principal.	Nor este	Sectores de minas artesanales como Jesús de la Buena Esperanza, El Hundidor, El trabajo
Venas de cuarzo (40 y- 70 %), de textura masiva asociados a pirita con proporciones variables entre 0.3% y 48%.	Central	Sectores de minas artesanales 30 Granos, La Primavera, Los Pujidos, VegaGold, San Pedro y La Italia.
Vena de cuarzo de grano grueso con textura masiva y en peine asociado con pirita (20,1 %).	Occidental	Mina artesanal La Cirila

En general los sectores visitados presentan estructuras asociadas a los tres sistemas principales de fracturamiento con buzamientos bajos entre los 35° y 50° de inclinación al este, y espesores variables entre 0,15 y 3 m.

En síntesis, las mineralizaciones identificadas en el estudio presentaron en general características de venas delgadas y respaldos competentes, por lo que se puede pensar en métodos de explotación como corte y relleno, cámaras y pilares, y cámaras con sostenimiento en cuadros y subniveles.

Las diferentes características de las minas estudiadas requieren que se realicen estudios específicos para conocer el comportamiento de las vetas y de las rocas encajantes. Por lo cual, en los programas de trabajos y obras que se realicen en cada uno de los subcontratos y en los proyectos que se ejecuten, es importante elaborar un análisis geológico detallado y un análisis de alternativas de métodos de explotación donde se identifiquen las ventajas y desventajas. Así se podrá escoger el método de explotación que más se acomode a las características del depósito minero y a las condiciones económicas de las personas que inviertan en la explotación, permitiendo una buena recuperación del mineral tanto en la parte productiva como en la recuperación económica de la inversión. Lo anterior, teniendo en cuenta además los aspectos ambientales, de manera que se dé un buen manejo y una mitigación a las posibles afectaciones que se presenten en los recursos de agua, suelo, flora y fauna. Esto es importante debido a que las explotaciones mineras deben

Figura 5.20. Análisis inferido de posibles métodos de explotación que se podrían implementar en las minas artesanales. 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	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales. Cámaras y pilares.
		Débil o fuerte	Débil	Cámaras en subniveles.
Venas delgadas	Inclinado	Débil o fuerte	Débil o fuerte	Extracción selectiva (resuing).
Venas gruesas	Horizontal	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas con pilares ocasionales. Cámaras y pilares.
	Inclinado	Fuerte	Fuerte	Cámaras abiertas. Corte y relleno.
		Débil	Fuerte	Cámaras con sostenimiento cuadrado.
	Inclinado	Débil	Débil	Cámaras con sostenimiento en cuadros.

procurar ser amigables con el medio ambiente, tanto en las explotaciones en pequeña escala como en las de mayor escala.

Figura 5.21. Rumbo y Buzamiento de un punto de veta pequeñas explotaciones mineras visitadas. Fuente: autores.

MINA	ALTITUD	RUMBO	BUZAMIENTO	ANCHO	ROCA DE CAJA	MINERALIZACIÓN
La Ceiba	259	N5°E	50° E	0,5-1M	La roca de caja es una brecha volcanosedimentaria matriz lodolita	Brecha volcanoclastica con matriz de lodolita y clastos de vetas de cuarzo y lodolitas
Jesús de la Buena Esperanza	482	N-S	60°E	Vetillas 0,05 M de espesor Ancho 0,5 -1M	Roca caja lodolitas recristalizadas con un cuerpo intrusivo de composición acida a intermedia de textura porfirítica	Venas paralelas y en rejilla de cuarzo, sulfuro (Py, Cpy, Sp), carbonatos
El Hundidor	270	N80°W	30°E	0.15M	Lodolitas en capas medias con tendencia general NS y buzamientos entre 20 E y 30°E al este	Veta de cuarzo blanco lechoso
Primavera	698	N10°W	45°E	0.4 - 3m	cuerpo intrusivo granodiorítico – tonalítico y cerca de la superficie lodolitas fuertemente meteorizadas	Veta de cuarzo lechoso de textura bandeada.
Vega gold veta en nivel 6 (más profundo)	675	0.50m y	N30W	buzamiento vertical	porfirítica tipo dolerita	veta de cuarzo lechoso y sulfuros Pirita <3% y arsenopirita >2%
Vega gold nivel 5: dos estructuras una sub-vertical (la principal)	N20E	N30W	90 35 -45 E			
30 granos	636	N40W	75° E	0,2m y 1.0m regularmente son continuos	Los filones se alojan en rocas cuarzdioríticas de grano grueso	filones de cuarzo con bandas y agregados de pirita con cantidades menores de galena, esfalerita y calcopirita
Pujidos	652	N30°E	50°SW	Espesor promedio de 0.10- de 0.6 metros	rocas de composición granodiorítica en contactos fallados e intrusivos con diques aplíticos de color crema verdoso	cuarzo, carbonato con texturas bandeadas y de espacios abiertos
Cirila	674	N-S N10W	35w	1-2 m N30-40E .	Rocas ígneas granitoides y rocas metamórficas gnéicas	Zona de cizalla donde se presenta una veta multifratu-rada de cuarzo, carbonato y sulfuros en baja proporción
San Pedro No 2	618	El rumbo	40°E	0.50-0.60m de la estructura es N	La roca de caja de composición de granítica	Cuarzo blanco lechoso con pirita hasta 2% y trazas de galena y esfalerita.
San Pedro Napoleón	600	N42°E	66°	0.10-0.20m	La roca de caja saprolitizada es un granito con con manganeso, textura fanerítica de grano grueso	Pequeña estructura (20cm) de cuarzo oxidada
Quintana	689	Rumbo N-S a N5W	45° y 60 E	45 cm y espesor máximo de hasta 2,2 m con pinchamientos y bifurcaciones	El respaldo con la roca de caja de composición granodiorítica	Veta cuarzo blanco lechoso. muy continúa,

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 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 5.22. Método de explotación proyectados en vetas inferidas como delgadas de las minas visitadas del análisis minero. Fuente: autores.

MINA	RUMBO	BUZAMIENTO	ANCHO	ROCA DE CAJA	MINERALIZACIÓN	ESTIMACIÓN DE DUREZA*	MÉTODO DE EXPLOTACIÓN SUGERIDO
El Hundidor	N80°W	30°E	0.15 m	lodolitas en capas medias con tendencia general NS y buzamientos entre 20 E y 30°E al este.	Veta de cuarzo blanco lechoso.	Roca débil.	Cámaras con subniveles, extracción selectiva.
Cirila	N-S /N10W N30-40E	35° w	1-2 m	rocas ígneas granitoides y rocas metamórficas gnéissicas.	Zona de cizalla donde se presenta una veta multifracturada de cuarzo, carbonato y sulfuros en baja proporción.	Roca moderadamente resistente, se presentan puntos de fallamiento puntos débiles.	Cámaras y pilares Cámaras con subniveles.
San Pedro No 2	Norte	40°E	0.50-0.60 m	La roca de caja de composición de granítica.	Cuarzo blanco lechoso con pirita hasta 2% y trazas de galena y esfalerita.	Roca moderadamente resistente con algunos puntos de falla que requiere sostenimiento.	Cámaras y pilares Corte y relleno.
San Pedro Napoleón	N42°E	66°	0.10-0.20 m	la roca de caja saprolitizada es un granito con con manganeso, textura fanerítica de grano grueso.	Pequeña estructura (20cm) de cuarzo oxidada.	Roca débil en el primer nivel superficial de la conformación de la mina.	Camaras con sostenimiento en cuadros. Corte y relleno.
Quintana	N-S a N5W	45° y 60 E	45 cm	El respaldo con la roca de caja de composición granodiorítica.	Veta cuarzo blanco lechoso. muy continúa.	Roca moderadamente resistente	Cámaras y pilares Corte y relleno.

*Se requiere realizar análisis de laboratorio de la compresión uniaxial

En síntesis:

las mineralizaciones identificadas en el estudio presentaron en general características de venas angostas (<3m) y respaldos competentes por lo que se puede pensar en métodos de explotación como resuing o explotación selectiva que aplican actualmente los mineros y otros métodos como corte con relleno, cámaras con pilares y subniveles. Las metodologías deberán evaluarse para cada mina y se seleccionará finalmente la que ofrezca mejores garantías para la explotación.

En la mina El Hundidor no se había iniciado la etapa de explotación y en la mina San Pedro Napoleón no fue posible visitar el frente de trabajo debido a que se encontraba derrumbado el acceso principal. En la mina La Cirila se realizaba una explotación con el avance en guías y sobre guías siguiendo el rumbo de la veta y también tambores según las variaciones de dirección de la veta. En la Mina San Pedro 2. La explotación se realizaba con avance en guía y se construyeron inclinados para comunicar los niveles de trabajo y transportar el mineral. En la Mina Quintana la explotación se realiza en 9 niveles de trabajo y el método de explotación es cámaras con pilares y por corte y relleno, en el cual se utiliza para el relleno los materiales estériles de la explotación y las colas del beneficio del oro mezcladas con concreto para el relleno estabilizado de las cámaras explotadas, las cuales servirán de soporte para recuperar mineral en áreas no explotadas. Esta mina es una de las más tecnificadas de la región debido a que ha implementado un adecuado método de explotación, adicionalmente manejan control de caudal de ventilación y de gases contaminantes. En cada nivel y área de trabajo se cuenta con tableros de registro de gases.

El método de explotación por corte y relleno y cámaras y pilares se ajusta 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 que sea adaptable a las necesidades de mejoramiento de la producción, para garantizar la ali-

mentación permanente de las plantas de beneficio. Por otra parte se incrementan los niveles de producción debido a la tecnificación de la explotación con la implementación de mejores prácticas para la recuperación de mineral, el cual actualmente se va explotando en los frentes de las guías o clavadas en avance, quedando entre los niveles de las guías 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.

5.3.1.1. 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 mínimos que hagan rentable la actividad. El tenor del mineral es un factor importante para obtener beneficio económico o generar pérdidas. Para definir el punto de equilibrio se utiliza la ley 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 en Franco, Velilla, 2014). Todo lo que esté por debajo de este valor es tratado como estéril y lo que esté por encima de este como mineral útil es aprovechable. Es decir, donde los ingresos obtenidos por el producto igualan a los costos de extracción de éste, es lo que se conoce como punto de equilibrio. (Franco, Velilla, 2014). Esta información se obtiene con estudios detallados geológicos-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 devuelve 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, forma de la extracción, malla de voladura.

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 está incluidos en éste. 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:

Calculo de dilución en frente de explotación Mina La Cirila

Para el cálculo de la dilución en el bloque de trabajo se siguió la metodología presentada por el geólogo Hernán Ortiz Delgado en el libro Geología Minera del oro de Veta 1991.

Se realiza un análisis de la dilución externa en un frente de explotación de la Mina La Cirila, donde se toma para el ejemplo un bloque conforme al avance de explotación diario. Cada que el frente de trabajo avanza o se realiza una voladura se debería realizar el registro de la dilución y 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 la mina es decir si el bloque que se está explotando es rentable o no y las consideraciones que deberá tomar los geólogos, ingenieros de minas, economistas e inversionistas sobre la rentabilidad de la explotación.

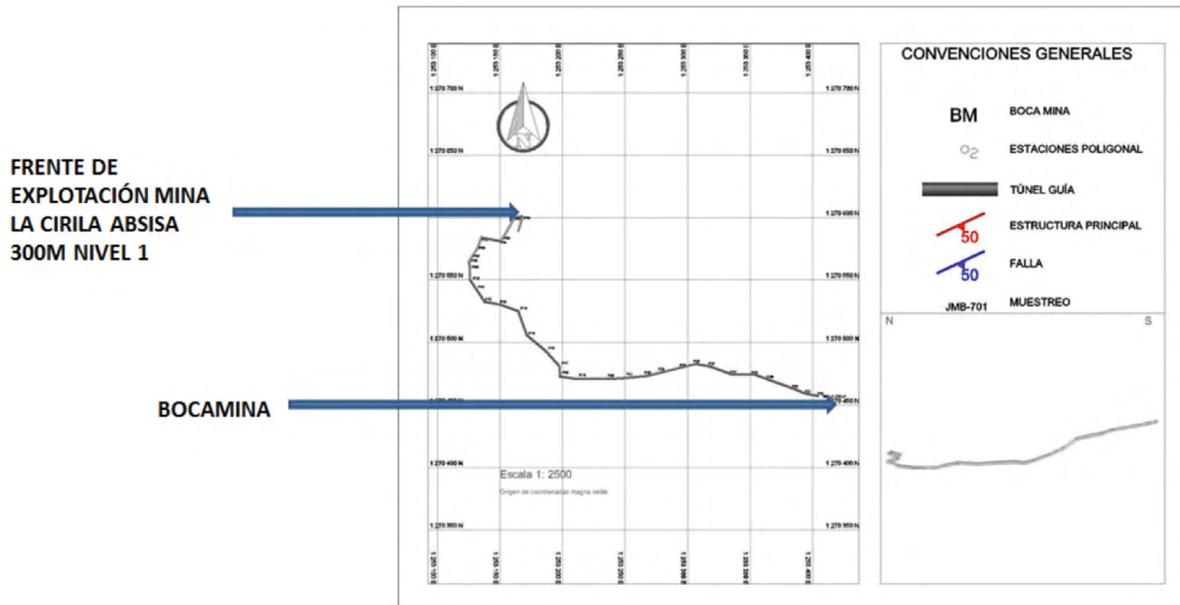
Estos análisis se deberían realizar a medida que se realiza el avance de la explotación, es decir cada que se realizan labores de perforación y voladuras en el frente donde se extrae el mineral que va a la planta de beneficio.

Analisis de dilucion mina la cirila

En la Mina La Cirila, se realizó muestreo en un frente de explotación con avance de 1m y ancho de 1,5m. Para el análisis se presenta los siguientes valores:

Bloque de muestra 1: frente de explotación abscisa 300m nivel 1.

Figura 5.23. Localización Bloque de muestra nº 1. Fuente: autores.



El bloque que se analiza tiene las siguientes dimensiones:

Corte o ancho de bloque: 1.50 m

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

Ancho de veta: 1.0 m.

Roca de caja: corresponde a un neis biotítico con hornblenda.

Veta: vena de cuarzo de grano grueso con textura masiva y en peine, asociado con pirita (20,1 %), arsenopirita (4 %), calcopirita (1,3 %), esfalerita (1,3 %), pirrotina (0,7 %), galena (~1,7 %) y oro (0,2 %). Los análisis de microquímica mineral revelan que la concentración de oro y plata es similar, el primer elemento está entre 45,76 y 51,23 wt% y el segundo entre 47,46 y 51,98 wt%, lo que indica un oro electrum.

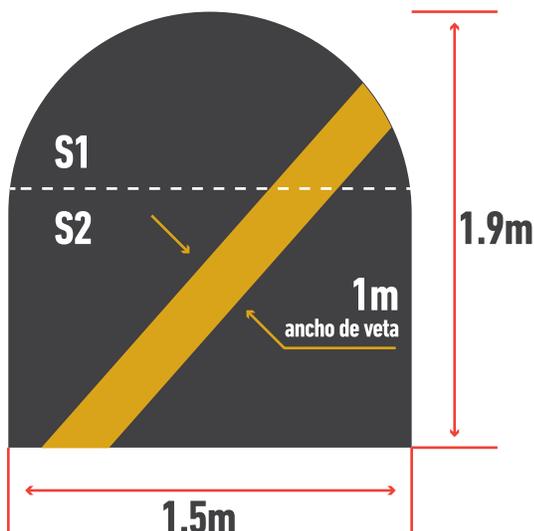
a) Dimensiones frente de explotación:

Altura: 1.9m

Ancho-corte:1.5m

Ancho de la veta en el frente de trabajo: 1m

Figura 5.24. Frente de explotación. Ancho de corte y ancho de veta. Fuente: autores.



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 1.5m x 1m = 1.5m²

c) Área proyectada. Se realiza corrección del área debido a la inclinación de la veta de la siguiente manera:
 Área Horizontal proyectada: Buzamiento > 45° se proyecta en plano vertical $A' = A \cdot \sin(B)$
 Buzamiento < 45° se proyecta en plano horizontal $A' = A \cdot \cos(B)$

Buzamiento 35°

$$A' = 1.5m^2 \cdot 0.819152 = 1.2287m^2$$

Área proyectada (A') = área horizontal m² x cos (buzamiento)

$$A' = 1.5m^2 \cdot 0.819152 = 1.2287 m^2$$

d) Ancho de veta promedio : 1m

e) Metros cúbicos de veta = Σ ancho de veta x Σ área

verdadera

$$\text{Metros cúbicos} = 1 \text{ m} \times 1,2287 \text{ m}^2 = 1,2287 \text{ m}^3$$

f) Toneladas de mineral en veta:

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

$$\text{Toneladas de mineral en veta (Tmv)} = 1,2287 \text{ m}^3 \times 2,69 \text{ t/m}^3 = 3,31 \text{ t}$$

g) Valores de oro y plata en veta: se registran los valores de cada muestra según el avance, (estos datos deberían ser la sumatoria de varios muestreos para este ejemplo solo se toma un dato del frente analizado). Resultado laboratorio SGC de tenor en muestra de oro de veta 3,96 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

$$\text{Gramos de oro} = 3,31 \text{ t} \times 3,96 \text{ g/t} = 13,1076 \text{ g}$$

i) Ancho promedio de veta

Ancho promedio de veta = (Suma total de metros cúbicos)/(Suma total de área verdadera (A'))

$$\text{Suma total de metros cúbicos} = 1,2287 \text{ m}^3$$

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

$$\cos(\text{ángulo de buzamiento}) = \cos(35^\circ) = 0,819152$$

$$\text{Área horizontal} = 1,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Área verdadera (A')} = (1,5 \text{ m}^2)/0,819152 = 1,8312 \text{ m}^2$$

$$\text{Luego, Ancho promedio de veta} = (1,2287 \text{ m}^3)/(1,8312 \text{ m}^2) = 0,6709 \text{ m}$$

J) Valor promedio del tenor de oro y plata.

Valor promedio de tenor de oro y plata = (suma total de gramos de oro y plata)/(suma total de toneladas de mineral en veta)

También se obtiene aplicando:

Valor promedio de tenor de oro y plata = (total de gramos de oro y plata (g))/(suma total de ancho de veta (m))

En este caso, se aplicará la primera ecuación.

$$\text{Valor promedio de tenor de oro} = (13,1076 \text{ g})/(3,31 \text{ t})$$

$$\text{Valor promedio de tenor de oro} = 3,96 \text{ g/t}$$

k) Onzas de Oro y Plata.

Onzas de oro y plata = (total de gramos de oro)/(onza troy)

$$1 \text{ onza troy} = 31,1035 \text{ g}$$

$$\text{Onzas de oro} = (13,1076 \text{ g})/(31,1035 \text{ g/onza troy})$$

$$\text{Onzas de oro} = 0,4214 \text{ onza troy}$$

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 m³, un metro cubico (1 m³) 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 1,50 m y el ancho de veta es de 1 m entonces la dilución es de 0,50 m.

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 formulas de calcular el factor de dilución entre estas se encuentran las siguientes:

$$\text{Dilución} = 0,50 \text{ m}$$

Factor de dilucion del tonelaje FD = (ancho de corte x100%)/(ancho de veta promedio)
FDtonelaje = (1.5 m x 100%)/0,6709m
FDtonelaje = 223,58%
FDtonelaje = 2.2358

Otra fórmula es:

Dilución = (toneladas esteril)/(toneladas de oro+toneladas de esteril) x 100%
Dilución= 0,5m/0,5m + 1m x 100% = 33,3%

ñ) Factor de dilución de los valores de tenor.

FDvalores = reciproco matemático de FD Tonelaje = 1/FDtonelaje
FDvalores = 1/2,2358 = 0,447

o) Toneladas de mineral explotable (TME)

Toneladas de mineral explotable (TME) = toneladas métricas de mineral en veta(Tmv) x FDtonelaje

Toneladas métricas de mineral en veta : 3,31 ton

Factor de dilución del tonelaje: 2,2358

Toneladas de mineral explotable = reserva minera con dilución

TME = 7,4 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: 3,96 gr/ton

Factor de dilución de los valores FDv = 0,447

Valores Diluidos o tenores diluidos oro (Au)

Vd (oro)=3,96gr/ton x 0,447= 1,77 gr/ton

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

Toneladas de mineral explotable (TME)= 7,4 t reserva minera con dilución

Valores Diluidos o tenores diluidos oro (Vd) = 1,77 gr/t

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

Re = 7,4 t x 1,77 gr/t = 13,098 gr oro (Au)

Reserva minera (Re): 13,098 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/onzatroy Au

Reserva minera: 0,4211 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: 7,4 Ton

toneladas de pérdidas en la explotación: 20%x TME

toneladas de perdidas en la explotación=20% x 7,4 t=1,48 t

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

Ton mineral explotable recuperable de la mina = 5,92 ton

Reserva minera recuperable=ton mineral explotable recuperable x valores diluidos

Valores Diluidos o tenores diluidos Au (Vd) = 1,77 gr/ton

Reserva minera recuperable (Rer) = 5,92 t x 1,77 gr/t Au = 10,4784gr = 0,336 onzastroy Au

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.

El análisis anterior permite concluir que:

En el ejemplo de la mina La Cirira, explotando el ancho del frente en estudio, se obtuvo que para un metro de avance en el frente de explotación de la abscisa 300m nivel 1, se presentó una dilución de 0.50m con una veta de ancho de 1m y 1 m de avance donde obtiene 5,92 ton de mineral explotable-recuperable (33,3%) con un tenor diluido de 1,77 gr/ton, es decir el frente de trabajo produce 10,4784gr de Au.

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 y calcular la dilución para identificar el comportamiento de la mineralización y la también 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, 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.

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.

5.3.2 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.

Las minas visitadas en el Municipio de Remedios 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 alemana.

Los tipos de sostenimiento y las rocas de respaldo de las minas visitadas se muestran en la figura 5.25.

Figura 5.25. Sostenimiento utilizado en las minas visitadas. Fuente: autores.

MINA	ROCA DE CAJA	ESTIMACIÓN EN TERRENO DE LA RESISTENCIA*	SOSTENIMIENTO UTILIZADO ACTUALMENTE
El Hundidor	Lodolitas en capas medias con tendencia general NS y buzamientos entre 20°E y 30°E al este.	Roca débil.	Cuadros cada 1.0 m con forro.
Cirila	rocas ígneas granitoides y rocas metamórficas gnéisicas.	Roca moderadamente resistente, se presentan puntos de fallamiento y puntos débiles.	Sostenimiento natural tipo bóveda y en algunos sectores puertas alemanas.
San Pedro nº 2	La roca de caja de composición de granítica.	Roca moderadamente resistente con algunos puntos de falla que requiere sostenimiento.	Sostenimiento natural tipo bóveda.
San Pedro Napoleón. Labor El Palo	La roca de caja saprolitizada es un granito con manganeso, textura fanerítica de grano grueso.	Roca débil en el primer nivel superficial de la conformación de la mina.	Cuadros cada 1.0 m con forro.
Quintana	El respaldo con la roca de caja de composición granodiorítica	Roca moderadamente resistente	Pilares en roca estéril Sostenimiento natural tipo bóveda y algunos puntos con puertas alemanas Rellenos de estériles con mezcla de cemento.

*Se requiere realizar análisis de laboratorio de la compresión uniaxial

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

Características de Sostenimiento Mina La Cirila

La característica de resistencia de la roca de respaldo y el bajo fracturamiento de la roca de respaldos ha permitido que durante años se haya podido realizar en la Mina La Cirila las labores de explotación con sostenimiento natural. En el rápido recorrido que se realizó se identificaron de manera preliminar algunos puntos de fracturamiento por lineamientos de falla, presencia de agua y alteración de la roca.

En la labor minera La Cirila se identificó que el sostenimiento principalmente es de tipo natural con forma de bóveda. 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

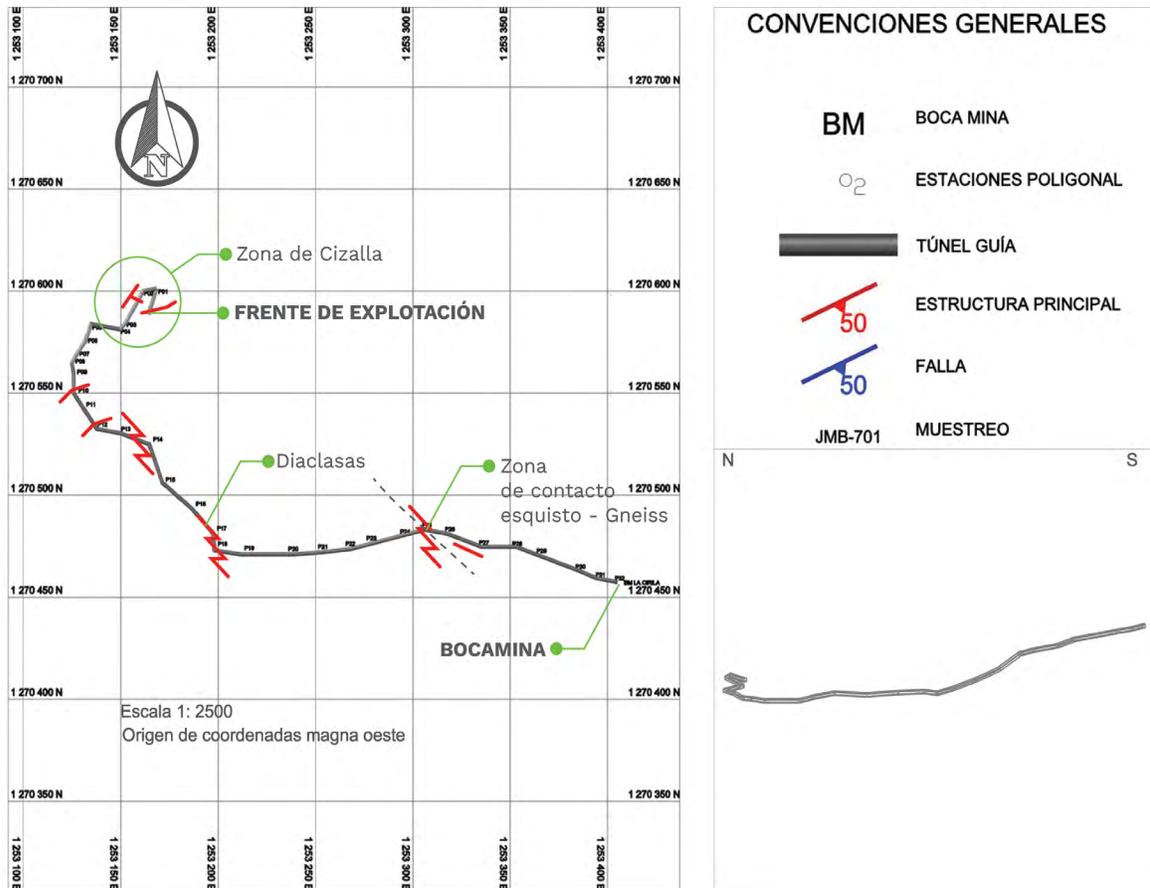
Las rocas de respaldos de la labor minera principal en guía, corresponden a un neiss biotítico con hornblenda. Las características de esta roca son las siguientes:

La densidad de 2.617 g/cm³.

Las rocas como el neiss presentan, generalmente, un índice de carga puntual >10 Mpa y resistencia uniaxial >250Mpa. El neiss está clasificado como una roca extremadamente resistente, una roca dura según la escala de estimación en terreno de la resistencia en Compresión uniaxial de Hoek y Brown.

En la guía principal el sostenimiento se realiza de manera natural, sin embargo, se identificaron puntos de fractura de la roca los cuales se localizan en las zonas de fallamiento de la roca granodiorítica y también de metamorfismo, las cuales de manera general se encuentran representados en la figura siguiente donde se demarcaron tres puntos de mayor afectación.

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



Los puntos que presentan cizallamiento o fracturamientos se identifican las siguientes fotografías.



Como en el caso de la Mina La Cirila, 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 y la geo mecánica de las rocas.

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

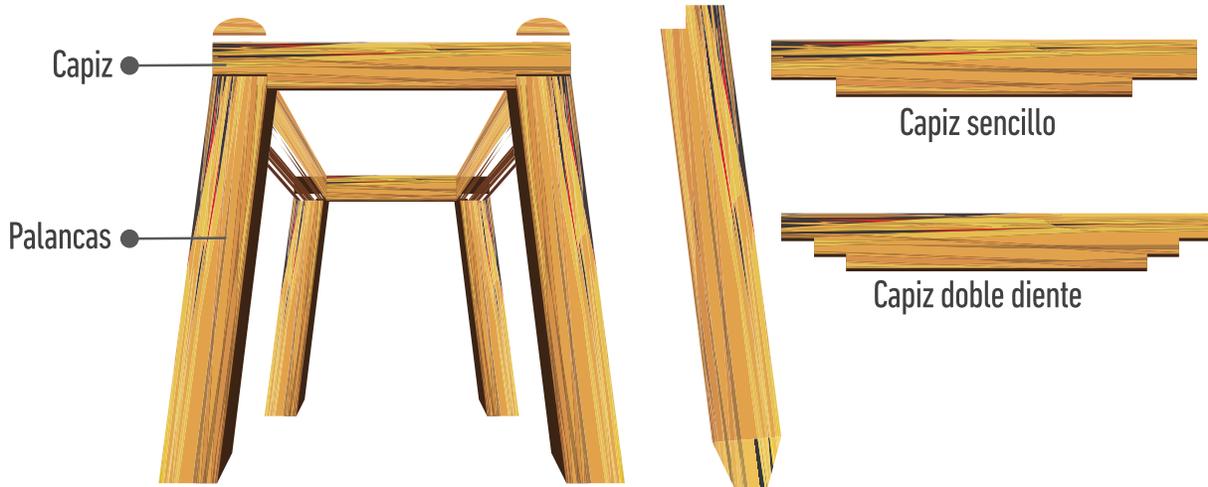
- El sostenimiento de las obras subterráneas se hace necesario para controlar la estabilidad de las excavaciones y para mejorar la seguridad del personal que trabaja o circula por ellas.
- El buen sostenimiento es básico para garantizar el tránsito de personal, equipos y el desarrollo, así como para la preparación y la operación de la explotación.
- Un buen sostenimiento permite el desarrollo y operación segura de la explotación.
- Cuando el sostenimiento es natural se deben realizar inspecciones diarias del comportamiento de la roca para identificar zonas de debilidad o fractura donde sea 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 ello 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, los cuales pueden ser sostenimiento natural o artificial con puertas de madera, arcos de acero y 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. Esto 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.
- Las dimensiones de las galerías serán construidas con áreas que permitan, en las labores de transporte, la libre circulación de personal, máquinas y herramientas. En condiciones normales las excavaciones mineras tendrán 3 m² y una altura libre de 1,80 m (Decreto 1886 de 2015).
- 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 (figura 5.22.), compuestas por tres maderas resistentes que forman un trapecio; las partes de la puerta son el capiz que se insta-

la 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 cortes en boca de pescado. Las cuñas son troncos pequeños de madera que se utilizan para ajustar las puertas con la roca. El forro es la madera utilizada entre la puerta y la roca para evitar caída de material.

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



5.3.3. 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 se suelen emplear tela de costal o tubos de PVC; también las mangueras se pueden encontrar deterioradas, lo que hace que se ocasionen pérdidas de caudal de aire, el cual puede resultar insuficiente para garantizar la buena atmosfera al interior de la mina. Por ello es importante contar con un termoanemómetro (figura 5.13.) 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 circule 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. De esta forma los volúmenes mínimos de caudal serán:

- Excavaciones mineras 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 deben 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 (fotografía 5.14.) 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.

Figura 5.28. Temperatura efectiva te (°C) vs tiempo de permanencia (horas). 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 5.13. Termómetro anemómetro. 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 5.14. 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 emanación de gase el equipo emite una señal óptica y acústica de alarma para que se tomen las medidas correctivas correspondientes.

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:

$$te = 0.7 th + 0.3 ts - V$$

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 presentados en la figura 5.28.

5.3.4. MINERO-AMBIENTALES

En las explotaciones mineras artesanales visitadas en el Municipio de Remedios 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.

En los puntos mineros visitados del Municipio de Remedios, se identificó que las explotaciones tienen tendencia a desarrollarse cercanas a fuentes hídricas. Es importante recordar que las fuentes hídricas cuentan

con una franja de protección generalmente de 30 m, por lo cual es importante prevenir la construcción de labores mineras al interior de la franja de protección como medida de prevención de impactos ambientales. Otro aspecto que es de tener en cuenta es que la actividad minera desarrollada cerca de las fuentes hídricas presentara altos niveles de agua freática y dependiendo de la resistencia y permeabilidad de la roca afectaciones en la estabilidad y en el sostenimiento. También se requerirá bombeo continuo de agua que generará altos costos en energía o combustible.

Las aguas efluentes de las minas en ocasiones son constantes en otras intermitentes, o no presentan. 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 fisicoquímicas 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.

A pesar de que las fuentes hídricas tienen una alta capacidad de auto regulación y auto recuperación, en la quebrada La Cianurada el impacto visual de las actividades mineras intensas que fueron desarrolladas anteriormente en esta zona hace pensar en la implementación de proyectos y medidas de recuperación geomorfológica y ambiental para la cuenca, para contribuir al mejoramiento de las condiciones naturales de este ecosistema.

5.4. CONCLUSIONES EN ASPECTOS MINEROS

- Las minas artesanales (MAPE) de veta que fueron objeto de análisis desde el punto de vista minero en el Municipio de Remedios Antioquia fueron Mina Rio Gold (EL Hundidor), Mina La Cirila, Mina San Pedro No 2, Mina San Pedro Napoleón y la Mina tecnificada Quintana.
- Las minas artesanales en pequeña escala San Pedro 2 y La Cirila desarrollan actualmente la explotación con guías y tambores o clavadas. 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 y subniveles con tambores e inclinados, sin desarrollar un método de explotación específico.
- En la Mina Quintana se ha implementado un proceso de tecnificación de la actividad, actualmente se desarrollan los métodos de explotación cámaras con pilares y corte con relleno. Estos métodos se aplican según el comportamiento de la mineralización y con base en las metas de producción.
- En las minas artesanales de análisis y Mina tecnificada Quintana, seleccionadas presentan mineralizaciones tipo vetiformes, brechas hidrotermales y stockworks, de cuarzo sulfuro (pirita, esfalerita, galena, en menor cantidad pirrotina) carbonatos, vetas de cuarzo blanco masivas, los espesores de las vetas oscilan entre 0.15 hasta de 3 metros (vetas delgadas). Presentan estructuras asociadas a los tres sistemas principales de fracturamiento con buzamientos bajos entre los 35° y 50° de inclinación al este y rocas encajantes moderadamente resistentes como neiss, granodioritas, tonalitas.
- Se realizó el análisis cualitativo para selección del método de explotación utilizando el Sistema de Boshkov y Wright (1973) donde se tomaron datos puntuales de la potencia de las vetas, inclinación de veta y resistencia del macizo rocoso, estos datos puntuales se proyectaron para realizar el ejercicio que debe hacerse en realidad con datos detallados de la mineralización. Los datos puntuales de las mineralizaciones identificadas en el estudio se caracterizaron por venas angostas (<3m) y respaldos competentes por lo que se puede pensar en métodos de explotación como corte con relleno, cámaras con pilares, y subniveles. 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 minas 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. La explotación selectiva de mineral que realizan los mineros artesanales les permite obtener ganancias con una producción baja.
- 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 realizado en La Mina La Cirila para un metro de avance en el frente de explotación de la abscisa 300m nivel 1, se presentó una dilución de 0.50m (33,3%) con un ancho del frente de explotación de 1,5m, donde obtuvo como resultado 5,92 ton de mineral explotable-recuperable con un tenor diluido de 1,77 gr/ton, es decir el frente de trabajo produce 10,4784gr de Au. Es importante determinar este factor para establecer las acciones de control tanto en el método de explotación, voladura y 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.
- 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 y calcular la dilución para identificar el comportamiento de la mineralización y la también analizar si los costos de producción vs los ingresos obtenidos se encuentran generando ganancias.
- 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.

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.

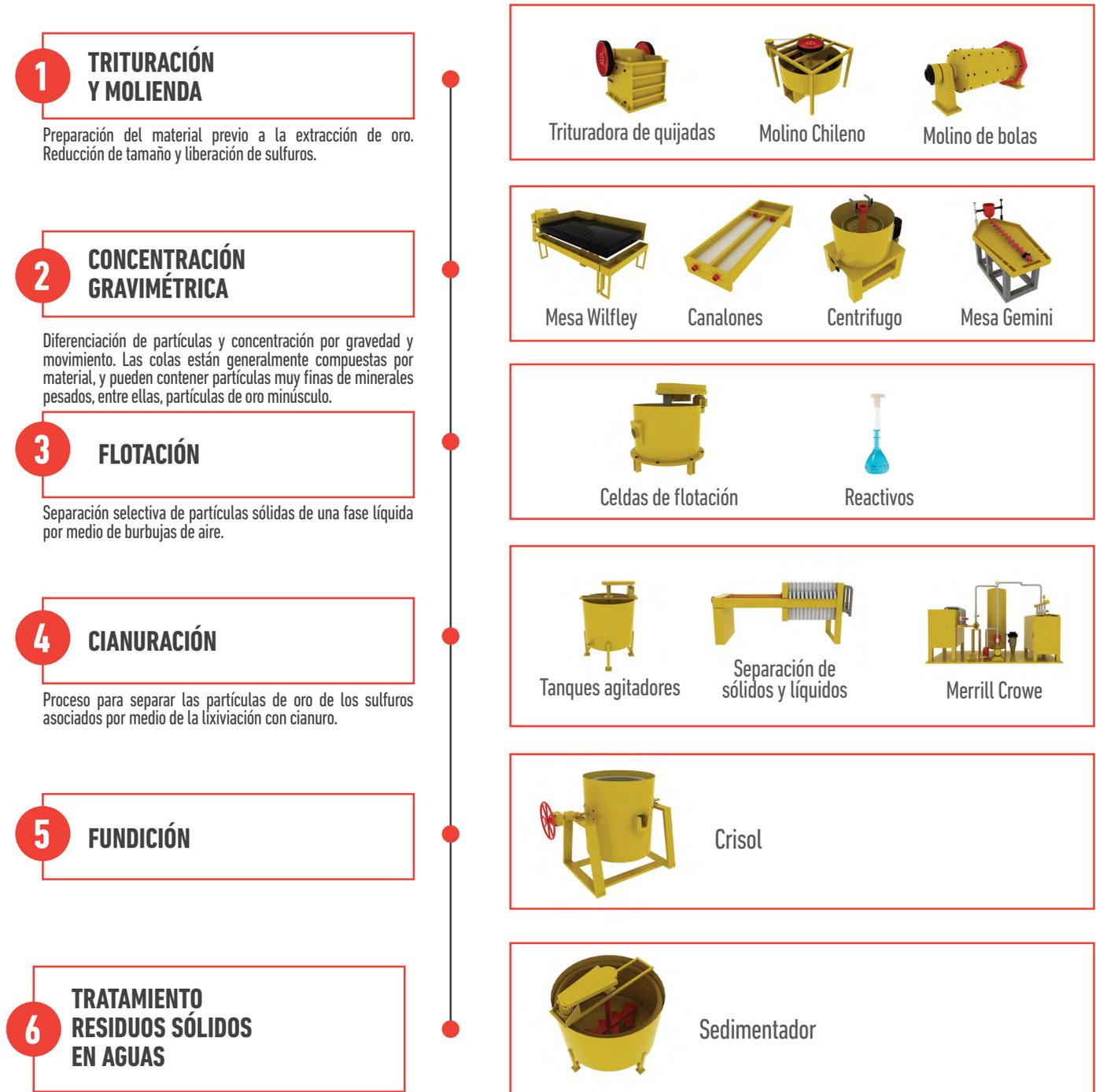
Círculo de planta de beneficio en Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por Wilmar Montenegro, Servicio Geológico Colombiano



6.1. FUNDAMENTOS TÉCNICOS DEL PROCESO DE BENEFICIO METALÚRGICO EN PLANTA

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 1.000 t/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.

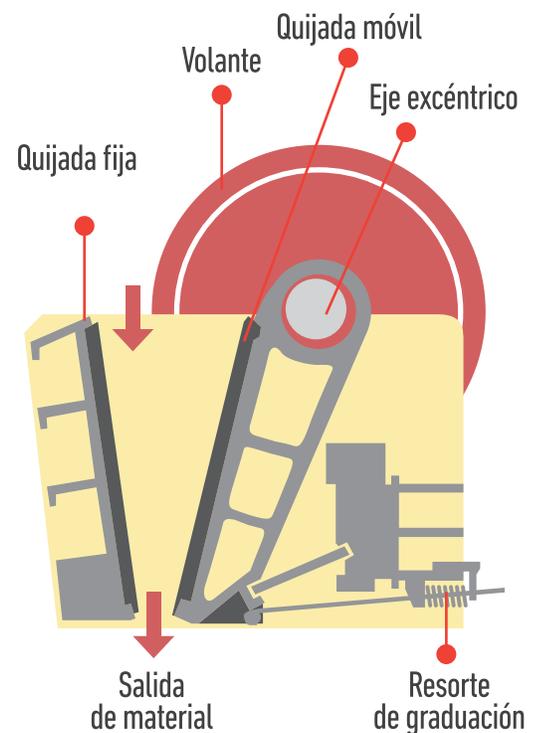
En la trituradora de quijadas, el mineral se fragmenta mediante compresión, en combinación con el clivaje, entre las superficies de las quijadas fija y móvil. La quijada móvil se aproxima (durante la marcha de trabajo) o se aleja (durante la marcha en vacío) de la quijada fija, al rotar el árbol excéntrico.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

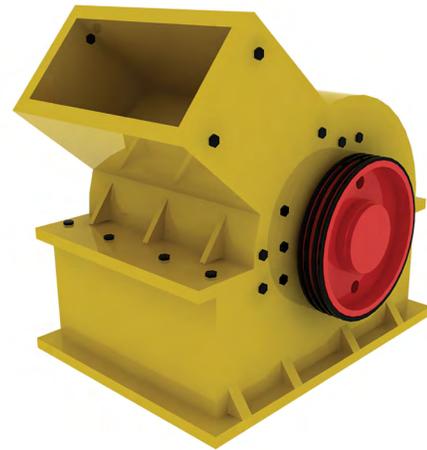
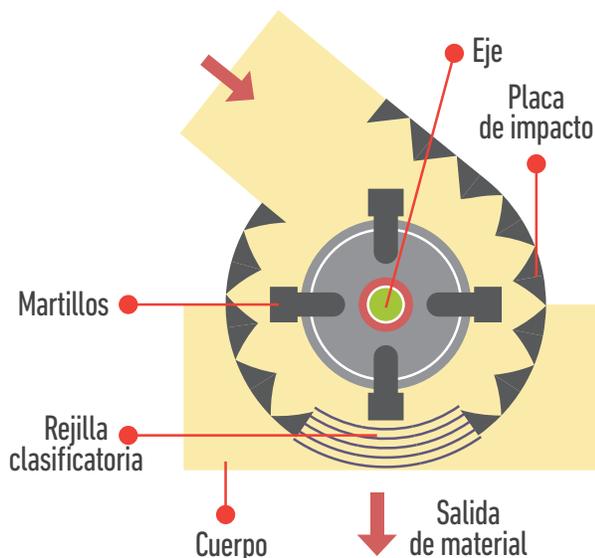


Figura 6.4. Diagrama de funcionamiento de la trituradora de martillos y tamaños de trituradoras de martillos, potencia nominal y capacidades aproximadas (Denver, 1954). Fuente: autores.

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-

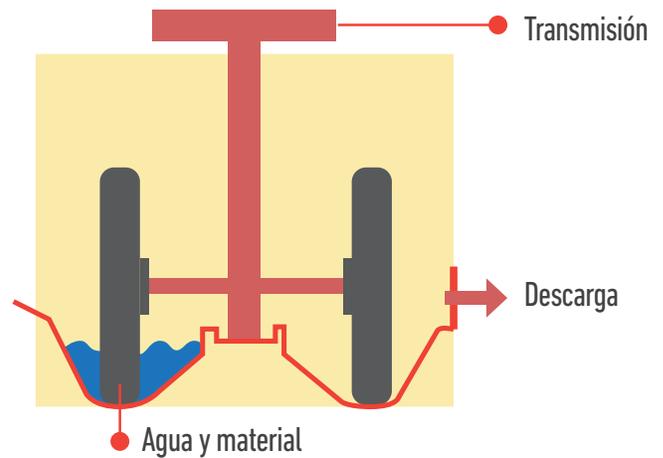
tende mantener el mineral siempre dentro del área de molienda, evitando así la dispersión o derrame. Esta operación contempla bajos costos de operación y mantenimiento, debido a la larga vida útil de sus componentes y la simplicidad de su funcionamiento (Velásquez, Veiga y Hall, 2010).

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

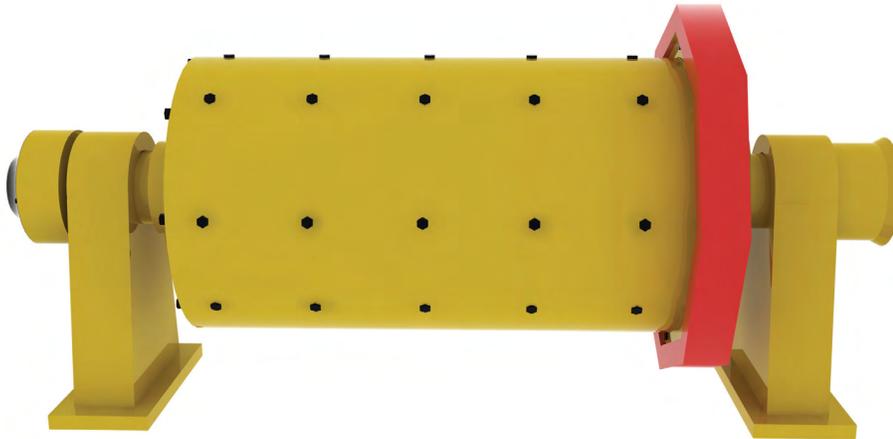
Es la operación final del proceso de conminución y consiste en reducir de tamaño partículas procedentes de la trituración media o fina (con fragmentos menores de 20 mm), hasta un tamaño que se encuentra en el rango de 28 a 200 mallas Tyler en la molienda gruesa, y menores de 325 mallas en la molienda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

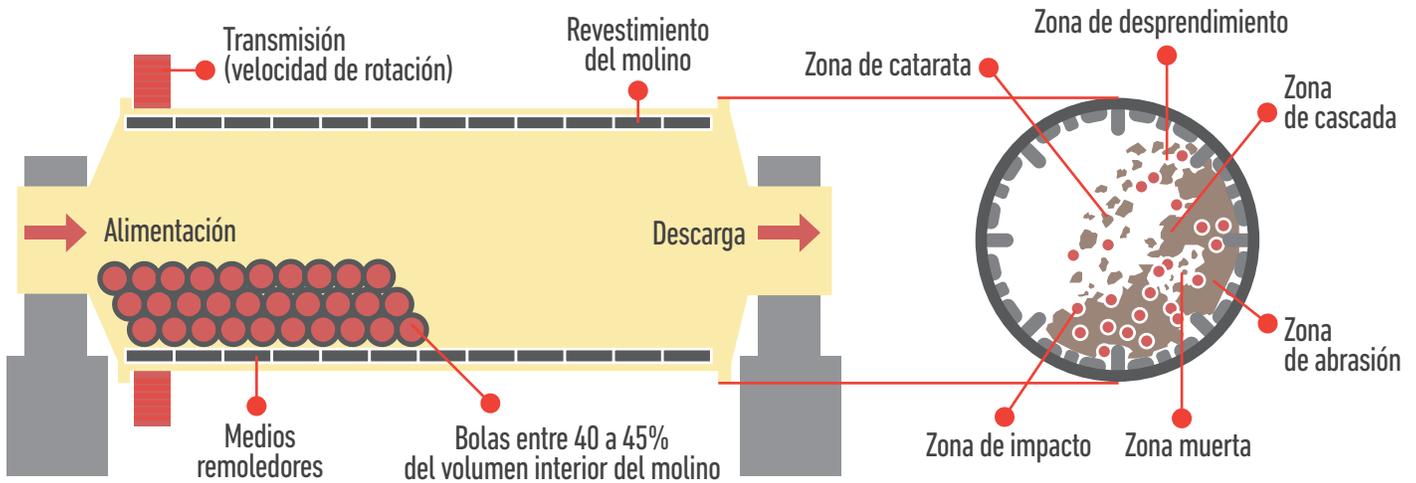
Molino de bolas

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

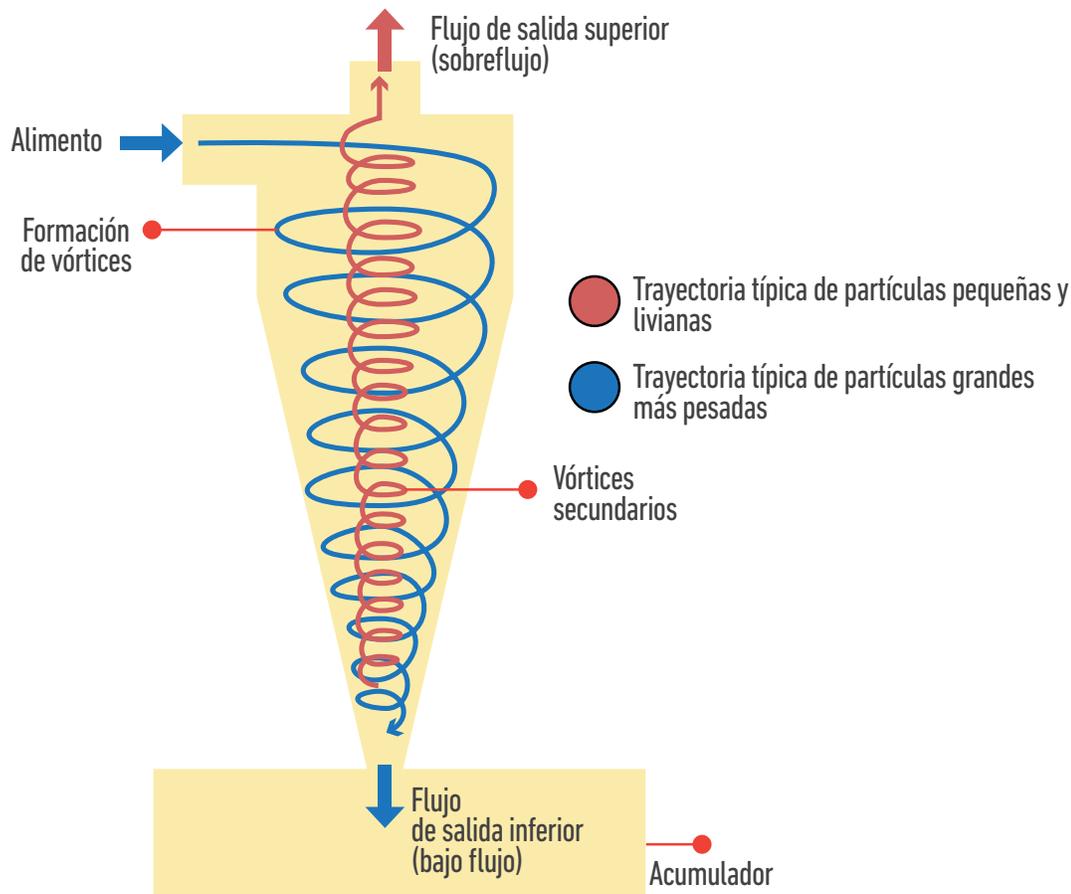
Aunque el hidrociclón es un equipo bastante simple en su forma, su funcionamiento es muy complejo.

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

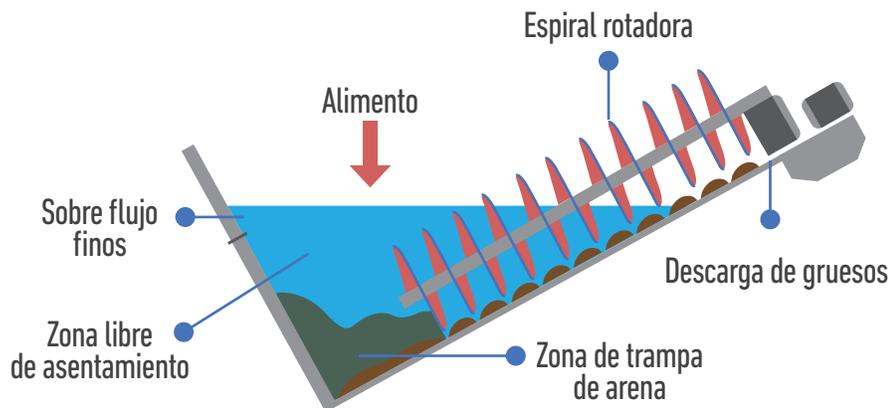
- Peso de la pulpa
- Densidad de la pulpa
- Caudal de pulpa
- Diámetro cilíndrico
- Diámetro rebosadero
- Diámetro de alimentación
- Diámetro de descarga

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

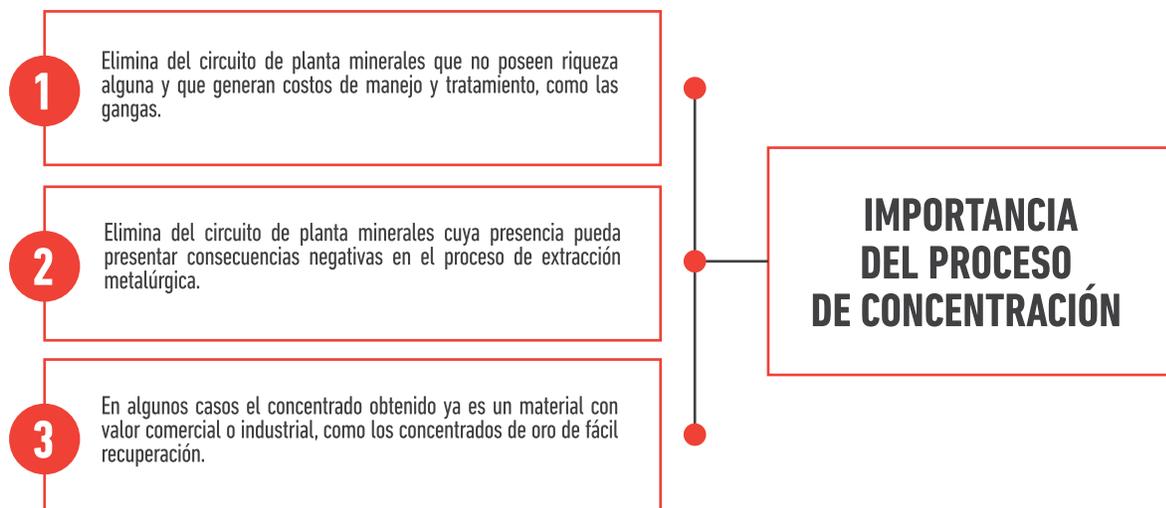
$$\text{TENOR} = \frac{\text{CANTIDAD DE MINERAL ÚTIL}}{\text{CANTIDAD DE MINERALES EXTRAÍDOS}}$$

cantidad 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/t, 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 (Benvindo da Luz, Sampaio y França, 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 estos 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 (Benvindo da Luz, Sampaio y França, 2010):

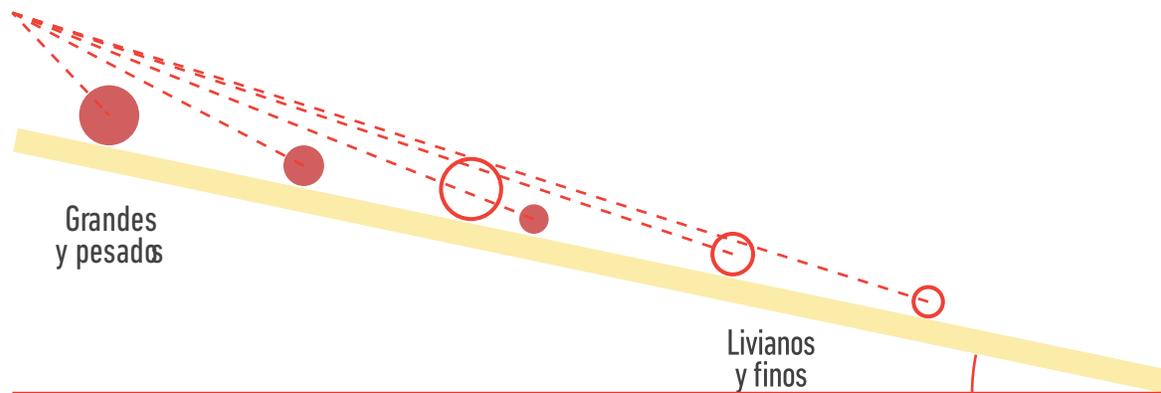
- Pendiente del canalón
- Espesor de la película de agua (caudal)
- Los coeficientes de fricción entre las partículas y la superficie
- La gravedad específica de las partículas
- La forma de las partículas
- La rugosidad de la cubierta

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 canales se expresan en porcentajes. Las pendientes más usadas están entre 4 y 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.

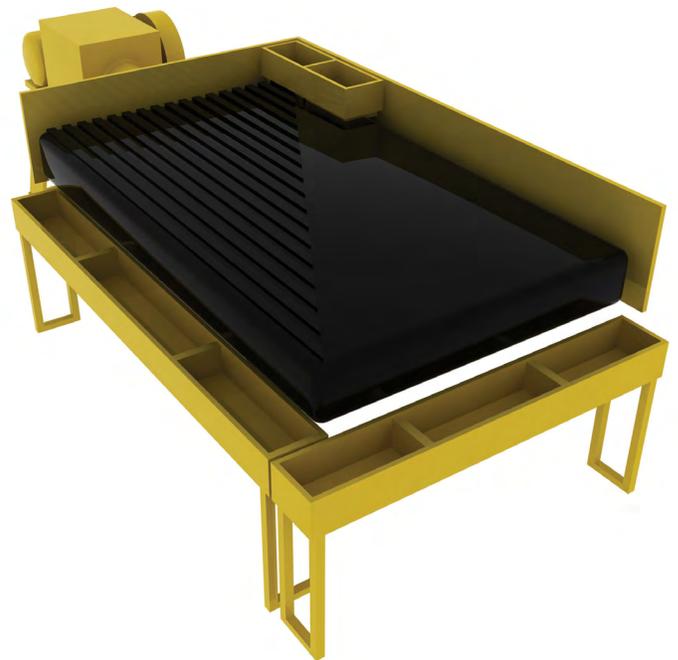
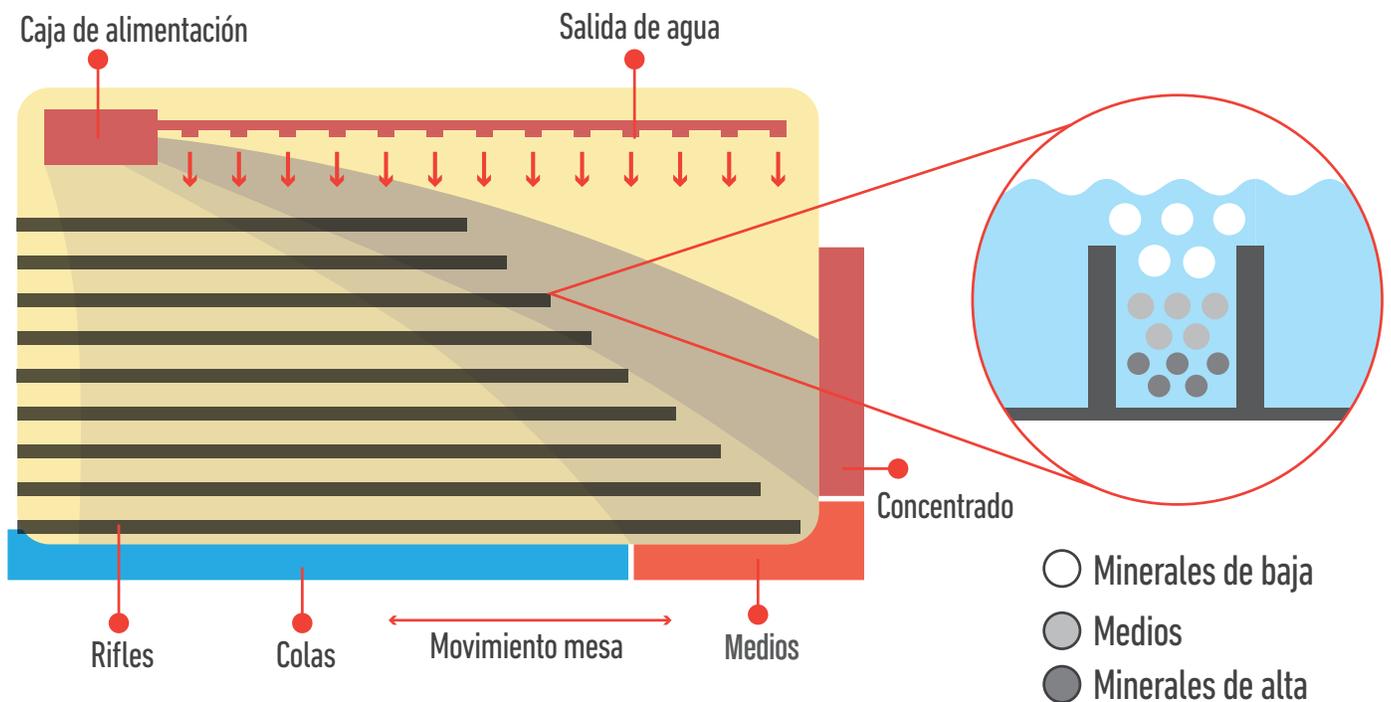


Figura 6.11. Diagrama de funcionamiento de una mesa de concentración gravimétrica. Fuente: autores.



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.



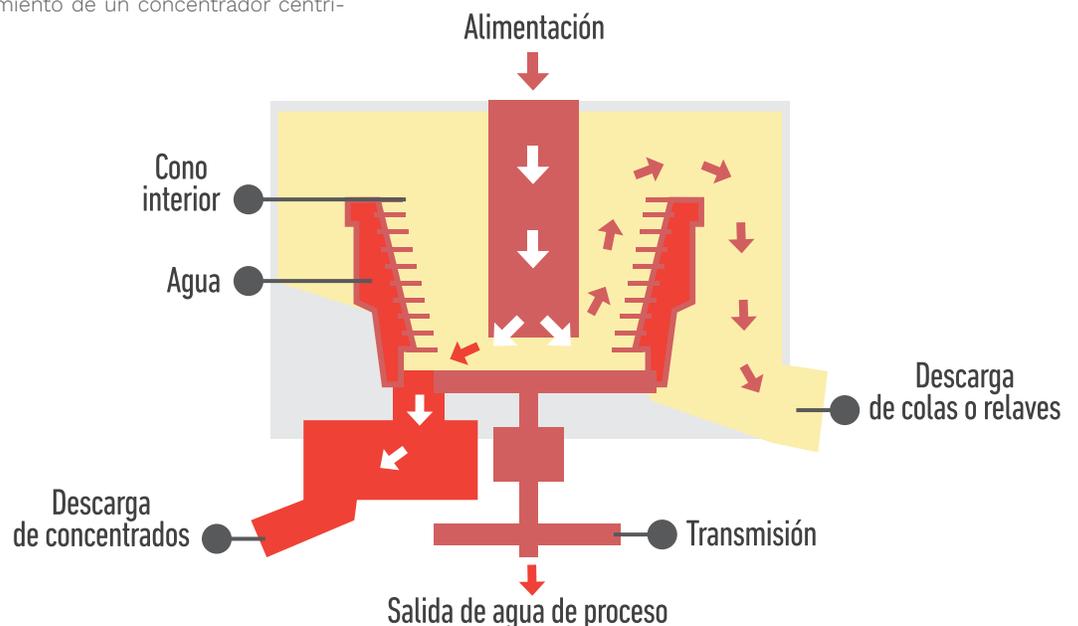
Concentradores centrífugos (Tipo Knelson o Falcon)

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 t/h) hasta escala industrial (150 t/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 de 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.

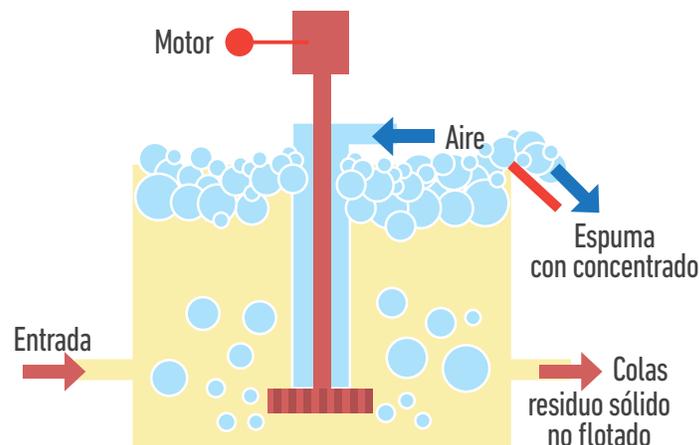


La flotación se basa en la capacidad que tiene la superficie de un sólido de ser o no humectada por el agua.

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.

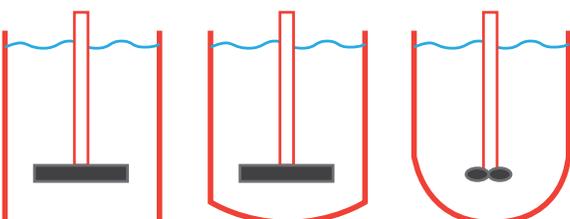
La cianuración es fuertemente afectada por el pH de la solución. Es esencial que la solución de cianuro se mantenga alcalina (altos pH) durante la lixiviación del oro, por las siguientes razones:

- 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.



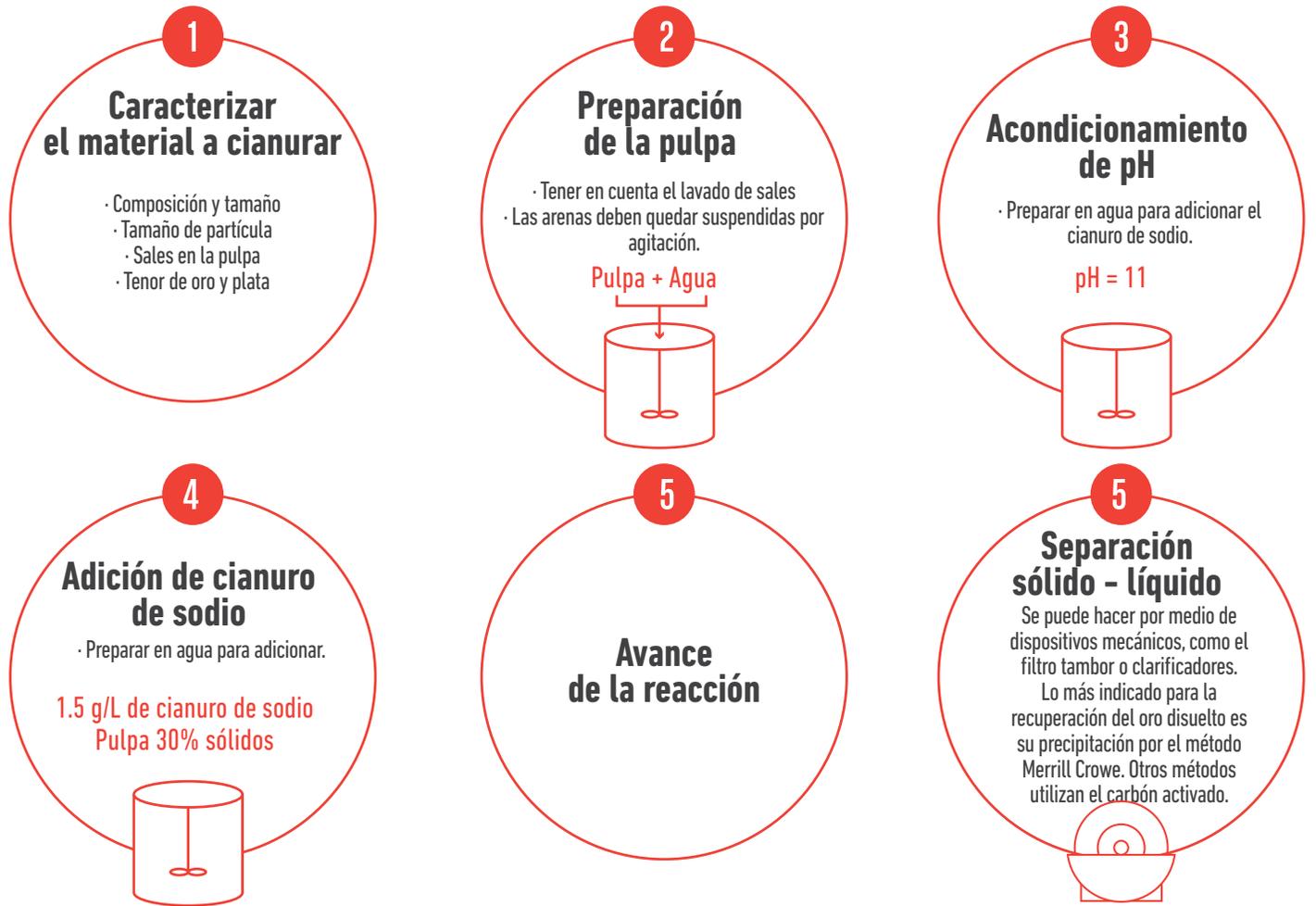
Figura 6.14. Diagrama de tipos de diseño de tanque e impulsores. Fuente: autores.



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

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

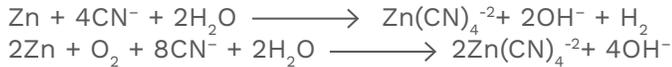


La cianuración industrial de un material aurífero produce una solución cuya concentración de oro está generalmente por encima de 2 miligramos de oro por litro (ppm), dependiendo del material lixiviado y del sistema utilizado.

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



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



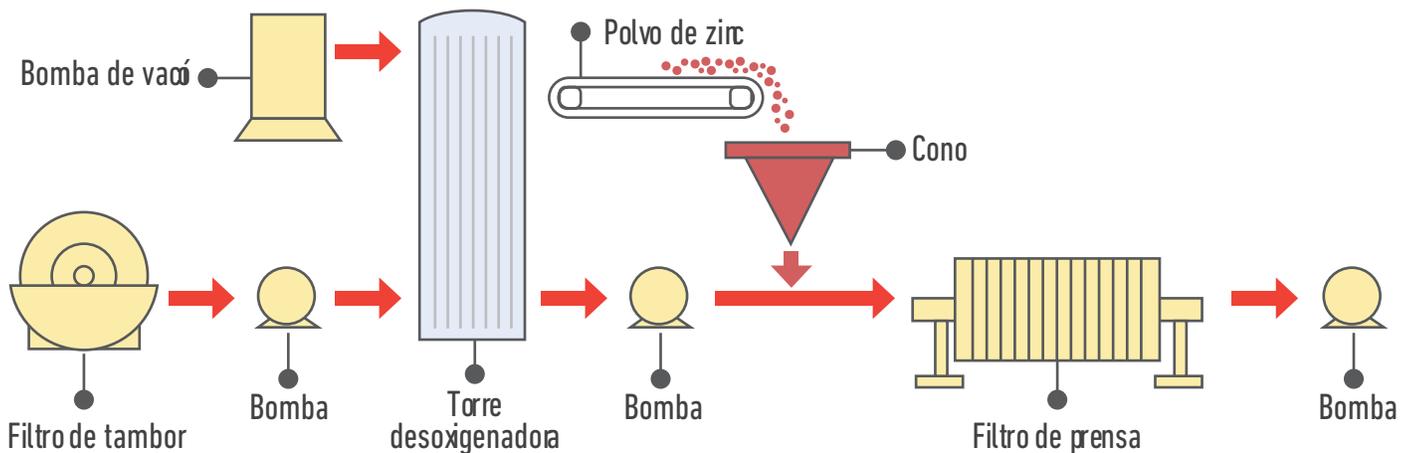
En la práctica se debe adicionar zinc entre cinco y diez veces más que los requerimientos estequiométricos. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto puede provocar la redisolución del oro ya precipitado, por lo que se debe garantizar una condición de vacío para evitarlo. Esto es posible utilizando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

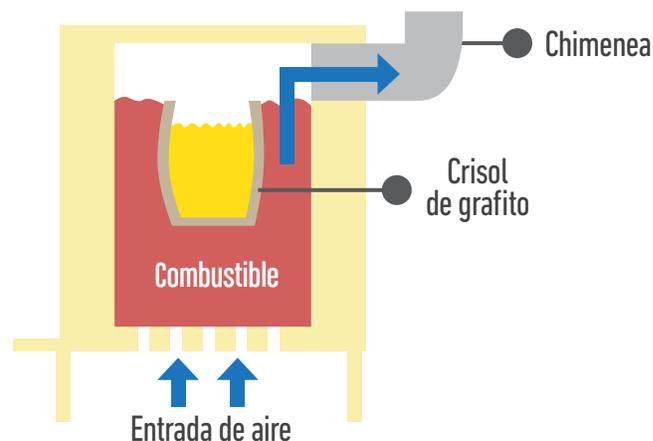
Fundición directa

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

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 $1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo que oscila entre una y dos horas. La carga se vacía en moldes previamente parafinados para finalmente, luego del enfriamiento, realizar la separación de la barra de oro de la escoria.

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 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.

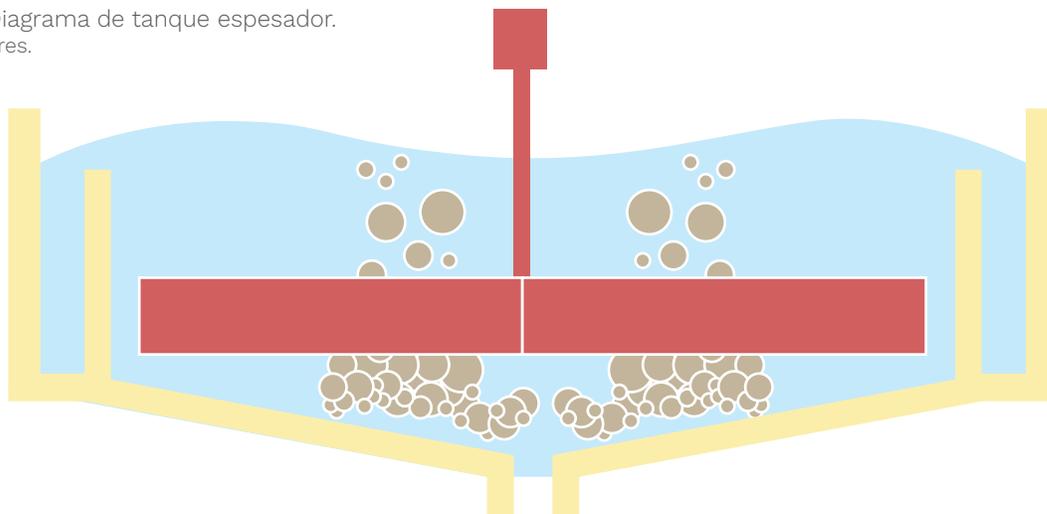
Un espesador convencional está compuesto por tanques cilindro-cónicos que constan de un mecanismo que hace girar las hélices que facilitan la descarga del producto por la parte inferior. La alimentación del material (pulpa) llega a un pozo circular en el centro del espesador, que minimiza la agitación. 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.

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



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



7. ASPECTOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES

La minería que usa como modelo de beneficio del oro la amalgamación con mercurio, deja en evidencia marcados impactos ambientales tanto en zonas rurales como urbanas del municipio de Remedios. Esto ocurre debido a que el modelo extractivo genera vertimientos sobre las fuentes de agua permitiendo la movilidad no solo de mercurio, sino también otro tipo de contaminantes químicos perjudiciales para el medio ambiente y que ponen en riesgo los ecosistemas. De ahí la importancia de desarrollar modelos de extracción alternativos contribuyentes a disminuir el impacto ambiental y que conlleven a una mejora continua del medio ambiente y los seres vivos involucrados.

Dicho objetivo se puede lograr partiendo del conocimiento de las características actuales de suelos, subsuelos, vertimientos y quebradas, como, por ejemplo: composición elemental, pH, potencial de acidez y contenido de metales pesados, entre otras. De ahí la importancia de aplicar técnicas o métodos de ensayo analíticos clásicos o instrumentales, para que de este modo se pueda comprender acerca de la movilidad e incidencia en el medio ambiente de los agentes contaminantes identificados y se generen propuestas de rutas o metodologías apropiadas para ser aplicadas en los entables o plantas de beneficio del municipio.

Panorámica de la cancha de relaves en Quintana. Fotografía tomada por Jaime Mojica, 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.

<p>CARACTERIZACIÓN QUÍMICA</p> <p>APLICANDO ESTAS TÉCNICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Absorción atómica Fluorescencia de rayos X (FRX) Determinación gravimétrica de azufre Difracción laser Potenciometría selectiva de cianuro (CN⁻) Volumetría de ión cianuro <p>ES POSIBLE DETERMINAR</p> <ul style="list-style-type: none"> Metales como Au, Ag, Fe, Pb, Cu, Zn y Hg Composición elemental (mayores y trazas) Contenido de azufre (sulfato y sulfuro) Tamaño y distribución de partícula Cianuro total Cianuro libre 	
---	--

	<p>CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS</p> <p>APLICANDO ESTAS TÉCNICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Potenciometría selectiva de cianuro (CN⁻) Absorción atómica Fluorescencia de rayos X (FRX) <p>ES POSIBLE</p> <ul style="list-style-type: none"> Calcular la reutilización de soluciones con contenido de cianuro para nuevas cianuraciones. Determinar la concentración de oro en un proceso de cianuración. Deducir el tiempo de cianuración y gastos de reactivos. Determinar la efectividad de procesos de recuperación con zinc (Zn) y ensayo al fuego. Composición elemental (mayores y trazas)
---	---

<p>CONTROL AMBIENTAL</p> <p>APLICANDO ESTAS TÉCNICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> Espectrofotometría de absorción atómica TCLP TEST ABA Descomposición de cianuro libre y complejo con peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso <p>ES POSIBLE</p> <ul style="list-style-type: none"> Metales como Ag, Pb, Cu, Cd, Fe, Cr, Ni y Hg. Determinar la toxicidad de relaves, lo que posibilita mitigar procesos de contaminación por el contacto de dichos relaves con el medio natural. Realizar procesos extractivos ambientales sostenibles. 	
--	--

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 patio de relaves entable Pujidos. 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 KOW de 5,95 muestra su alta afinidad con la biota animal. Además, el mercurio no solo es altamente bioacumulable, sino que forma parte de una cadena trófica; las especies mayores, como el hombre, pueden no solo acumularlo, sino biomagnificarlo en su organismo.

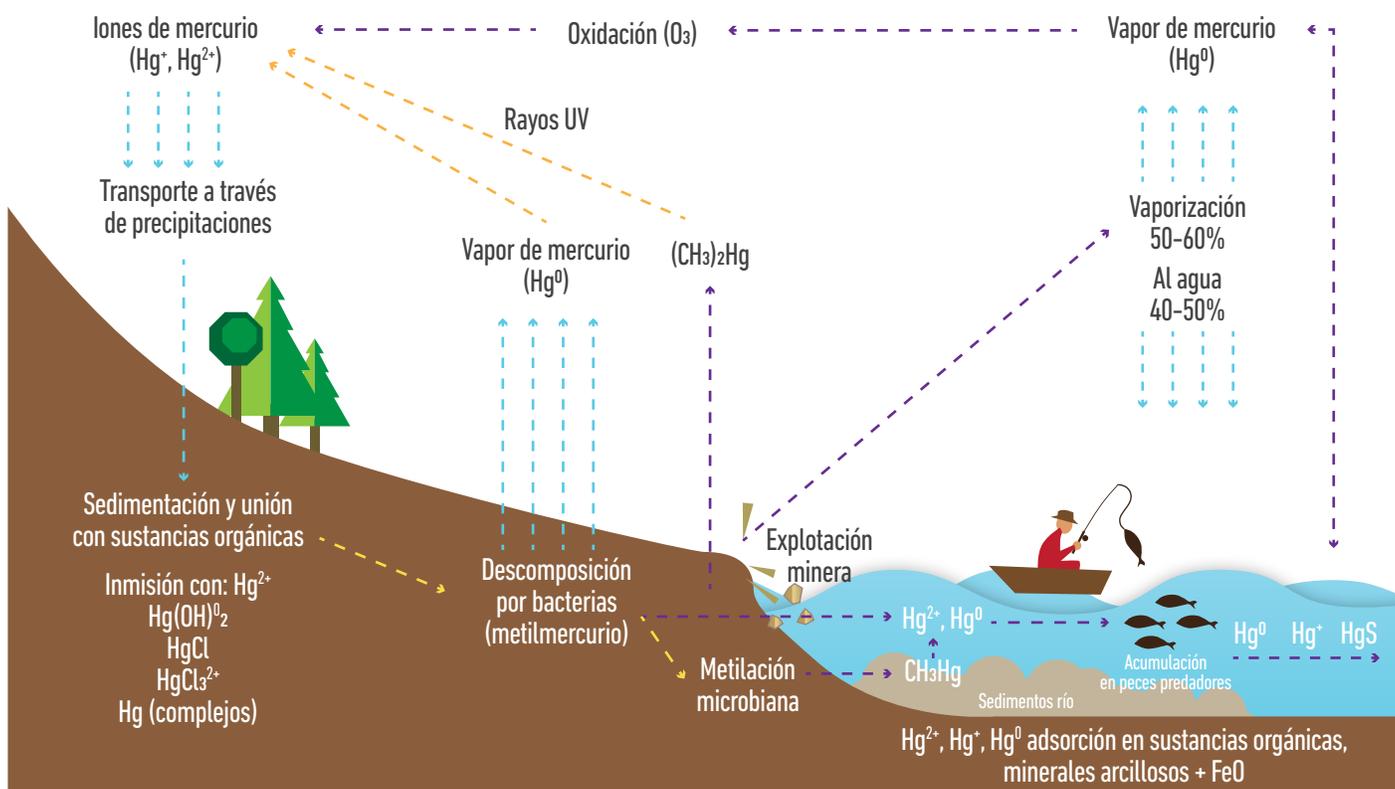
El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental (Hg_0), las de tipo inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}) y las orgánicas. El metilmercurio ($HgCH_3$) y el dimetilmercurio ($Hg(CH_3)_2$) son las formas orgánicas más tóxicas que afectan el sistema inmunológico, alteran 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 y 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.

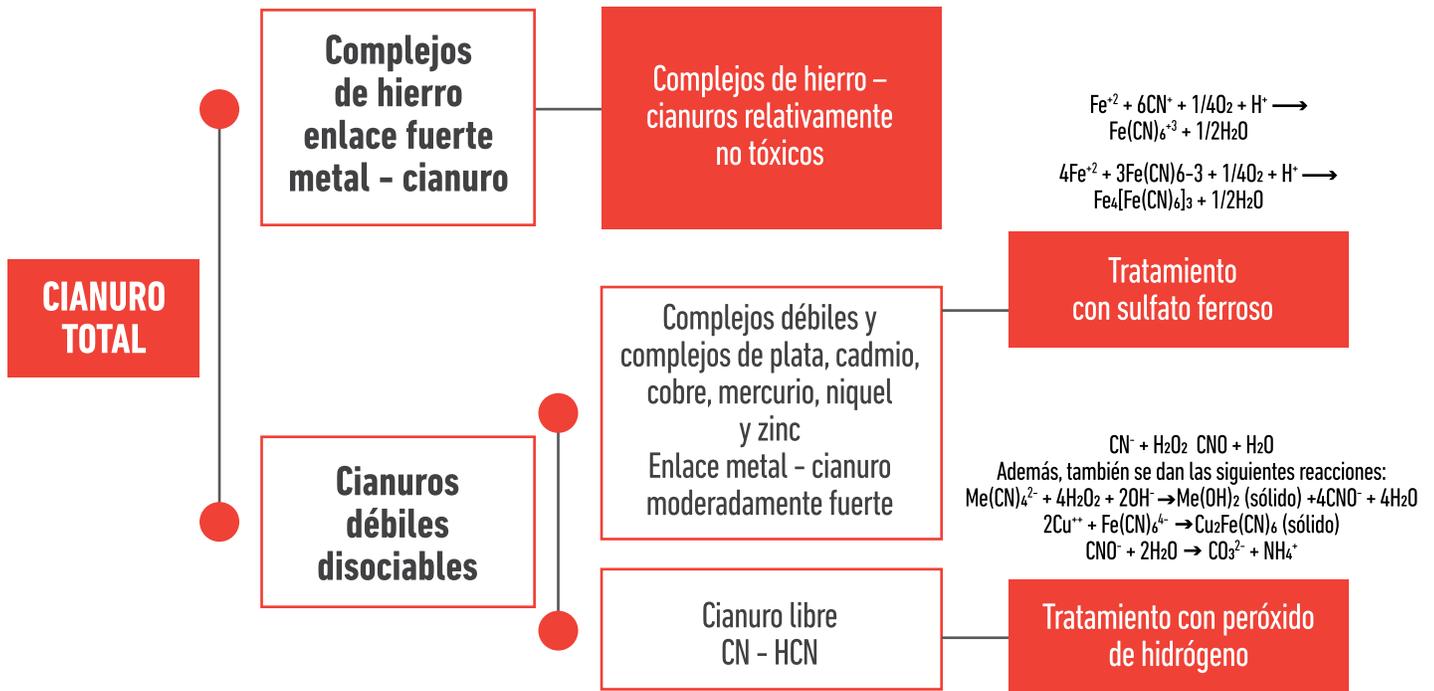


La Ley 1658 de 2013 desarrolla el marco legal “por medio del cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones”. Los ministerios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

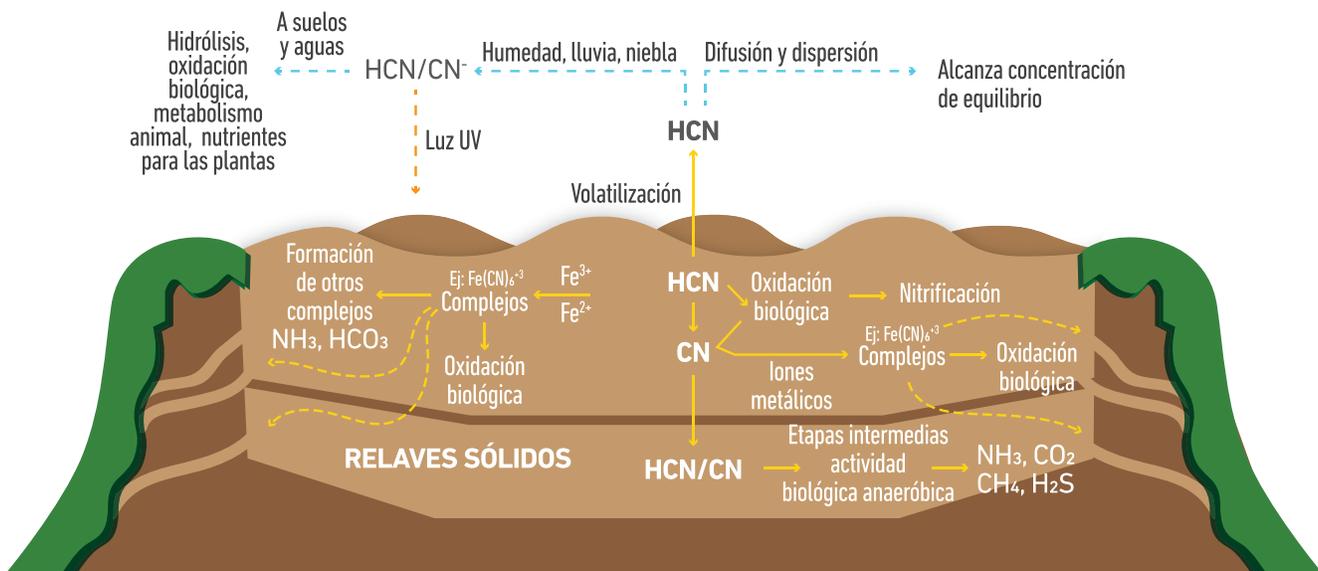


Los compuestos de cianuro presentes en la minería del oro y en las soluciones y efluentes de cianuración comprenden el cianuro libre, sales de cianuro de metales alcalinos y alcalino-térreos, así como complejos de cianuros metálicos formados con oro, mercurio, cadmio, zinc, plata, cobre, níquel, hierro 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. DINÁMICA 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.

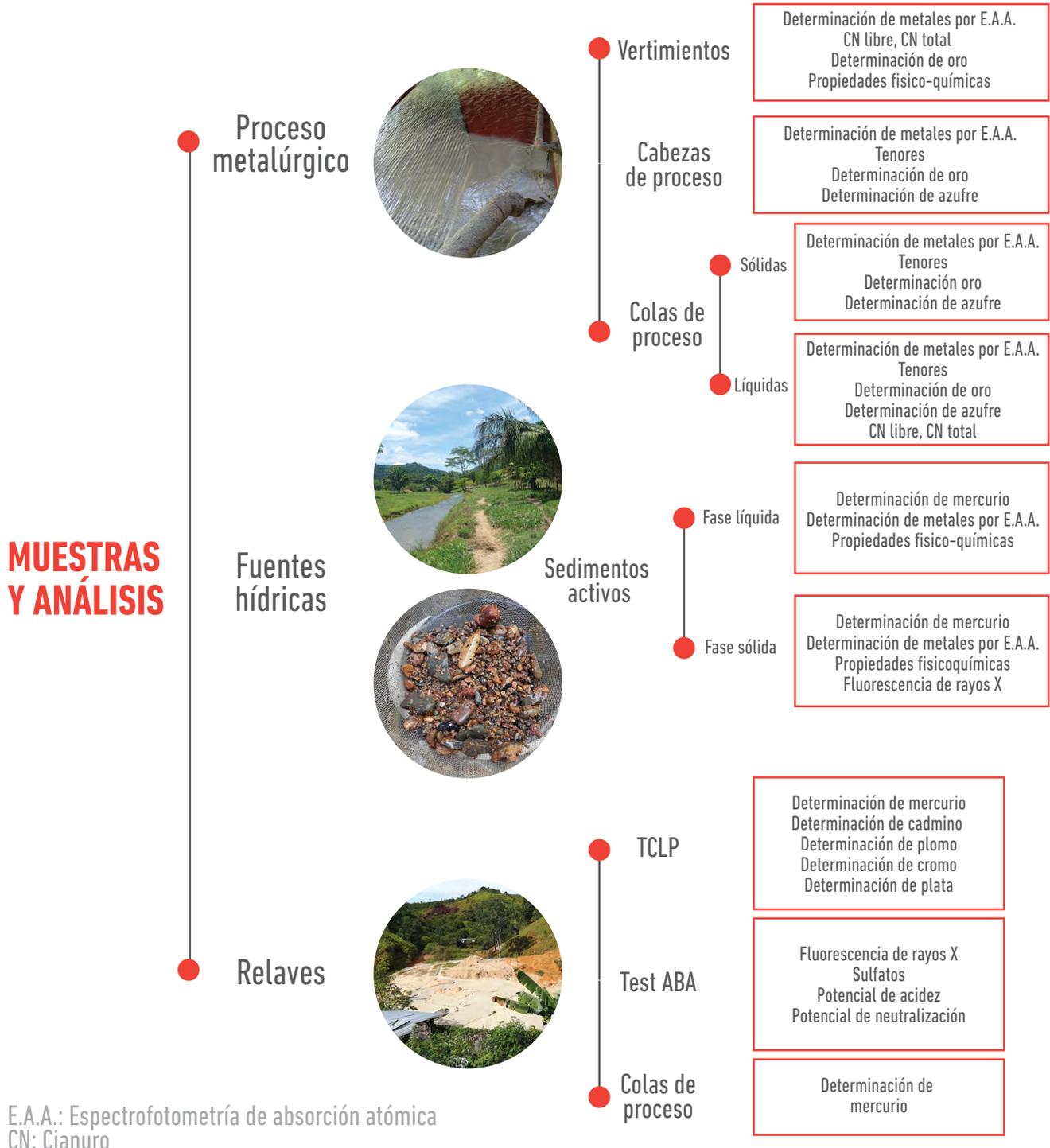
Figura 7.4. Reacciones bioquímicas del cianuro en un material residual de la cianuración. Fuente: modificado Cáceres, 2001.



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.

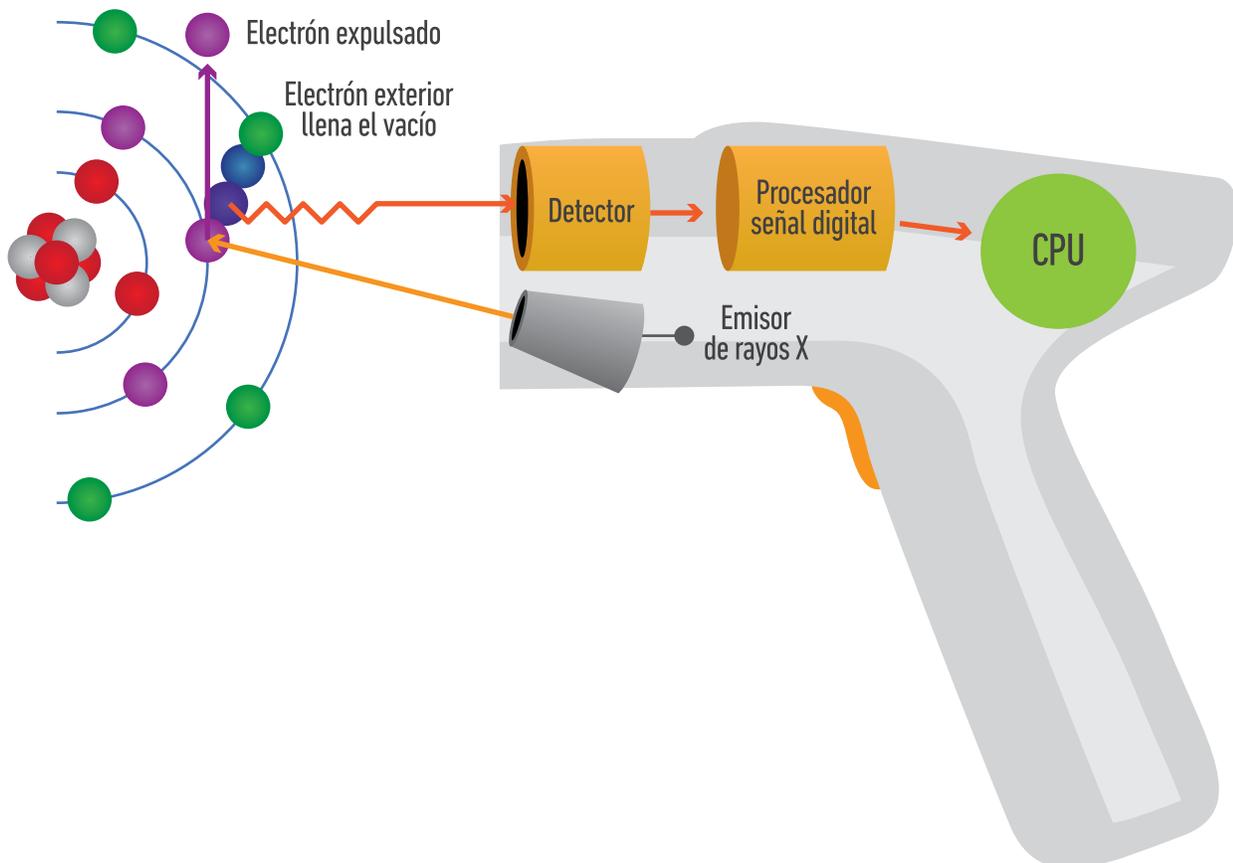
El ciclo de la figura 7.4. se presenta un esquema simplificado del ciclo del cianuro mostrando las diversas especies que se forman a partir del cianuro libre en tanques de relaves.

7.2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AMBIENTAL

Diferentes técnicas analíticas, instrumentales y gravimétricas, como la fluorescencia de rayos X, espectrofotometría de absorción atómica, potenciometría (ion CN), determinación de azufre por gravimetría y pruebas ambientales de TCLP 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 fluorescencia de rayos X (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 fluorescencia de rayos X, que aporta información del contenido de elementos en cada una de las muestras analizadas (Skoog, Holler y Nieman, 2001, pp. 291-317).

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 fluorescencia de rayos X. 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.

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

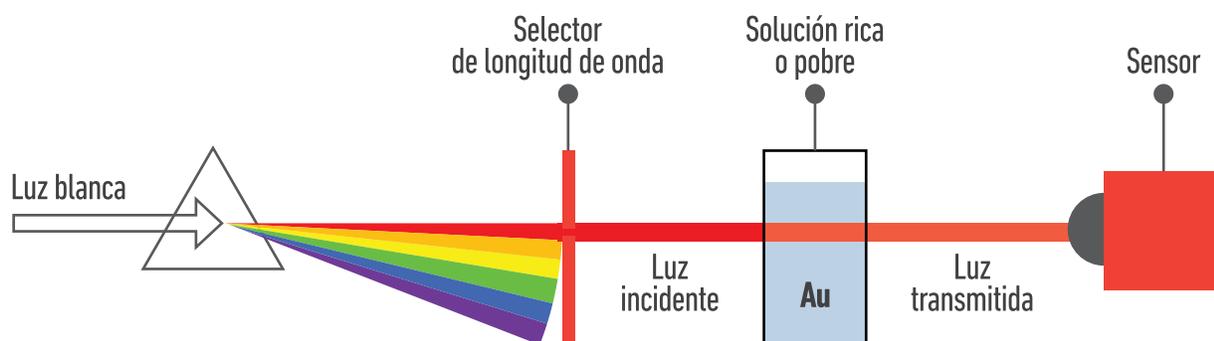


Esta técnica se emplea en la determinación de oro en muestras líquidas cianuradas de procesos metalúrgicos, específicamente de procesos de cianuración en los que se obtienen soluciones ricas en dicho metal, cuando es necesario conocer sus concentraciones para efectos de controlar el proceso, como son las velocidades de disolución del oro, el consumo de cianuro, cal y oxígeno. En el control de recuperación de oro en procesos de precipitación con zinc, este análisis genera la información para evaluar en general la cinética de reacción, los porcentajes de recuperación y la efectividad de la lixiviación.

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.

Figura 7.7. La técnica instrumental de ultravioleta visible. Es una alternativa de medición cuando no se cuenta con el equipo de absorción atómica para determinar el oro. Fuente: autores.



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.

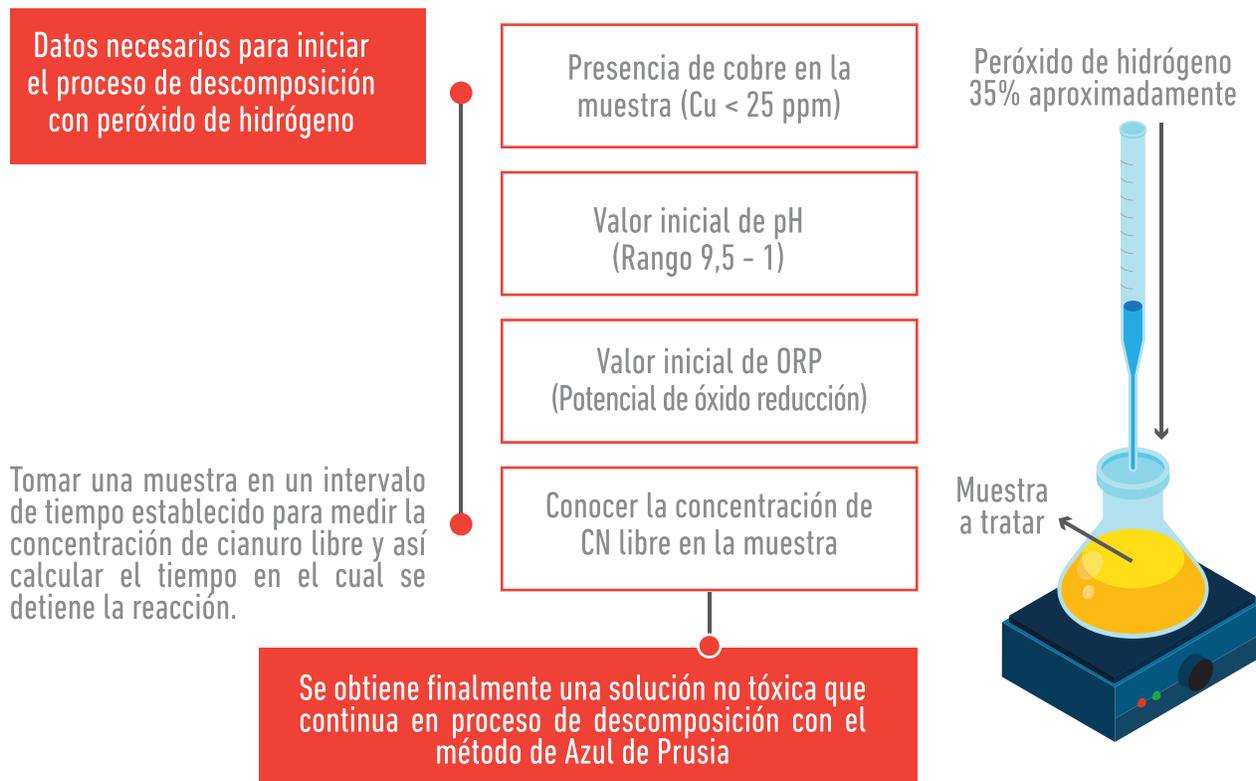


7.2.3.5. TRATAMIENTOS DE DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO

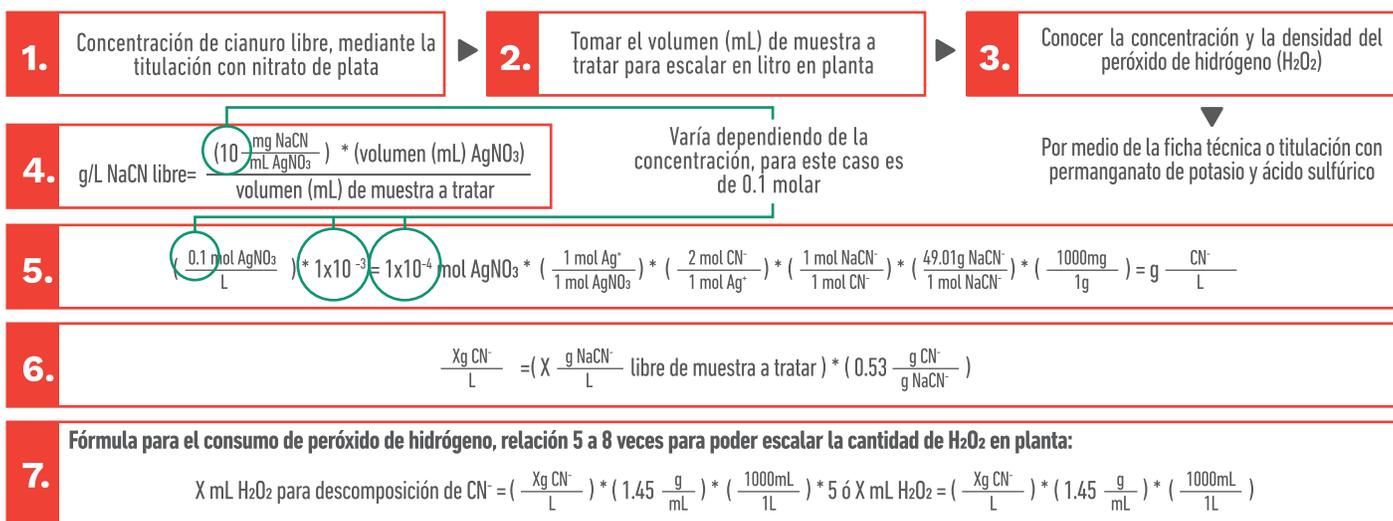
De acuerdo con lo expuesto, existen dos formas principales de cianuro: libre y compleja. Para descomponer el cianuro libre se utiliza el método de descomposición con peróxido de hidrógeno al 35%. En ocasiones se encuentran en el mercado concentraciones mayores, que pueden utilizarse de acuerdo con el cálculo de reacción. Las figura 7.9. presentan 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.

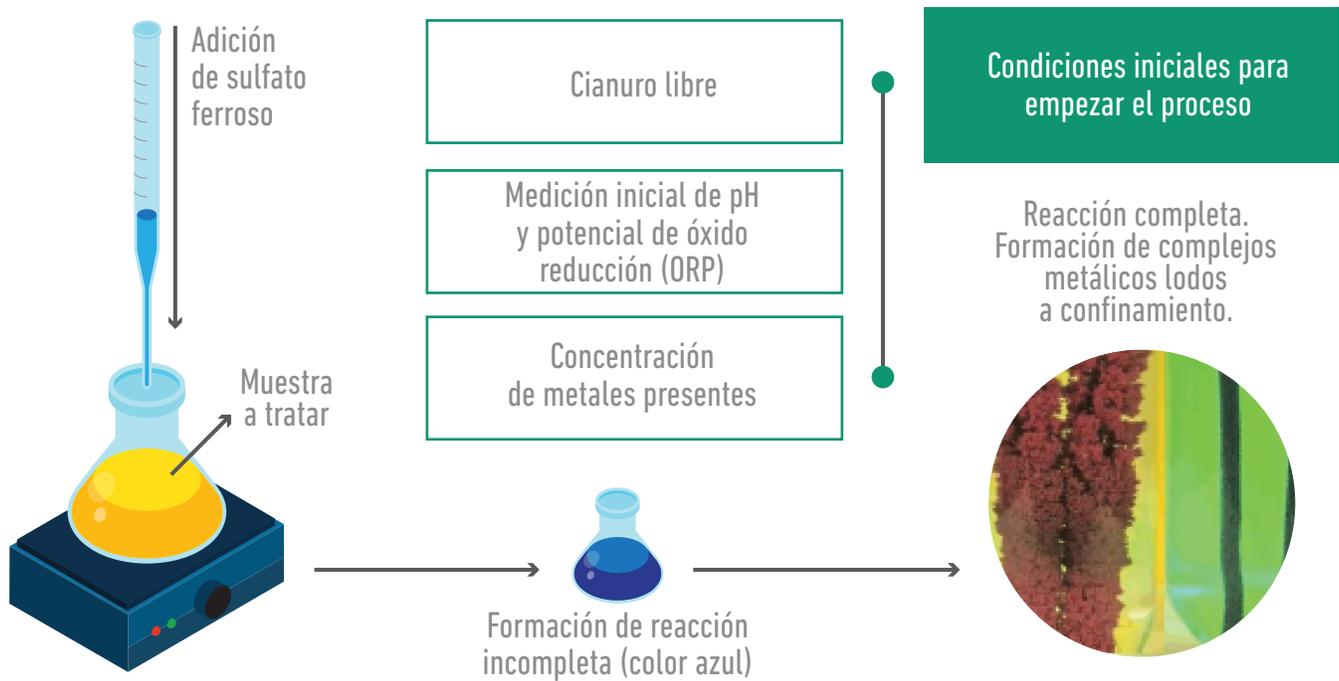


CALCULO PARA DOSIFICACION DE PEROXIDO

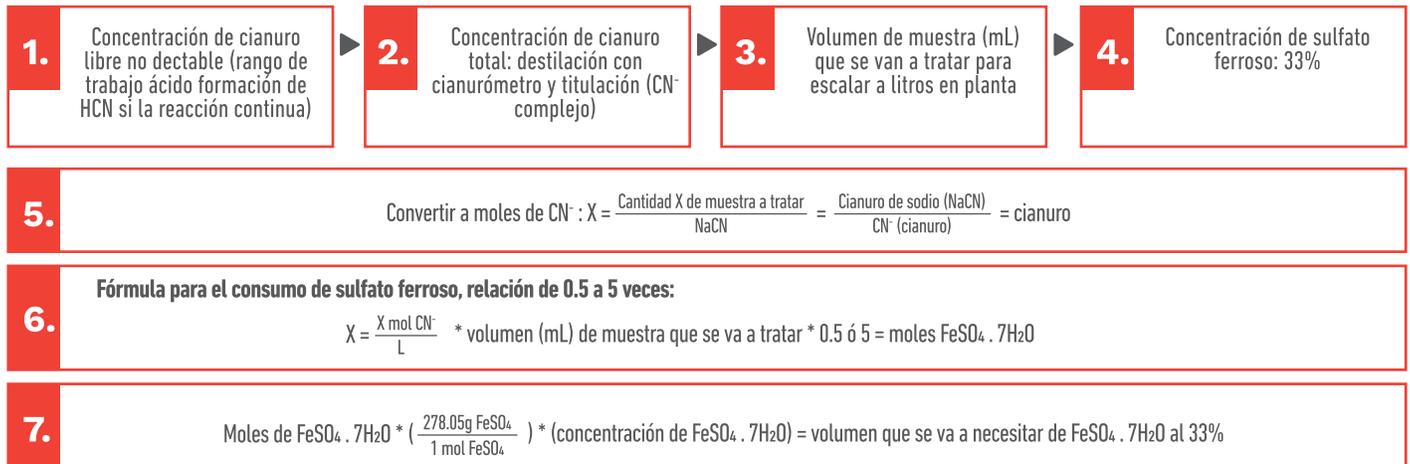


La metodología del azul de Prusia es el proceso final para completar la descomposición de todos los complejos metálicos transformándolos en compuestos más estables y que no generen impacto negativo en condiciones ambientales. El material (lodo) producto de este proceso es llevado a confinamiento.

Figura 7.10. Diagrama de descomposición de cianuro complejo mediante el método azul de Prusia. Fuente: autores.

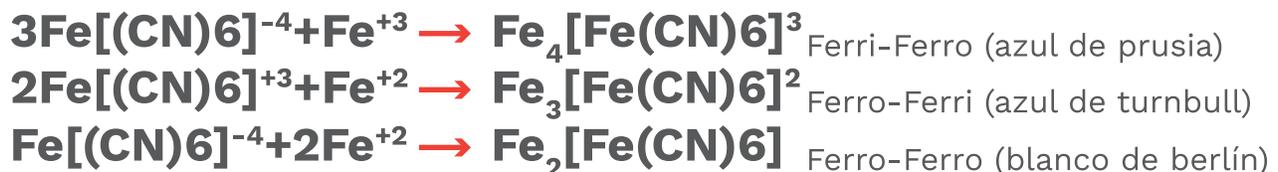


CÁLCULO PARA DOSIFICACIÓN DE PERÓXIDO



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 típicos producidos con estas reacciones son azul, verde y marrón, 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 hexacianoferrroso 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

Procedimiento de lixiviación característico 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.

Prueba de test ABA

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 211 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).

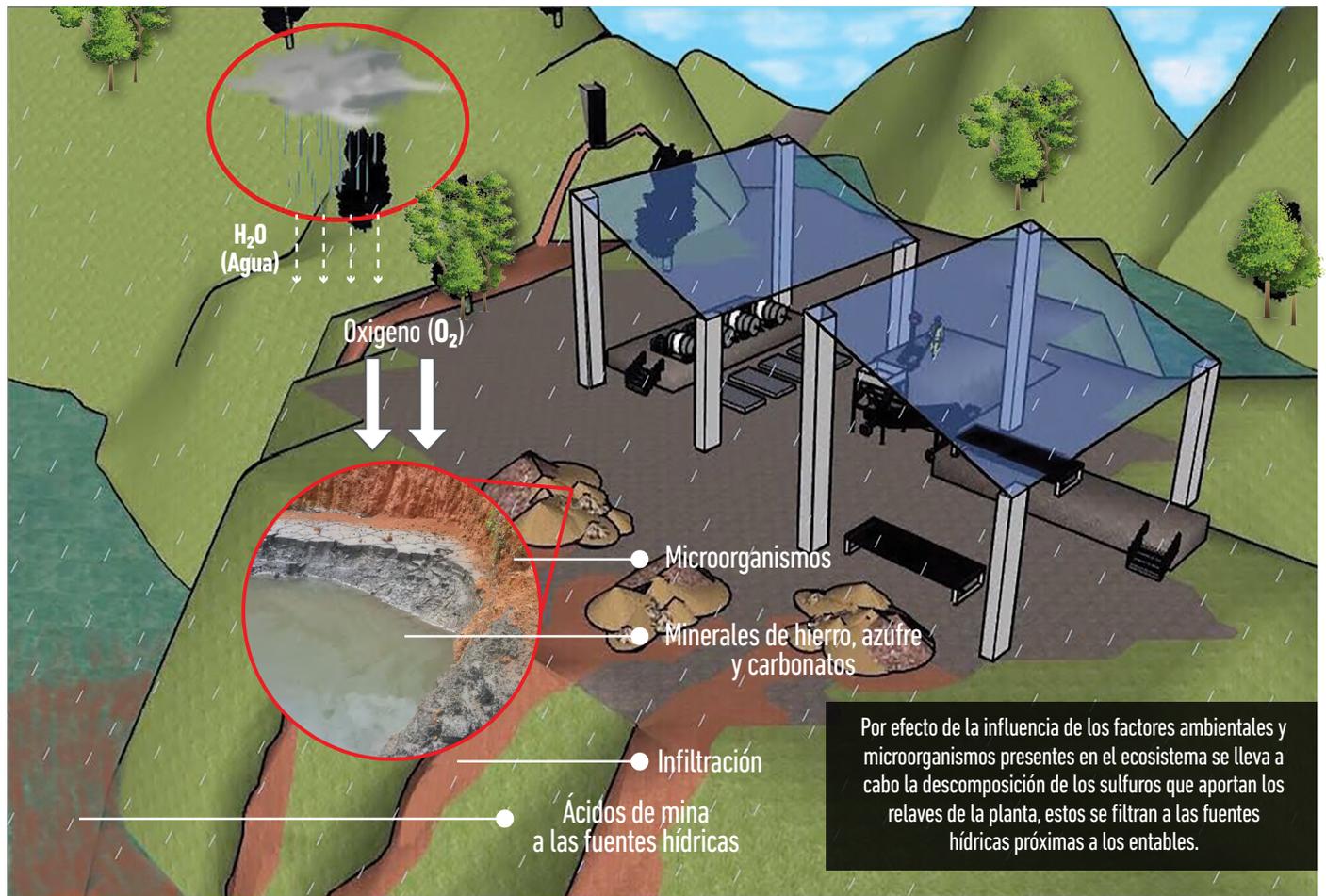
Figura 7.12. Concentraciones máximas permitidas para prueba de TCLP. Fuente: autores.

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, sino que se usan 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 drenaje ácido de minas. Fuente: autores.

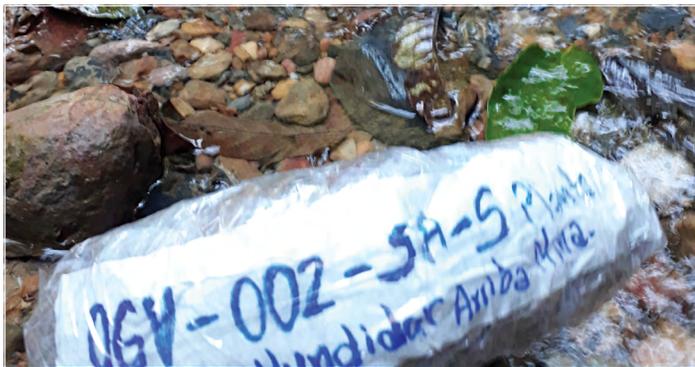


Los DAM, además de un bajo pH, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión, con un alto contenido en sulfato y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni), que son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cursos de agua y pueden llegar a causar daños a las estructuras construidas por el hombre (Çelebi, Öncel y Kobyta, 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 Remedios se tomaron cuatro puntos de referencia para el estudio ambiental. El primero fue el entable El Hundidor, donde se inició muestreando relaves y vertimientos al final del proceso que se almacenan en unas pocetas hechas en la tierra. Además se colectaron muestras de agua superficial y sedimentos activos de la quebrada El Hundidor, aguas arriba de la actividad minera del entable (fotografías 7.2. a 7.5.).

El segundo punto de estudio fue el entable La Ceiba, donde se inició muestreando relaves y vertimientos al final del proceso y que se almacenan en unas piscinas hechas en la tierra que vierten hacia la quebrada



Fotografía 7.2. Sedimento activo sólido muestreado en la quebrada, aguas arriba del entable de beneficio el Hundidor. Fuente: autores.



Fotografía 7.3. Medición de pH del agua en la quebrada el Hundidor aguas arriba del entable de beneficio. Fuente: autores.



Fotografía 7.4. Molinos de cocos en el entable el Hundidor. Fuente: autores.



Fotografía 7.5. Pocetas de vertimientos desechados en el proceso de beneficio en el entable el Hundidor. Fuente: autores.

La Cianurada. Además, se colectaron muestras de agua superficial y sedimentos activos de la quebrada La Ceiba, aguas arriba de la actividad minera del entable, y una muestra líquida de la quebrada La Cianurada abajo del entable (fotografías 7.6. a 7.9.).



Fotografía 7.6. Quebrada la Ceiba aguas arriba del entable de beneficio. Fuente: autores.



Fotografía 7.7. Quebrada la Ceiba, aguas abajo. Fuente: Autores.



Fotografía 7.8. Entable La Ceiba con sus pocetas de vertimientos. Fuente: autores.



Fotografía 7.9. Quebrada la Cianurada que aguas debajo del entable la Ceiba. Fuente: autores.

El tercer lugar de estudio fue la planta Quintana, donde se inició muestreando relaves que se almacenan en un área considerablemente grande. También se colectaron muestras de agua superficial y sedimentos activos de la quebrada Quintana aguas arriba y aguas abajo de la actividad minera de la planta de beneficio (figura 7.10. a 7.13.).



Fotografía 7.10. Quebrada Quintana, aguas arriba de la planta de beneficio Quintana. Fuente: autores.



Fotografía 7.11. Planta de beneficio Quintana. Fuente: autores.



Fotografía 7.12. Patio de relaves de la planta Quintana. Fuente: autores.



Fotografía 7.13. Quebrada Quintana aguas debajo de la planta de beneficio. Fuente: autores.

El cuarto punto fue el entable la Cirila, donde se inició muestreando relaves que se almacenan en un área pequeña al final del proceso, también se colectó muestras de agua superficial y sedimentos activos de la quebrada la Cirila aguas arriba y aguas abajo de la actividad minera del entable. Fotografías 7.13 a 7.16.

7.4. RESULTADOS DE ENSAYO QUÍMICOS Y AMBIENTALES

La aplicación de los ensayos químicos y ambientales a través de los diferentes métodos analíticos y técnicas instrumentales (figura 16) 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 superficial tomadas nos facilita el direccionamien-



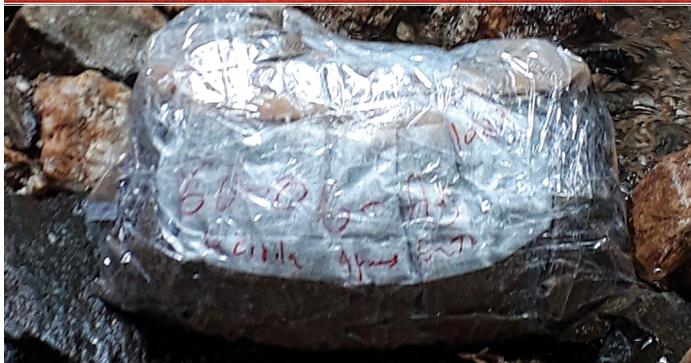
Fotografía 7.14. Quebrada la Cirila antes de la captación de agua para proceso en planta de beneficio. Fuente: autores.



Fotografía 7.15. Planta de Beneficio la Cirila. Fuente: autores.



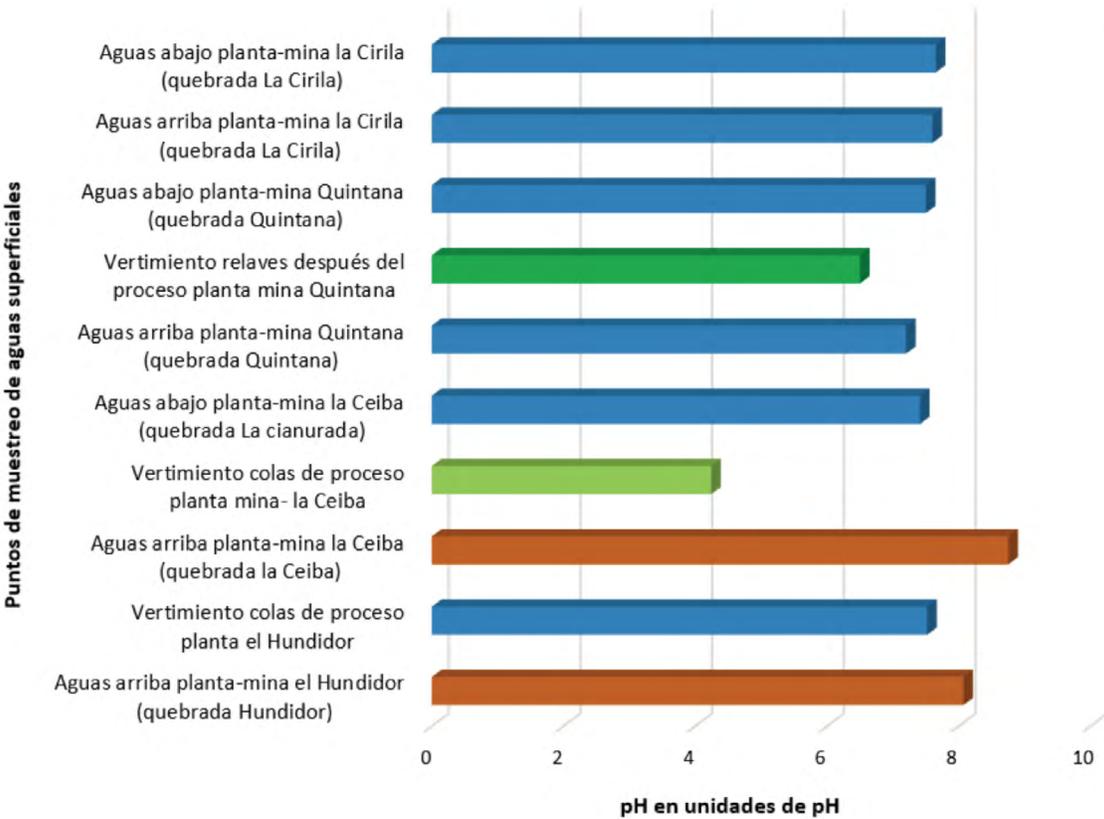
Fotografía 7.16. Patio de relaves de la Cirila. Fuente: autores.



Fotografía 7.17. Quebrada la Cirila aguas debajo de la planta de beneficio y relaves de la Cirila. Fuente: autores.

to del estudio ambiental en la zona. En general, el comportamiento de las muestras líquidas tomadas en los sectores de estudios en el municipio de Remedios oscilaron en un rango de 4,24 a 8,75 unidades de pH.

Figura 7.14. Valores de pH tomados in situ en muestras líquidas municipio de Remedios. Fuente: autores, 2019. Medición de pH Thermo Scientific Orion Star.



Los valores de pH determinados en los puntos de muestreo en el municipio de Remedios presentan un comportamiento, en su mayoría, neutro con una leve tendencia básica. Con un total de diez muestras analizadas, dos arrojaron valor ácido, como es el caso del vertimiento de las colas de proceso en la planta de la mina La Ceiba con un pH de 4,24 y el vertimiento de los relaves en la planta de la mina Quintana con un pH de 6,50. Estos valores indican la posible generación de un drenaje ácido al medio, acompañado principalmente de metales y sulfuros. Se determinaron valores alcalinos para las aguas en contacto con sedimentos activos correspondientes a la quebrada El Hundidor, aguas arriba de la actividad minera de la mina El Hundidor, con un pH de 8,07; también en la quebrada La Ceiba, aguas arriba de la planta La Ceiba, con un pH de 8,75. Este aspecto se presenta por un contenido significativo de carbonatos solubles asociados a metales alcalinos, los cuales, si se llegaran a generar especies ácidas en los afluentes, tienen la capacidad de neutralizar su actividad y evitar la solubilidad de metales y su movilidad en las aguas.

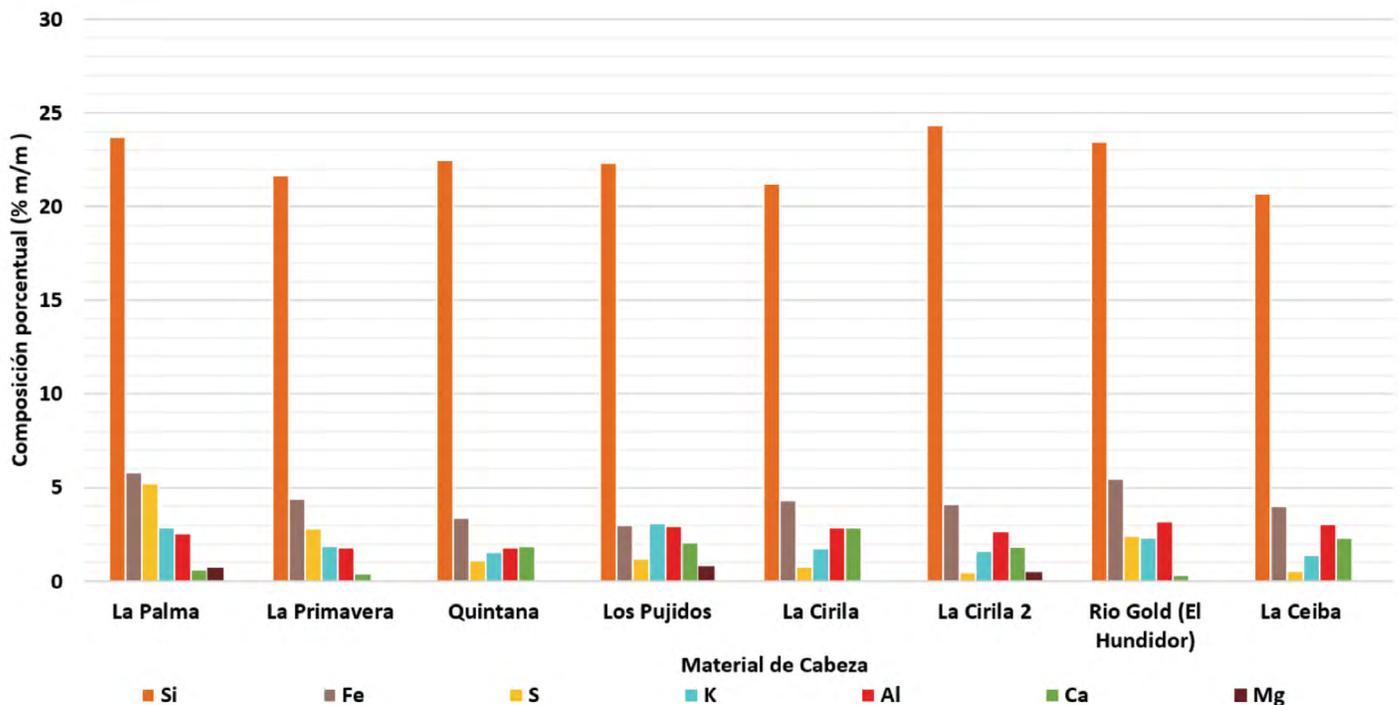
Las muestras complementarias presentan valores de pH cercanos a la neutralidad. Para el vertimiento de las colas de proceso de la planta El Hundidor se tiene un pH de 7,52, lo que indica la estabilidad de los relaves bajo las condiciones ambientales a las que se encuentran y que, aun presentando filtración, no generan drenajes ácidos. Para el agua superficial de la quebrada La Cianurada, en el sector de La Ceiba, se midió un pH de 7,41; este valor indica un contenido proporcional de especies tanto básicas como ácidas que logran neutralizarse y conservar esta condición casi neutra.

Para las aguas en contacto con los sedimentos activos aguas arriba y aguas abajo de la planta Quintana, los valores de pH son de 7,20 y 7,50, proporcionalmente. Para las muestras líquidas asociadas a los sedimentos activos aguas arriba y aguas abajo de la zona de La Cirila, los valores de pH son muy cercanos de 7,60 y 7,65, respectivamente. Esta condición, donde los valores de pH son relativamente parecidos en las aguas superficiales antes y después de que se presente actividad de beneficio de oro, es un indicio de que las especies activas no se alteran significativamente; al contrario, se conservan antes y después en el material procesado, evitando la adición de reactivos agresivos en el procesamiento metalúrgico.

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 de la composición mineralógica de los depósitos, aproximándose a las condiciones de formación y a su clasificación, así mis-

Figura 7.15. Composición de elementos mayores en el material de cabeza en los entables del distrito Remedios, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



Los resultados generados por esta técnica permiten hacer una caracterización elemental de la composición mineralógica de los depósitos, aproximándose a las condiciones de formación y a su clasificación. Asimismo, se puede crear una perspectiva desde los diferentes campos 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 en sedimentos activos y relaves, siendo de principal interés aquellos como los metales pesados y elementos tóxicos o generadores de drenaje ácido. Los resultados del análisis elemental por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) para las muestras de cabeza de proceso de los municipios de Remedios y Segovia se presentan en las figuras 7.15 y 7.16.

Estos resultados permitieron dilucidar que el material de cabeza de los entables y plantas en el municipio de Remedios contiene silicio en mayor proporción, encontrándose en un rango del 20,71 % al 24,31 %, 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 3 % y el 5,81 %, y que se le puede atribuir a la presencia de óxidos, silicatos y sulfuros de hierro incluidos en veta y roca hospedante. En este caso, dichos sulfuros están relacionados con el contenido de azufre que varía entre el 0,45 % y el 5,22 %, donde el mayor valor corresponde a los entables de La Palma (5,22 %), La Primavera (2,80 %) y Río Gold (El Hundidor) (2,39 %) (ver figura 7.15.).

Por otra parte, los resultados de FRX permitieron comprobar el contenido de elementos mayores como el potasio (K) entre un 1,40 % y un 3,10 %; y aluminio (Al) entre el 1,78 % y el 3,18 % (ver figura 221). Estos hallazgos 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 del 0,32 % al 2,86 %, por lo que se puede sugerir la presencia de carbonatos de calcio (CaCO₃) como calcita, lo cual indica, además, que hubo procesos de alteración hidrotermal durante el proceso de mineralización. Por último, el contenido de magnesio es del 0,48 % al 0,81 %, y es aportado, posiblemente, por minerales ferromagnesianos de las rocas hospedantes, cuya alteración genera arcillas cloríticas ricas en magnesio.

En cuanto a los elementos menores o traza contenidos en partes por millón (ppm) en el material de cabeza de los entables o plantas de Remedios (ver figura 7.16.), se pudo observar, gracias a la técnica de FRX, que en general el plomo y el zinc están presentes en cantidades relevantes con contenidos de plomo entre 40 ppm y 3500 ppm, mientras que el zinc se encuentran entre 50 ppm y 3800 ppm. Por otra parte, la relación de estos dos metales con el azufre presente en el material de cabeza muestreado en las diferentes minas mencionadas es un indicador de la presencia de esfalerita (ZnS) y galena (PbS).

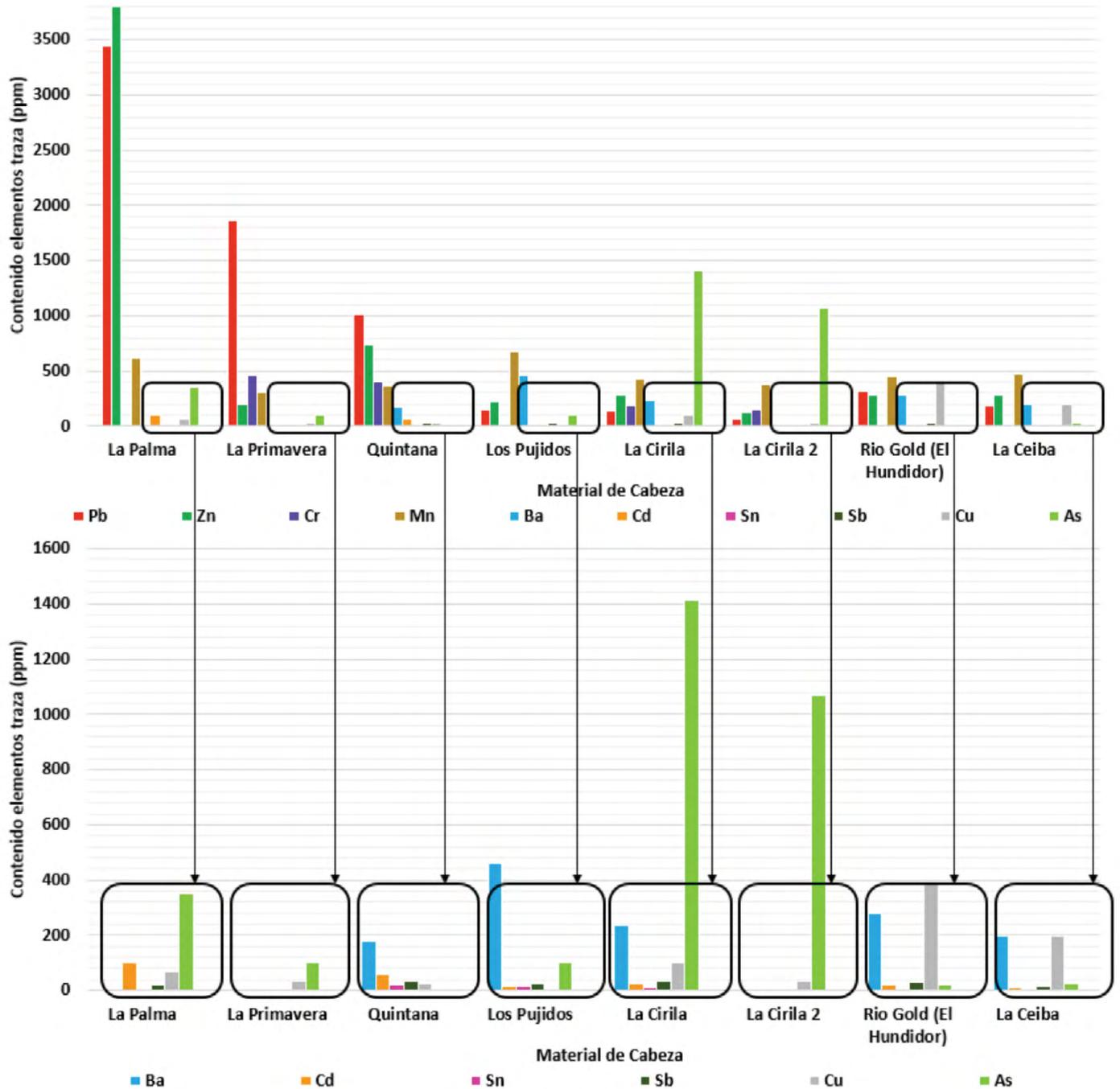
Otro de los elementos traza representativos es el arsénico, el cual se resalta en los entables La Palma, La Primavera, Los Pujidos y La Cirila, encontrándose entre 80 ppm y 1420 ppm. Este elemento detectado por el FRX puede ser atribuido a la presencia de arsenopirita (FeAsS) como mineral, tal y como se evidenció en resultados de petrografía (ver capítulo 4). También se encontró la presencia de elementos como el cromo en La Primavera (459,28 ppm), Quintana (406,46 ppm), La Cirila (181,08 ppm) y La Cirila 2 (151,09 ppm), ya que en ocasiones el cromo se encuentra asociado a elementos como hierro, arsénico, manganeso y bario (Ye y Wu, 2018), que se encuentran en material de cabeza de dichos entables.

El manganeso presente como elemento traza puede estar estrechamente relacionado con la presencia de hierro Fe³⁺, debido a que tanto el Mn³⁺, 4⁺, así como el Fe³⁺, son iones ferromangánicos (Railsback, 2012) presentes en roca hospedante, especialmente en las minas seleccionadas de Remedios, donde se aprecian contenidos de manganeso entre 310,26 ppm y 678,19 ppm.

El contenido de bario encontrado está relacionado con procesos hidrotermales tardíos que permiten la movilización de iones de calcio y bario, así como la precipitación de carbonatos. Mientras tanto, el cadmio está principalmente asociado con la esfalerita (Zhu et al., 2018). Entre los elementos que se encuentran por debajo de los 40 ppm están el antimonio y el estaño.

El cobre, por su parte, se encuentra como elemento traza en La Palma (6,89 ppm), La Primavera (34,48 ppm), Quintana (24,43 ppm), La Cirila (103,85 ppm), La Cirila 2 (34,49 ppm), Río Gold (El Hundidor) (391,74 ppm) y La Ceiba (199,36 ppm). Puede ser atribuido a la presencia de calcopirita.

Figura 7.16. Contenido de elementos traza en el material de cabeza en los entables del distrito Remedios, determinado por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.

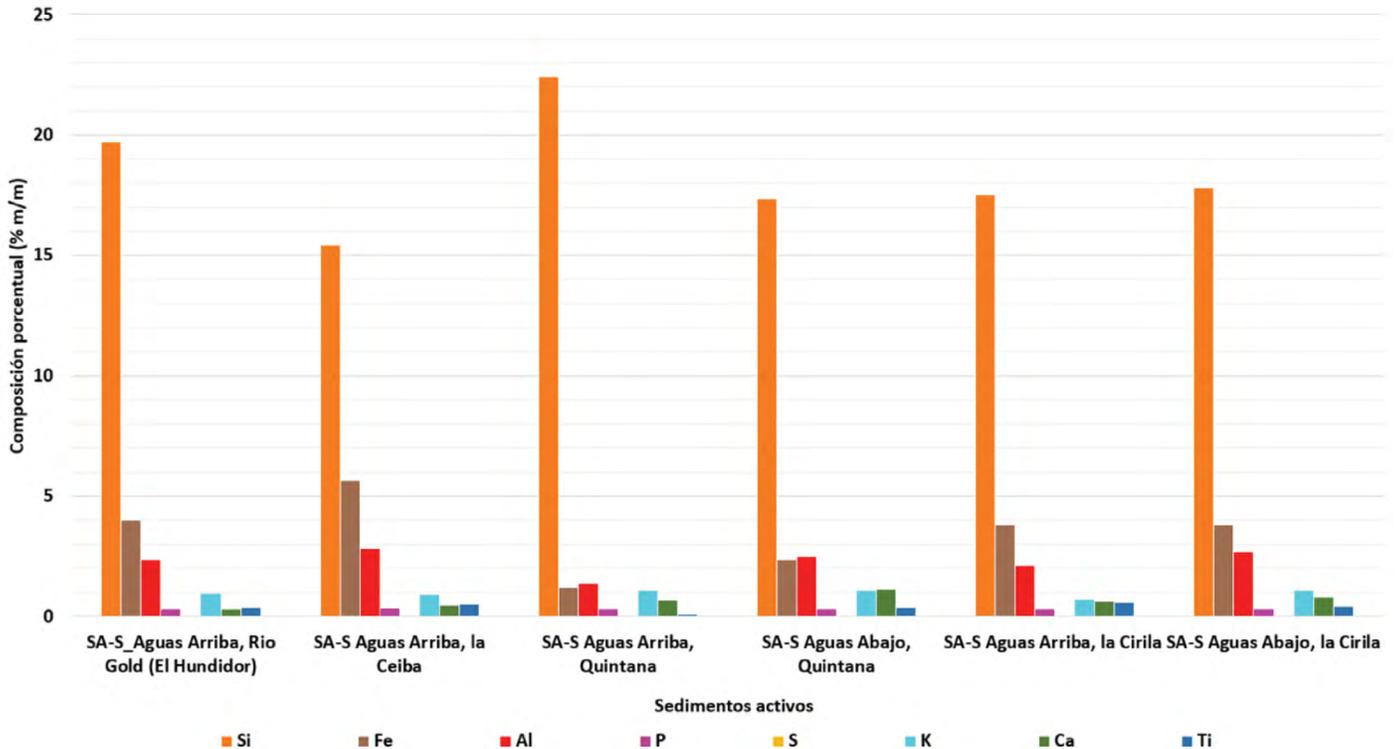


7.4.3. CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS ACTIVOS

7.4.3.1 ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN SEDIMENTOS ACTIVOS

De acuerdo con los resultados encontrados en los sedimentos activos del municipio de Remedios, se observan principalmente contenidos de silicio, hierro y aluminio como elementos mayores (figuras 7.17. y 7.18.). Estos se pueden relacionar con la presencia de silicatos y aluminosilicatos como grupos de minerales de mayor abundancia, pues constituyen el 95 % de la corteza terrestre y normalmente hacen parte de los se-

Figura 7.17. Composición de elementos mayores en sedimentos activos de quebradas o afluentes en el distrito de Remedios, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



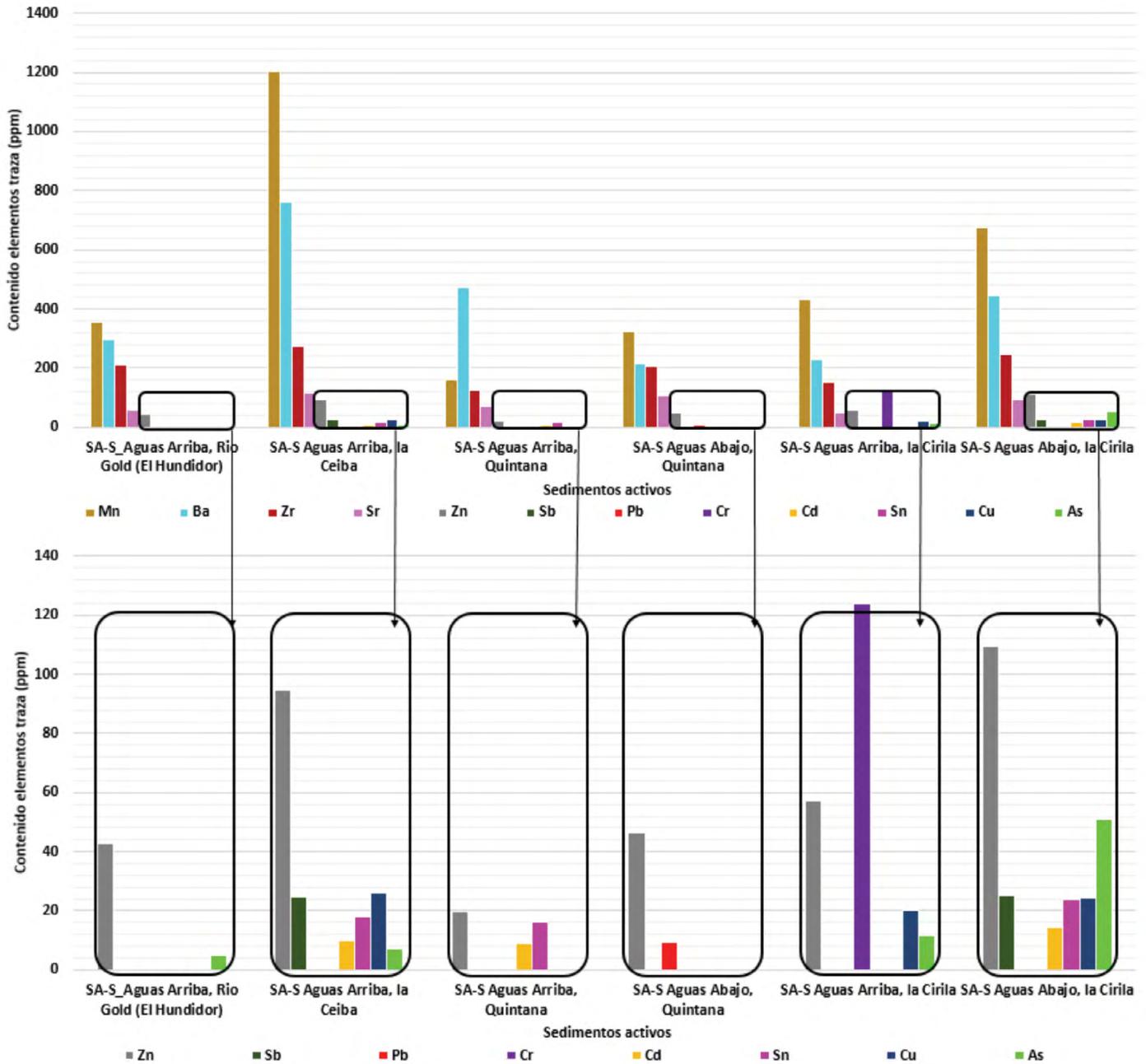
mentos activos, así como minerales contenedores de hierro, que para este caso son propios de la región. Otros de los elementos mayores detectados, aunque en baja proporción, pero no menos interesantes son titanio, fósforo, potasio y calcio, de origen geogénico; principalmente, los dos últimos pueden favorecer a controlar el pH de los afluentes muestreados. Estos resultados se encuentran dentro de los límites normales y al no evidenciarse la presencia de azufre, dichas quebradas o afluentes del municipio de Remedios no deben presentar acidez.

En cuanto al contenido de los elementos menores presentes en los sedimentos activos de las quebradas muestreadas en el municipio de Remedios, se encontraron metales pesados en mayor abundancia como el manganeso, bario y zirconio; los demás elementos menores (Sr, Zn, Sb, Pb, Cr, Cd, Sn, Cu y As) presentes como elementos traza se encuentran en menor abundancia.

Debido a que los sedimentos activos de las quebradas analizadas aguas arriba de la actividad minera presentan una similar o mayor cantidad de los elementos traza en comparación con los sedimentos activos aguas abajo de la actividad minera, se puede decir que dichos elementos en los sedimentos activos de Remedios son de origen geogénico, lo que quiere decir que son característicos de las zonas de estudio.

Referente al contenido de cromo presente como elemento traza determinado por la técnica de FRX, se aprecia que aguas arriba de la quebrada La Cirila contiene 123,80 ppm. Esta presencia representa un contenido de cromo de origen geogénico y que se da únicamente aguas arriba de la quebrada, por estar más cerca de la mina; sin embargo, se debe considerar que la presencia de otros minerales como óxidos de hierro inmoviliza al cromo y le da carácter de cromo trivalente no tóxico (Lilli, Nikolaidis, Moraetis, Kalogerakis y Karatzas, 2014), y por este motivo no presenta movilidad aguas abajo.

Figura 7.18. Contenido de elementos traza en sedimentos activos de quebradas o afluentes en el distrito de Remedios, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.

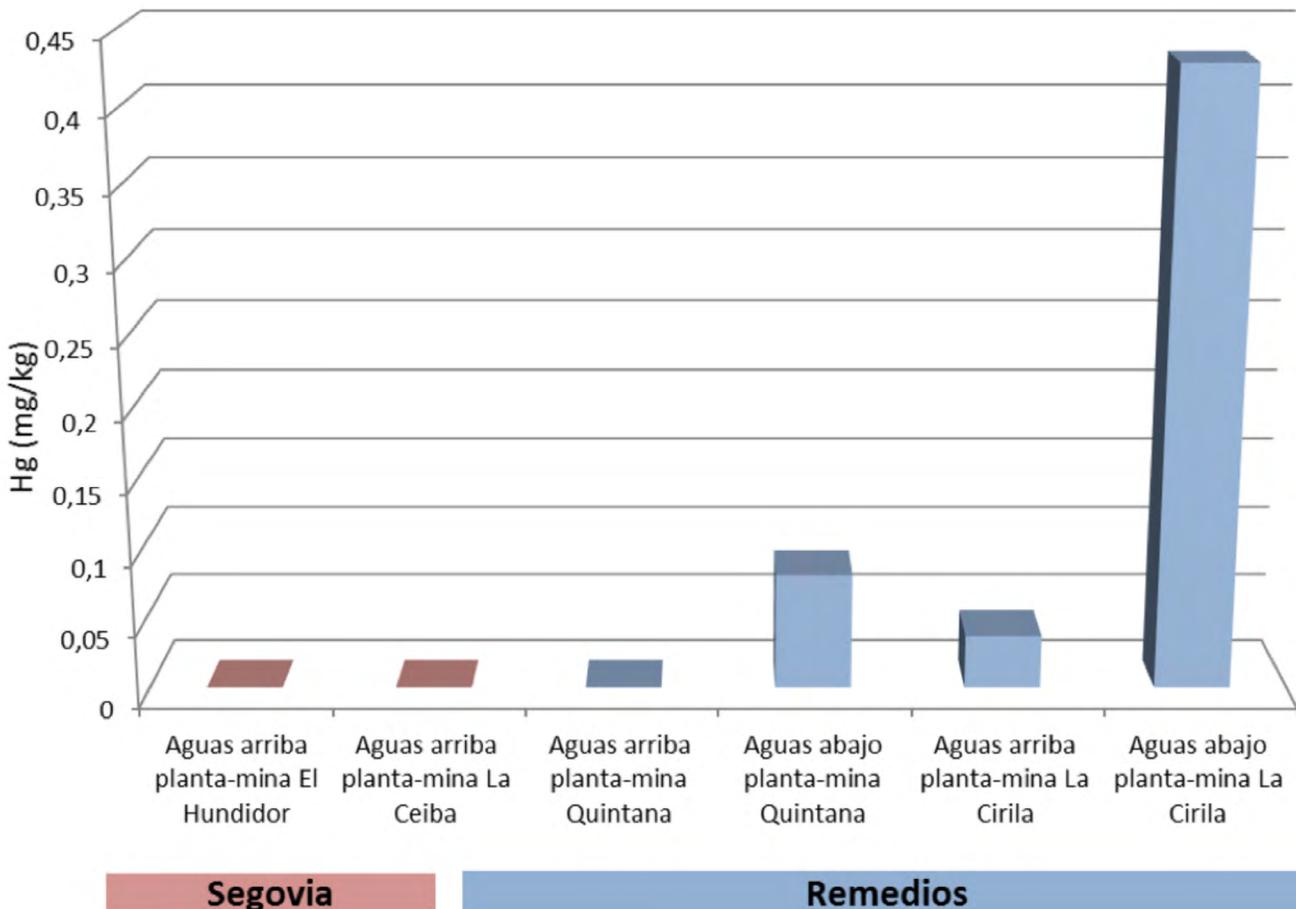


7.4.3.2. DETERMINACIÓN DE MERCURIO POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

En el análisis de mercurio de los sedimentos activos muestreados se encontraron valores representativos de este analito en la muestra tomada aguas abajo de la planta Quintana (0,081 mg/kg) y aguas arriba y aguas abajo de La Cirila (0,037 mg/kg y 0,429 mg/kg) (figura 225). A partir de los resultados se puede inferir que la actividad minera en Quintana tiene efectos negativos asociados al aumento de la concentración de mercurio luego del proceso de beneficio en esta planta. De igual manera, se observa una concentración de mercurio de 0,037 mg/kg antes de la planta La Cirila, y después de esta se presenta un aumento significativo de 0,392 mg/kg, lo cual indica que el proceso de beneficio de oro en esta planta repercute en sus aguas.

Dado que en Colombia no existe reglamentación de los niveles máximos permisibles de metales pesados

Figura 7.19. Determinación de mercurio en sedimentos activos por espectrofotometría de absorción atómica – generación de hidruros. Fuente: autores.



en sedimentos activos ni en suelo, en general, los resultados obtenidos se compararon con la legislación canadiense (Gaudet 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 la referencia bibliográfica sobre elementos traza en suelo, una concentración de mercurio entre 1 y 3 mg/L es tóxica 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.

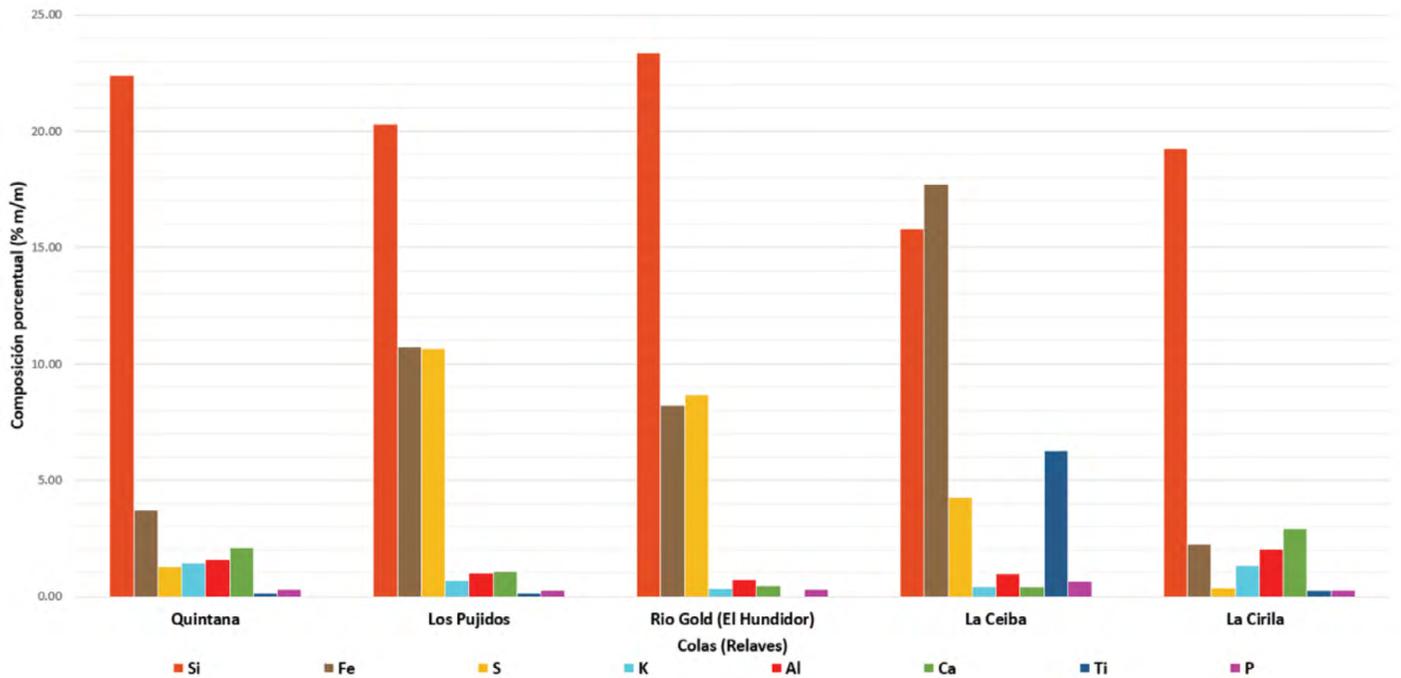
MacDonald, Ingersoll y Berger (2000) presentan valores de referencia del nivel de efecto umbral de mercurio TEC (por su sigla en inglés, Threshold Effect Concentration), que se define como la concentración que no debería tener efectos dañinos en los microorganismos que viven en contacto con el sedimento, para diferentes metales de interés ambiental. Para el caso del mercurio, se recomienda una concentración de 180 µg/kg, que indica ausencia de toxicidad. Dada esta recomendación, se puede decir que es probable que los organismos presentes aguas debajo de La Cirila estén siendo afectados por las concentraciones elevadas de mercurio determinadas en laboratorio.

7.4.4. CARACTERIZACIÓN DE RELAVES

7.4.4.1. ANÁLISIS DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN RELAVES

De acuerdo con los resultados de FRX mostrados en la figura 226, en las colas (relaves) de los entables muestreados en el municipio de Remedios, se encontró dentro de los elementos mayores una acumulación de silicio que oscila entre el 15 % y el 26 %, que proviene principalmente de las vetas cuarzosas extraídas de las respectivas minas y que se encuentran en el material de cabeza. También se encontraron elementos como hierro, azufre, potasio, aluminio, calcio, titanio y fósforo; sin embargo, se particularizan diferencias en

Figura 7.20. Composición de elementos mayores en las colas (relaves) en el distrito de Remedios, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



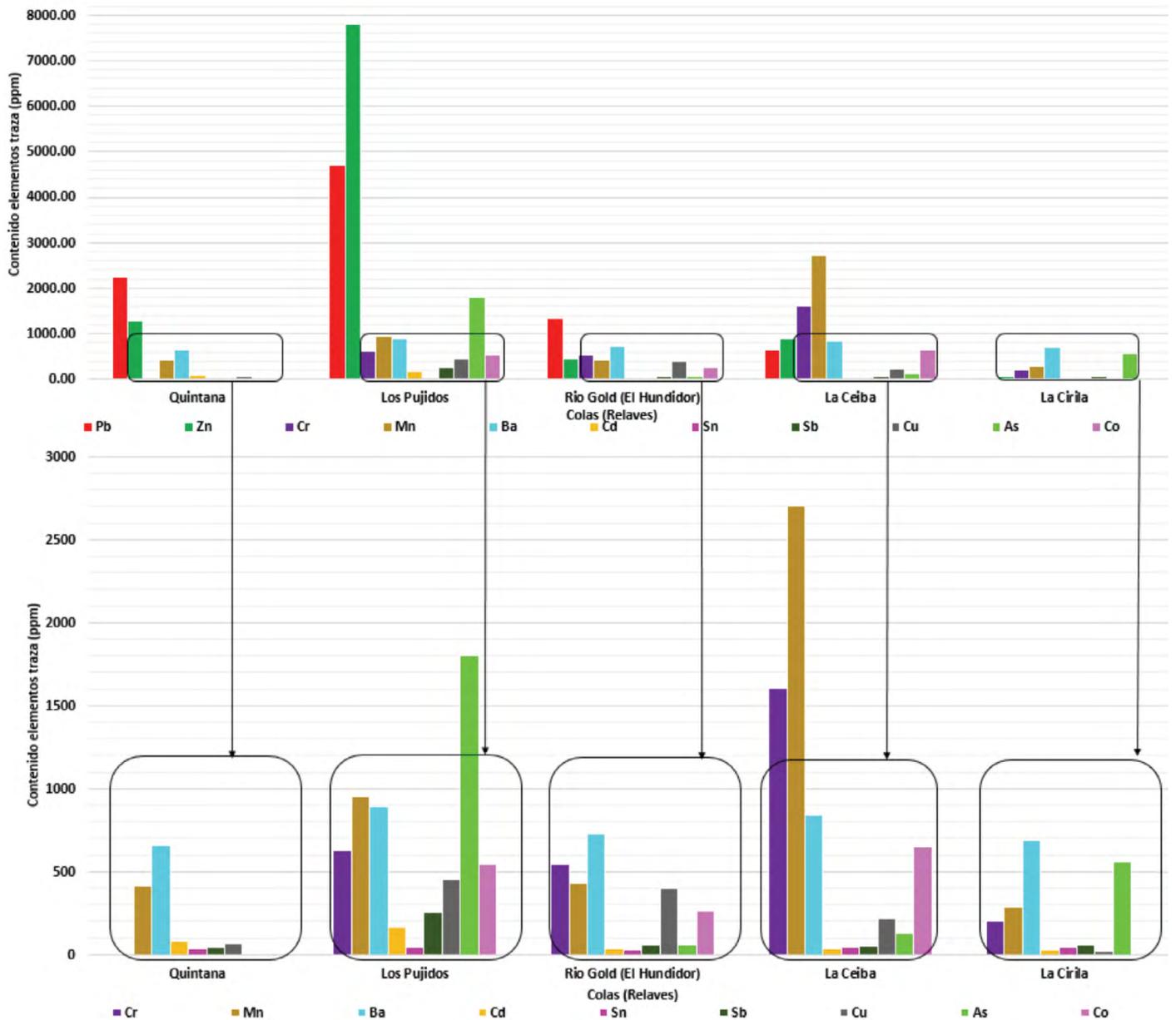
la composición porcentual de dichos elementos entre entables. Por ejemplo, en el relave del entable Los Pujidos se puede ver un mayor contenido de hierro (10,74 %) y azufre (10,65 %); en Río Gold (El Hundidor), 8,23 % de hierro y 8,64 % de azufre; en La Ceiba, 17,72 % de hierro y 4,27 % de azufre; en Quintana, 3,72 % de hierro y 1,29 % de azufre; y en La Cirila, 2,27% de hierro y 0,39% de azufre. Estos resultados se diferencian de los otros entables, donde se evidenciaron menores cantidades de dichos elementos.

Es importante tener en cuenta que los resultados para las muestras de los entables Los Pujidos, Río Gold (El Hundidor), La Cirila y Quintana corresponden a relaves; mientras que la muestra de La Ceiba corresponde a colas de proceso, que deben ser desechadas con pertinencia. Esto se recomienda ya que, a mediano plazo, la presencia de azufre residual puede ser contribuyente a la formación de drenajes ácidos, como consecuencia de la oxidación de sulfuros finos, en condiciones de exposición al agua o aire y catalizada por microorganismos; pues los drenajes ácidos asociados a la minería se caracterizan por contener hidrogeno, iones metálicos y sulfatos (Çelebi, Öncel y Kobya, 2018).

Por otra parte, se identificó el contenido de Potasio entre el 0,34 % y el 1,43 %, evidenciándose principalmente en Quintana y La Cirila. Su presencia 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 contacto. De otro lado, se encuentra el aluminio, que también presenta contenidos del 0,73 % al 2,10%, también proveniente de minerales arcillosos del material de cabeza. Mientras tanto, otro de los elementos mayores presente en los relaves en contenidos del 0,41 % al 2,93 % es el calcio, el cual puede atribuírsele a la calcita o carbonatos de calcio provenientes del material de cabeza de proceso. Para el caso de los relaves en el municipio de Remedios, puede ser conveniente la presencia de calcio como controlador de la acidez del medio de contacto. Por último, el fósforo encontrado en contenidos del 0,226 % al 0,65 % puede atribuírsele a apatitas provenientes del material de cabeza y que se han acumulado en los relaves estudiados.

En cuanto a los elementos menores en los relaves del municipio de Remedios se evidencia la acumulación de plomo y zinc, provenientes del material de cabeza como se describió antes (figura 227). En este caso, se aprecian contenidos que varían desde 20,45 ppm hasta 4707,62 ppm de plomo, y desde 78,46 ppm hasta 7809,06 ppm de zinc. En comparación con la cantidad de estos elementos en el material de cabeza se observa que es mayor en colas (relaves) (tabla 20), debido a la acumulación diaria proveniente del material residual arrojado por los entables de beneficio. Estos metales deben ser tenidos en cuenta porque son me-

Figura 7.21. Contenido de elementos traza en las colas (relaves) en el distrito de Remedios, determinada por la técnica de fluorescencia de rayos X. Fuente: autores.



tales pesados que pueden llegar a tener afecciones ambientales, del mismo modo que ocurre con el arsénico presente en los entables de Los Pujidos, Río Gold (El Hundidor), La Ceiba y La Cirila.

Figura 7.22. Relación de metales entre muestras de materiales de cabeza y relaves. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	Pb (ppm)		Zn (ppm)		As (ppm)	
	Material de cabeza	Relaves	Material de cabeza	Relaves	Material de cabeza	Relaves
Quintana	1008,25	2242,80	732,96	1273,28	D.L.C*	D.L.C*
Los Pujidos	149,80	4707,62	219,99	7809,06	101,05	1800,52
Río Gold (el Hundidor)	316,20	1334,18	284,50	457,27	19,69	61,56
La Ceiba	189,17	644,82	281,56	896,45	25,28	128,27
La Cirila	136,72	896,45	275,31	78,46	1411,33	556,04

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

Por otra parte, se logró evidenciar el contenido de cromo en los relaves de Los Pujidos (610 ppm), Río Gold (El Hundidor) (430 ppm) y La Cirila (200 ppm), en comparación con los datos del material de cabeza de dichos entables (ver figura 222), donde se observó que el cromo se encontraba por debajo de los límites de cuantificación en Los Pujidos y Río Gold. Entonces, la detección de cromo en los dos primeros relaves posiblemente se deba a residuos de procesos de beneficio anteriores al actual y en el que se trabaja un material de cabeza que puede presentar características diferentes a las del material de cabeza de tiempo atrás; mientras que en los relaves de La Cirila sí se evidencia el contenido de cromo en alrededor de 200 ppm en el material de cabeza.

Con respecto al bario y al manganeso, se observaron en los relaves muestreados en el municipio de Remedios cantidades que oscilan entre 220 ppm y 850 ppm para el primero y 220 ppm y 880 ppm para el segundo. También se detectó cadmio en cantidades desde 26,05 ppm hasta 165,43 ppm, que pueden ser asociadas a la presencia de esfalerita (ZnS₂). El estaño se encuentra por debajo de 50 ppm. El cobre registró 449,50 ppm en Los Pujidos, 401,11 ppm en Río Gold (El Hundidor) y 221,39 ppm en La Ceiba, mientras que en los demás sitios muestreados apenas estuvo por debajo de los 70 ppm. En este caso, para los relaves de Río Gold (El Hundidor), se puede evidenciar que este metal proviene del material de cabeza (ver figura 222), mientras que para Los Pujidos no se evidencia proveniencia de su respectivo material de cabeza actual, lo que conduce a pensar en residuales de material de cabeza antiguos. Para finalizar, el cobalto detectado puede relacionarse con manganeso y la roca hospedante, posiblemente de un material de cabeza antiguo.

7.4.4.2. DETERMINACIÓN DE METALES POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN RELAVES

Figura 7.23. Resultados del contenido de metales en relaves del municipio de Remedios (Antioquia). Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	Pb (mg/kg)	Cr (mg/Kg)	Cd (mg/kg)	Ag (mg/kg)	Zn (mg/Kg)	Hg (mg/kg)
Relaves mina Río Gold Remedios	492,96	133,51	19,00	23,27	431,6	80,83
Relaves La Quintana Remedios	809,66	D.L.C	67,52	7,50	696,92	0,23
Relave de cianuración Hg Los Pujidos	1246,89	190,24	126,43	37,15	6849,43	64,65

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

La determinación de metales de interés ambiental por espectrofotometría de absorción atómica permitió establecer sus concentraciones y relacionarlos con las consecuencias asociadas a ellos (figura 7.23.).

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 superan los 100 mg/Kg. La presencia de plomo en los relaves se asocia a la presencia de minerales que contienen este elemento en las minas de donde se extrae el material para realizar el beneficio del oro, principalmente, galena.

El cadmio cuantificado se debe a su presencia en las rocas madre, en las que se formó el suelo; en ellas, según el estudio petrográfico de la zona, hay contenidos apreciables de esfalerita (ZnS), un mineral de zinc al cual se asocia el cadmio debido a su afinidad química. En el ambiente, el cadmio genera efectos altamente tóxicos que inhiben los procesos metabólicos de los organismos vivos. En los relaves de Quintana (67,52 mg/kg) y Los Pujidos (126,43 mg/kg), se presentan concentraciones que representan un riesgo potencial para la salud y el ambiente.

Por su parte, el cromo estuvo por debajo del límite de cuantificación en el relave de Quintana, pero en Río Gold y Los Pujidos se cuantificaron concentraciones de 133,5 mg/kg y 190,2 mg/kg respectivamente. La plata cuantificada en los relaves se debe a los minerales de este elemento abundantes en la zona.

Con respecto al mercurio (Hg), en Río Gold y en Los Pujidos, se cuantificaron 80,83 mg/kg y 64,65 mg/kg, respectivamente. Aunque el Hg se encuentra en menor proporción que metales como el zinc (Zn) y el plomo

(Pb), su concentración es altamente tóxica, teniendo en cuenta que, según la literatura, este metal no debe superar los 3 mg/kg en suelos; de lo contrario, representa un riesgo para el desarrollo normal de las funciones biológicas de plantas y animales que entren en contacto con él (Kabata Pendias, 2001).

Según los resultados, el zinc es el elemento que predomina en el relave de Los Pujidos (6849,43mg/kg), y en una concentración significativa en Río Gold (431,6 mg/kg) y Quintana (696,92 mg/kg). La ocurrencia del zinc se debe a minerales como la esfalerita que, según el estudio petrográfico, presentado en el capítulo de geología, se encuentra en la zona estudiada.

7.4.5. PRUEBAS AMBIENTALES EN RELAVES

7.4.5.1 TCLP

La prueba TCLP se realizó a 3 muestras correspondientes a relaves de las plantas Río Gold, Quintana y Los Pujidos. A continuación, se presenta la descripción de las muestras tomadas y los resultados de la determinación de plata (Ag), plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg) (tabla 22), los cuales son metales pesados de interés ambiental que se encuentran en la lista de contaminantes tóxicos del 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.

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)
Relaves mina Río Gold Remedios	4,3968	D.L.C	D.L.C	D.L.C	0,0102
Relaves La Quintana Remedios	1,5133	D.L.C	0,0309	D.L.C	D.L.C
Relave de cianuración Hg Los Pujidos	48,3737	D.L.C	0,1376	D.L.C	D.L.C

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

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. Estos resultados se comparan con el Decreto 4741 de 2005 (figura 7.25.), 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 espectrofotometría de absorción atómica de plata ni cromo en ninguna de las muestras tomadas en campo de las plantas visitadas.

La muestra 7681 de Río Gold presenta una concentración de mercurio igual a 0,0102 mg/L, la cual no excede los límites máximos permisibles establecidos en la norma colombiana. Según el reporte, en Quintana y en Los Pujidos no se presenta mercurio lixiviable. Por otro lado, en estas últimas se presentaron concentraciones de cadmio entre 0,0309 mg/L y 0,1376 mg/L, los cuales se encuentran por debajo de la exigencia para este analito, que debe encontrarse en el lixiviado en una concentración de 1 mg/L.

En la figura 228 se observa una concentración apreciable de plomo en Los Pujidos (48,37 mg/L), excediendo lo establecido en el Decreto 4741 de 2005, que es de 5 mg/L. Esto se puede relacionar con la naturaleza ácida del relave, cuyo pH resultó igual a 5,56 unidades, lo cual favorece la movilidad de este metal en el ambiente. Por su parte, el relave de Quintana presenta un contenido de plomo lixiviable de 1,51 mg/L, ubicándose a 3,49 unidades del límite permisible. Finalmente, en el relave de Río Gold se obtuvo una concentración de plomo de 4,40 mg/L, que, aunque se encuentra por debajo del máximo permisible en el Decreto 4741 de 2005, no se descarta la posibilidad de que genere toxicidad, dado que se acerca a 5 mg/L. 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.

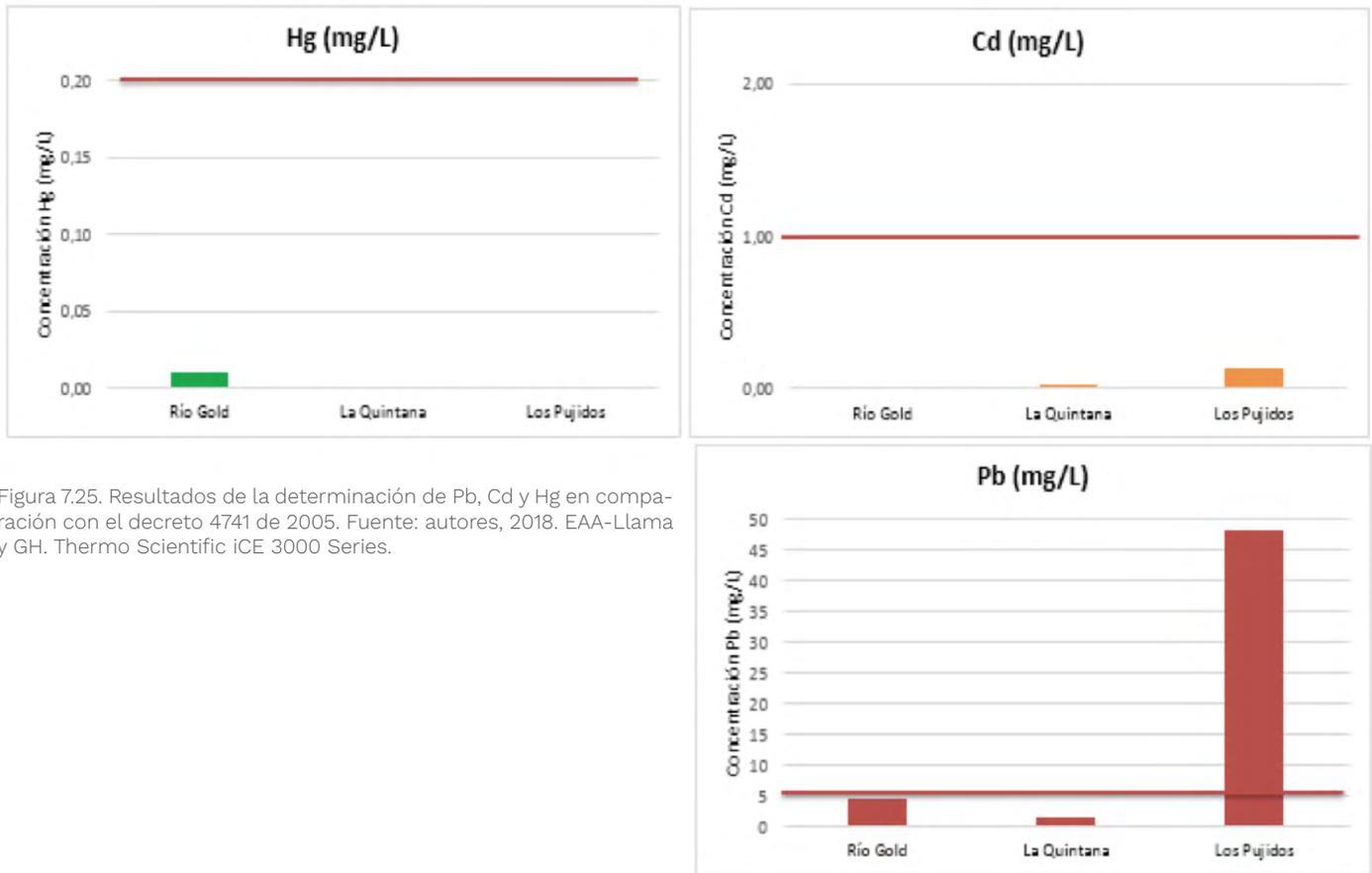


Figura 7.25. Resultados de la determinación de Pb, Cd y Hg en comparación con el decreto 4741 de 2005. Fuente: autores, 2018. EAA-Llama y GH. Thermo Scientific ICE 3000 Series.

7.4.5.2. ABA

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 7.26. presenta un esquema del procedimiento experimental que se lleva a cabo para predecir el DAM.

Figura 7.26. Procedimiento Test ABA Modificado. Fuente: autores.



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 que fueron visitadas. En la tabla 23 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 7.27. Muestras de relaves de las plantas de benéfico de Remedios (Antioquia). Fuente: autores.

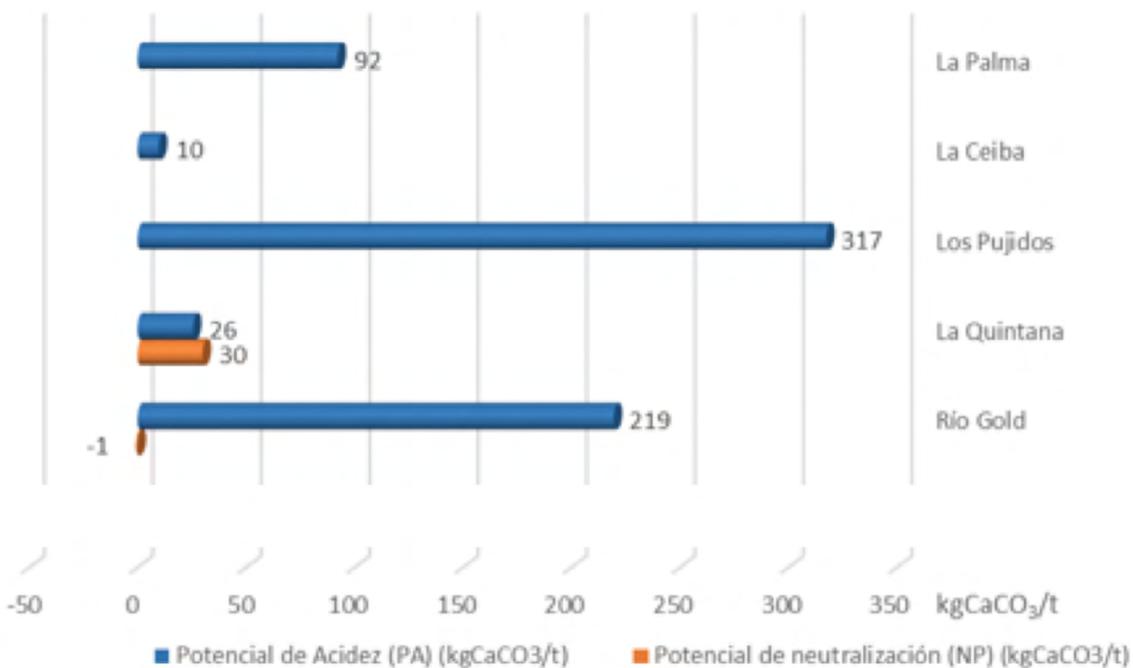
DESCRIPCIÓN	pH EN LABORATORIO (UNIDADES)	CARBONATOS (%)
Relaves mina Rio Gold Remedios	5,46	2,34
Relaves La Quintana Remedios	8,75	4,07
Relave de cianuración Hg Los Pujidos	5,56	2,95
Colas de cocos mina La Ceiba Remedios	3,27	1,13
Colas cocos Hg La Palma	6,97	2,29

En la figura 7.28. 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 drenaje ácido de minas.

Figura 7.28. Resultados obtenidos para el Test ABA en los relaves visitados. 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
Relaves mina Rio Gold Remedios	-0,80	219,47	-220,27	0,00	Alto potencial de generación de DAR
Relaves La Quintana Remedios	30,02	25,57	4,45	1,17	Potencial marginal de generación de DAR
Relave de cianuración Hg Los Pujidos	10,99	317,50	-306,51	0,03	Alto potencial de generación de DAR
Colas de cocos mina La Ceiba Remedios	-14,17	9,70	-23,87	-1,46	Alto potencial de generación de DAR
Colas cocos Hg La Palma	7,05	92,17	-85,12	0,08	Alto potencial de generación de DAR

Figura 7.29. Resultados de aplicación de Test ABA modificado. Fuente: autores.



En los resultados presentados en la figura 7.28 y 7.29, se evidencia un potencial de acidez elevado en las muestras analizadas que mantiene una correlación directa con los reportes de FRX presentados en la figura 226, en los cuales se observan concentraciones apreciables de sulfuros polimetálicos y bajas concentraciones de carbonatos en las plantas de minería de oro de Remedios.

En los relaves estudiados, 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/t (CIMMT, 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 solubilicen los metales contenidos en las rocas y drenen a fuentes hídricas cercanas contaminándolas por la acumulación de metales pesados o por el pH bajo.

Los resultados del Test ABA indican que todas las muestras de relaves tomadas en las plantas de beneficio de Remedios y Segovia presentan un alto potencial de generación de drenaje ácido de minas, a excepción del relave de la planta Quintana. Este presenta una característica particular a todos los casos estudiados, pues existe un potencial de neutralización y de acidez semejantes que, por medio del Test ABA Modificado, no dan certeza de la generación del DAM. Para este caso es recomendable usar test dinámicos con los cuales se llegue a un resultado más claro.

Este resultado está relacionado con la presencia de carbonatos, los cuales reaccionan con el ácido generado por los sulfuros polimetálicos y que neutraliza en cierto grado la acidez del medio. De acuerdo con los resultados, la muestra analizada presenta 4,07% de carbonatos totales, un contenido alto, en comparación con los obtenidos en las demás muestras. Además, el pH del suelo medido en el laboratorio es básico, de manera que es de esperarse que exista una capacidad de neutralización apreciable.

Dados los pH de la pasta de las muestras de las plantas Río Gold, Los Pujidos y La Palma, que tienen tendencia a la acidez, y porcentaje de carbonatos entre el 1,13 % (La Palma) y el 2,95 % (Los Pujidos), se confirma la hipótesis de la baja capacidad de neutralización de acidez.

El estudio petrográfico presentado en el capítulo de geología, indica la presencia de sulfuros polimetálicos como pirita masiva y fina (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). En contraste, el contenido de minerales capaces de neutralizar la acidez generada por los minerales mencionados es bajo, de manera que el balance ácido base tiende a ser negativo.

7.4.5.3. CARACTERIZACIÓN DE VERTIMIENTOS

Como parámetro fundamental en la evaluación de los vertimientos se hace una medición de pH *in situ* en la toma de la muestra, con el objetivo de hacer una identificación aproximada del estado e influencia ambiental en el sector de los relaves o materiales residuales de 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 generación de drenajes ácidos.

Los vertimientos muestreados en la zona minera de Remedios, provenientes de los procesos de beneficio, fueron caracterizados bajo los parámetros representativos a nivel ambiental, siendo de gran importancia la determinación de compuestos como el cianuro y de metales pesados y bioacumulables como mercurio, níquel, cromo, cadmio, plomo, zinc, hierro, cobre y plata (figura 7.30.). De los resultados obtenidos de pH se tiene un valor básico para el vertimiento de Río Gold (El Hundidor) de 7,52, y para los vertimientos de las plantas de La Ceiba y Quintana se obtuvieron valores ácidos de 4,24 y 6,50, respectivamente. Teniendo presentes los valores permisibles, están establecidos en un rango entre 6.00 y 9.00 unidades de pH, se debe manejar un control con los vertimientos generados por los relaves que no cumplan con dicha condición.

La Figura 7.31 corresponde al resultado de la determinación de Hg en los vertimientos de El Hundidor, La Ceiba y Quintana. En la caracterización de este metal la muestra que presentó concentración cuantificable por la técnica empleada (espectrofotometría de absorción atómica, generador de hidruros GH-AAS, límite menor 2,0 ppb) fue el vertimiento de los relaves de procesamiento de la planta de beneficio El Hundidor con

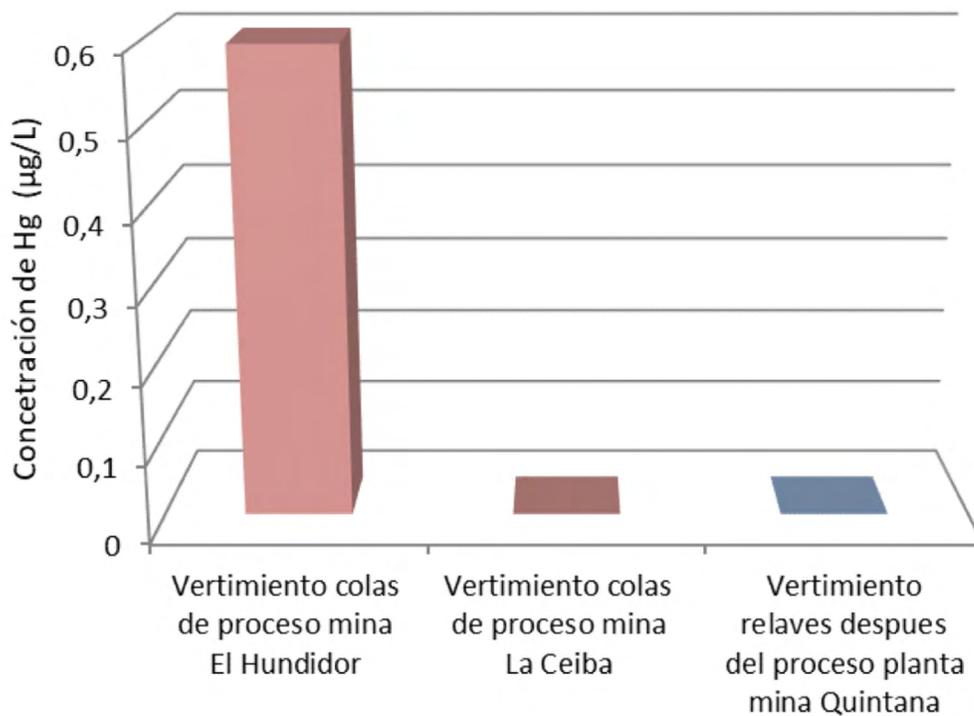
Figura 7.30. Contenido de metales de interés ambiental en los vertimientos muestreados en el municipio de Remedios – Antioquia. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	mg/L								µg/L
	Ag	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Hg
Planta El Hundidor	0,267	0,067	56,88	0,228	0,097	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	0,596
Planta La Ceiba	D.L.C.	D.L.C.	0,876	2,703	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.
Relavera de Quintana	D.L.C.	0,019	3,242	0,292	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.	D.L.C.

D.L.C. = Debajo de límite de cuantificación.

un valor de 0,596 µg/L (0.0006 mg/L); la concentración en las demás muestras no fue cuantificable. Aunque se presenta concentración de Hg para el vertimiento de El Hundidor, esta se encuentra por debajo del límite según lo establecido en la Resolución n.º 631 de 2015, que indica para aguas residuales provenientes de actividades mineras una concentración máxima de mercurio de 0,002 mg/L, equivalente a 2,00 µg/L; de modo que este vertimiento cumple con el parámetro ambiental.

Figura 7.31. Determinación de mercurio en vertimientos por espectrofotometría de absorción atómica – generación de hidruros. Fuente: autores.



La presencia de Hg en bajas concentraciones en las aguas relacionadas con los procesos de beneficio debe considerarse como un indicador para prevenir el uso del metal y, así, un aumento en 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 la caracterización general de los metales cuantificados (Tabla 7.30), se identifica la presencia de hierro en los tres vertimientos, encontrándose en la concentración permitida bajo el parámetro ambiental (límite de hierro es máximo 2,00 ppm). Solo el vertimiento de la planta La Ceiba tiene una concentración de 0,856 ppm. El vertimiento de la mina Quintana está levemente por encima del valor máximo, con una cantidad de 3,242 y el vertimiento El Hundidor presenta una concentración significativa de 56,88 ppm. Esta característica del contenido de hierro en el Hundidor puede estar relacionada con el alto porcentaje de pirita respecto a otros minerales, el cual está compuesto de sulfuro de hierro. Adicionalmente, pero en menor proporción, se

encuentra también la esfalerita en la mineralogía del sector para El Hundidor, la cual es un sulfuro de zinc. El zinc también está presente en las tres muestras, de las cuales el vertimiento de la planta El Hundidor tiene una concentración de 0,228 ppm, la planta de Quintana de 0,292 ppm y la planta de La Ceiba de 2,703 ppm; estos valores se ubican dentro del límite establecido ambientalmente (límite de zinc máximo de 3,00 ppm).

La presencia de los demás metales cuantificados en los vertimientos no representa una influencia significativa en el aporte de estas especies a los cuerpos de agua cercanos (Resolución n.º 631 de 2015). Entre los analitos medidos para la muestra de El Hundidor se presentaron la plata (0,267 ppm), el plomo (0,097) y el cobre (0,067 ppm) en concentraciones muy bajas. Para la mina Quintana se detectó cobre con un valor de 0,019 ppm. Para el cadmio, el cromo y el níquel las concentraciones no fueron detectables por la técnica empleada (espectrofotometría de absorción atómica-llama con un límite de detección de 0,2mg/L).

Figura 7.32. Determinación de mercurio en vertimientos por espectrofotometría de absorción atómica – generación de hidruros. Fuente: autores. FRX. Volumetría. AgNO₃ – KI. Sugiyama CN-S. Environmental Science.

PLANTA ASOCIADA	CN ⁻ LIBRE (mg/L)	CN ⁻ Total (mg/L)
Planta El Hundidor	D.L.C.	D.L.C.
Planta La Ceiba	D.L.C.	D.L.C.
Relavera de Quintana	D.L.C.	D.L.C.

En las determinaciones de cianuro libre y cianuro complejo en los vertimientos muestreados (figura 7.32.), no fue cuantificable la concentración del analito para las especies ya mencionadas. Este resultado es un buen indicador de que no se están generando liberación de ácido cianhídrico en los vertimientos de pH ácido, el cual es un compuesto muy tóxico. Además, el no detectar complejos de cianuro indica que no se están generando complejos metálicos con este anión (CN⁻), principalmente los que forma con el mercurio (Hg(CN)₂ y Hg(CN)₄) que son estables y de difícil remoción, como sería el caso del vertimiento de El Hundidor, que reportó concentración de este último componente.

Figura 7.33. Caracterización química y ambiental de las muestras recolectadas en la zona la Cirila Remedios – Antioquia. Fuente: autores.

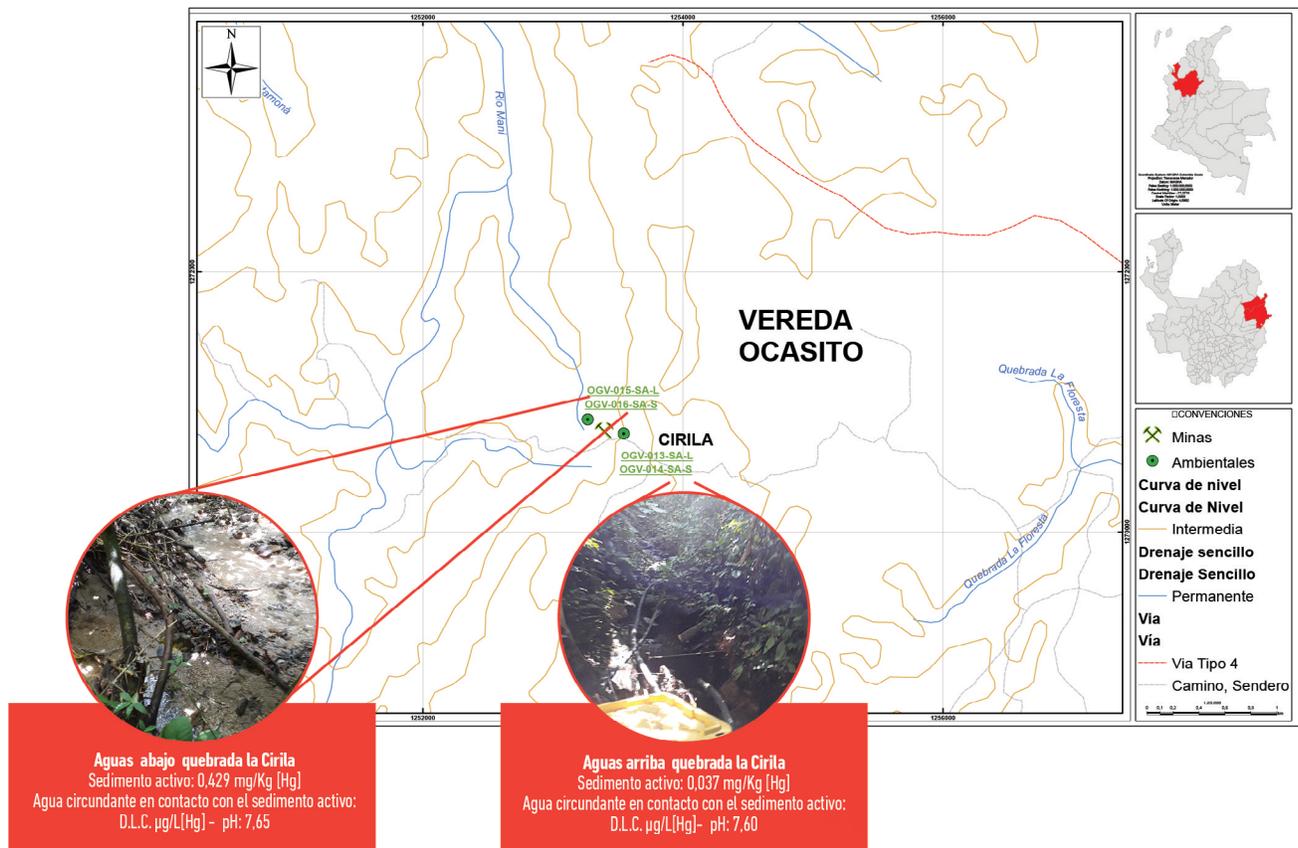


Figura 7.34. Caracterización química y ambiental de las muestras recolectadas en la zona de La Ceiba Remedios – Antioquia. Fuente: autores.

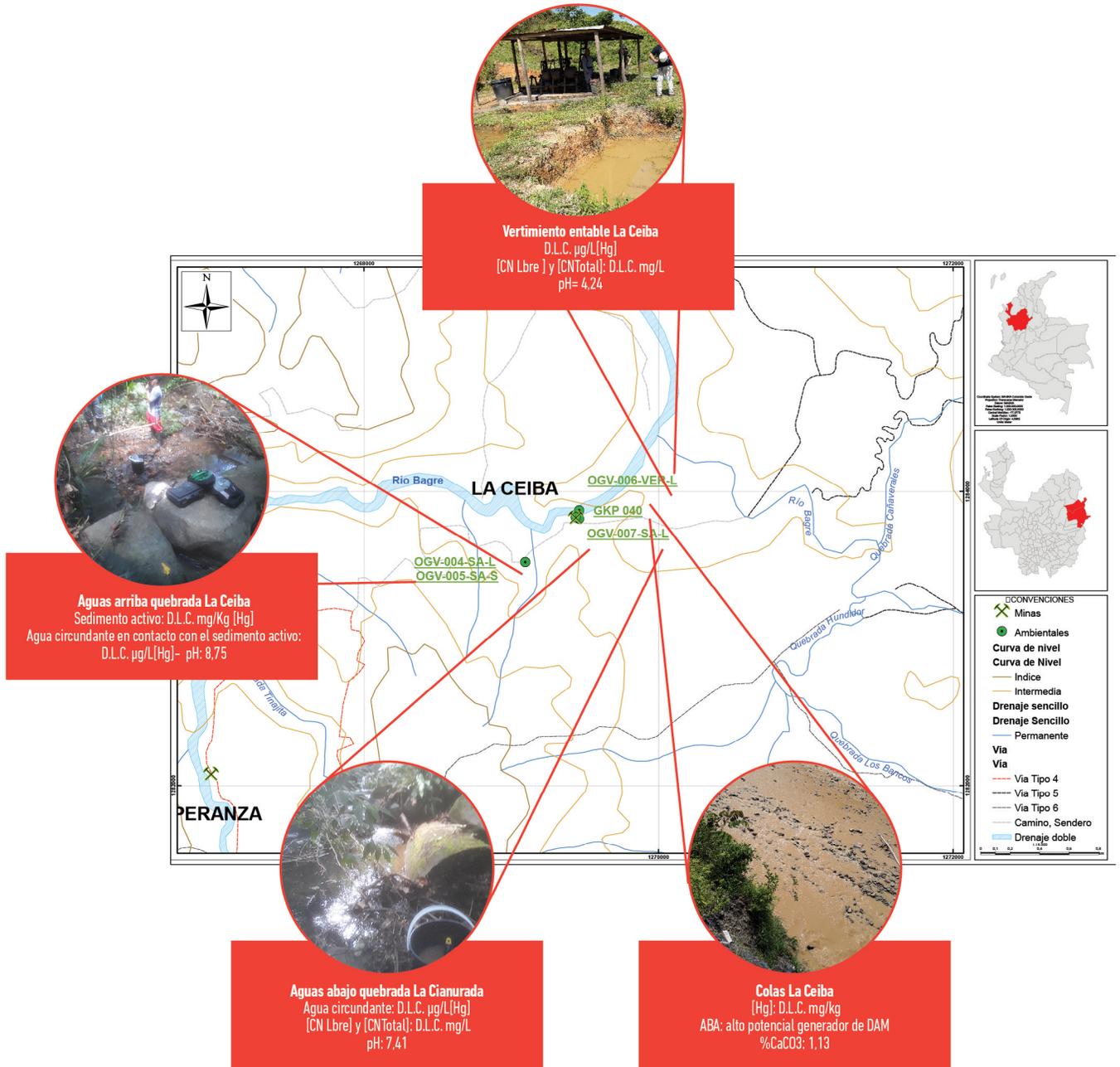


Figura 7.35. Caracterización química y ambiental de las muestras recolectadas en la zona Quintana Remedios – Antioquia. Fuente: autores.

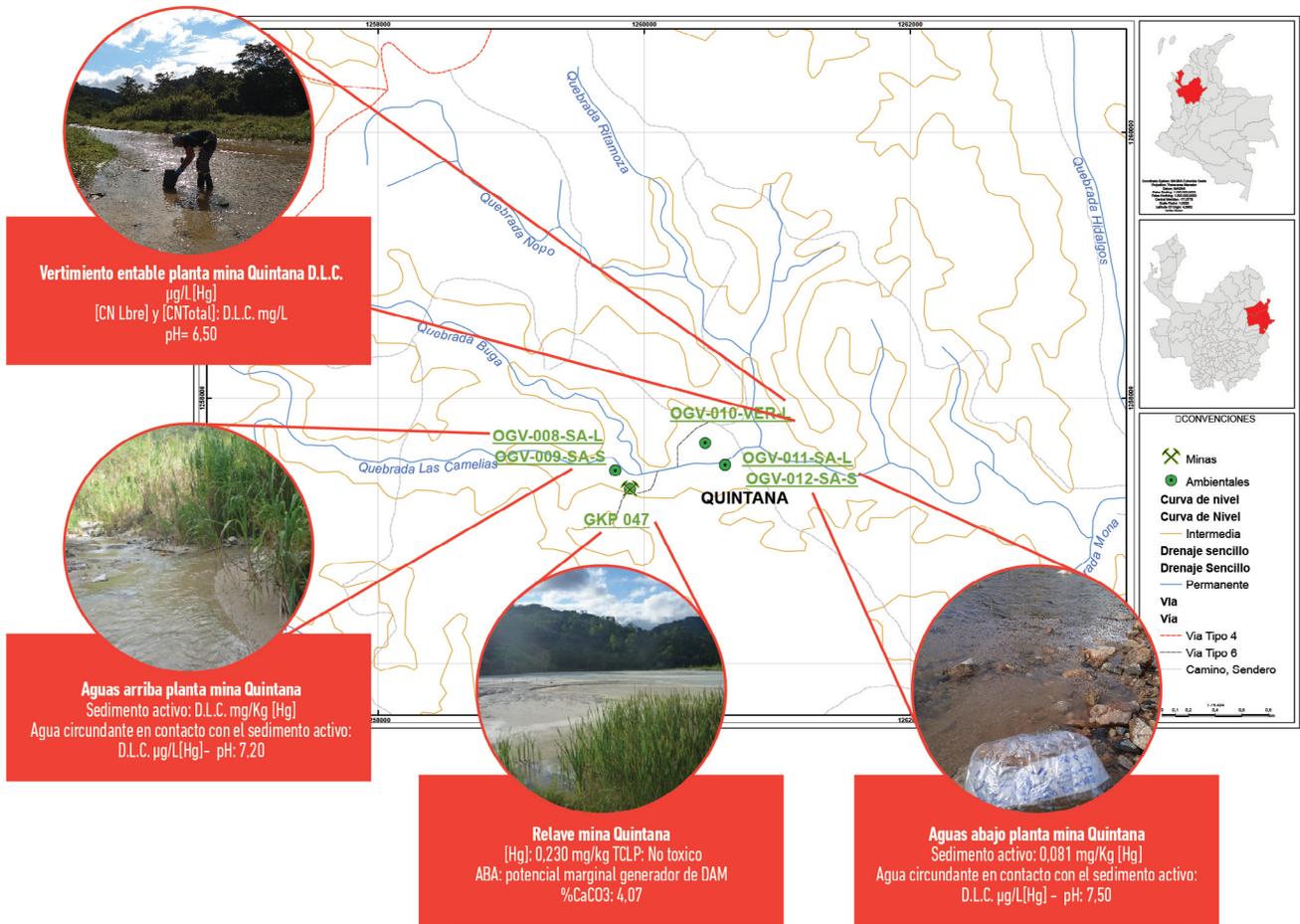
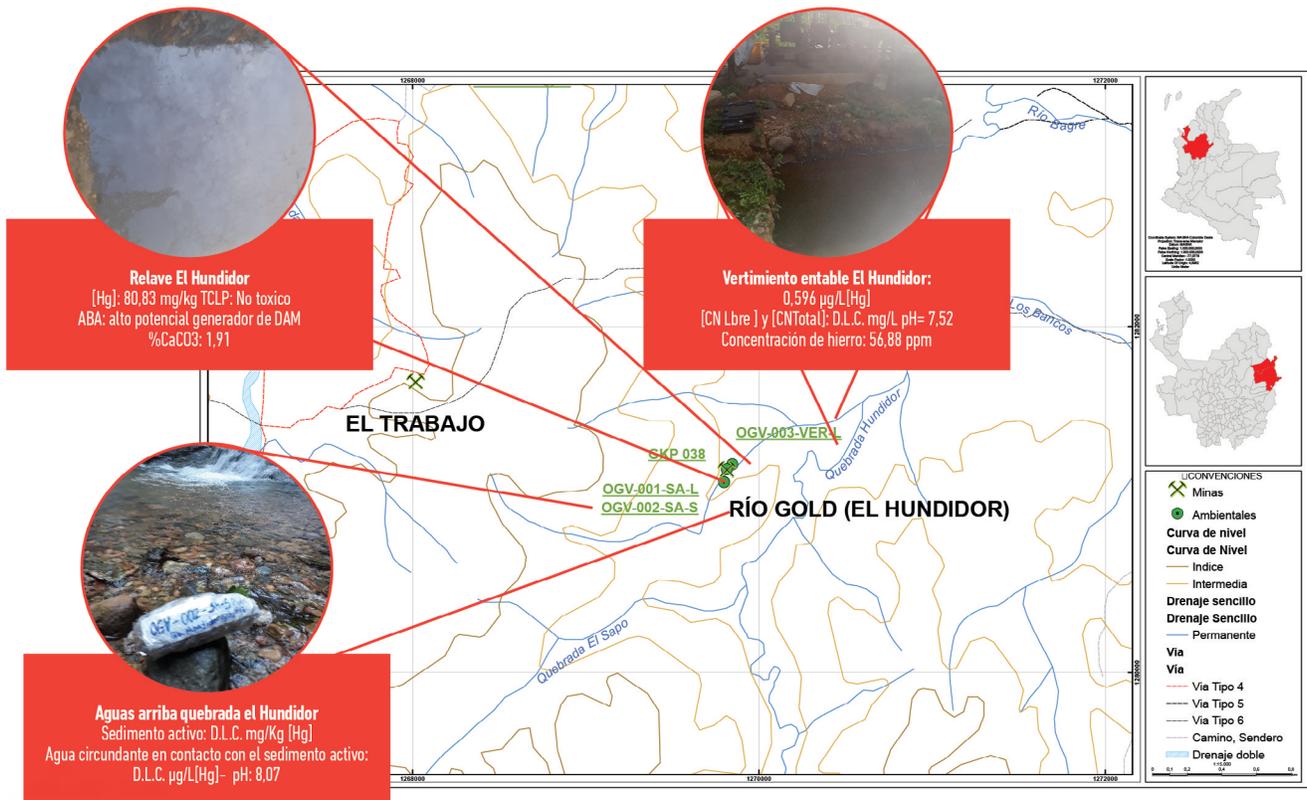


Figura 7.36. Caracterización química y ambiental de las muestras recolectadas en la zona de El Hundidor Remedios – Antioquia. Fuente: autores.



7.5. CONCLUSIONES QUÍMICAS Y AMBIENTALES

- Aunque cada punto de muestreo presenta su naturaleza fisicoquímica, existe una tendencia básica en las muestras líquidas en contacto con los sedimentos activos tomados en el sector estudiado de Remedios; este comportamiento es un indicador de la solubilidad de carbonatos en el medio. Dicha composición aparece descrita en los análisis geológicos de la zona mineralizada que se visitó y se relacionan con especies propias de la formación de sales de carbonatos con metales alcalinos, presentes en la caracterización por FRX de los sedimentos activos relacionados. Así, se exhiben concentraciones para calcio entre el 0,294 % y el 1,14%; para potasio entre el 0,71 % y el 1,11 %; y para el bario de 216,54 ppm a 759,24ppm.
- Una característica común en los vertimientos provenientes de materiales residuales, como son los relaves, es encontrar un valor de pH menores a 7,00, que generalmente es el resultado de la descomposición por oxidación de sulfuros y que da lugar a la generación de acidez. Este fenómeno se da en los vertimientos de las plantas de La Ceiba (pH=4,24) y Quintana (pH=6,50, con presencia de pirrotina masiva), sectores que presentan sulfuros de hierro en concentración representativas. Si se toman las referencias de la caracterización de FRX para los relaves correspondientes a los vertimientos mencionados, se tiene para la Ceiba un contenido de hierro del 17,72 % y de azufre del 4,27 %, y para mina Quintana una concentración de hierro del 3,72 % y de azufre del 1,29%. Estos datos confirman la correlación entre la acidez de las muestras y el contenido de especies generadoras por oxidación.
- Algunos relaves que presenta minerales carbonatados tienen la capacidad de compensar los compuestos ácidos, favoreciendo que las filtraciones o vertimientos generados mantengan su pH cercano a la neutralidad. Este es el caso del vertimiento de la planta el Hundidor que tiene un pH de 7,52, el cual mantiene correlación con la descripción de la geología local que indica la presencia de carbonatos con un 15% de la composición principal de las rocas.
- Los patios de relaves o depósitos de colas generalmente no están confinados y están expuestos a los fenómenos meteorológicos del ambiente, tales como la humedad, temperatura, oxidación y radiación solar. Estos factores inducen diversas reacciones químicas en el depósito, que generan, entre otras cosas, acidez, iones solubles tales como los sulfatos y los iones metálicos propios de cada mineral. Tanto la acidez como los metales producen un daño ambiental de una magnitud que depende del caso específico. Se recolectaron muestras de relaves expuestos en entables y plantas de beneficio del municipio de Remedios para realizar su respectiva caracterización química, empleando técnicas instrumentales como la espectrofotometría de absorción atómica y la FRX.

Una característica común en los vertimientos provenientes de materiales residuales como son los relaves, es encontrar un valor de pH menores a 7,00 que generalmente es el resultado de la descomposición por oxidación de sulfuros y que da lugar a la generación de acidez, este fenómeno se da en los vertimientos de las plantas de la Ceiba (pH=4,24) y Quintana (pH=6,50 – pirrotina masiva) que son sectores que presenta sulfuros de hierro en concentración representativas tomando referencias de la caracterización de FRX para los relaves correspondientes a los vertimiento mencionados para la Ceiba un contenido de hierro del 17,72% y de azufre de 4,27% y para mina Quintana una concentración de hierro del 3,72% y azufre del 1,29%, confirmación así la correlación entre la acidez de las muestras y el contenido de especies generadoras por oxidación.

- A partir de los ensayos químico-ambientales se logró identificar un potencial de acidez elevado aportado por los sulfuros polimetálicos presentes en los relaves, que sufren procesos de oxidación y posterior formación de ácido sulfúrico. Esto modifica el pH natural de las fuentes de agua a las cuales drena, y afecta la fauna, la flora y el paisaje. Dado el resultado del potencial de acidez y el de neutralización de las muestras tomadas, a excepción de la de Quintana, se tiene un potencial neto de neutralización, indicador del balance de acidez-basicidad, inferior a 20 kgCaCO₃/t, y una relación de estos inferior a 3, lo cual indica que las muestras tienen baja capacidad de neutralización de acidez. Los resultados guardan relación con la determinación de los pH de la pasta de las muestras de las plantas Río Gold, Los Pujidos y La Palma, que tienen tendencia a la acidez, y porcentaje de carbonatos entre el 1,13 % (La Palma) y el 2,95 % (Los Pujidos), lo que disminuye la capacidad 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 facilitan 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 lixiviación característica de toxicidad (TCLP) se encontró que la muestra de Los Pujidos y Río Gold presentan concentraciones elevadas de plomo que, en el primer caso, sobrepasan los límites permisibles establecidos en el Decreto 4741 de 2005.
- A partir del análisis de espectrofotometría de absorción atómica (EAA), para la determinación de metales en los relaves de Río Gold, Quintana y Los Pujidos, se concluye la presencia en concentraciones elevadas de plomo y zinc, principalmente, los cuales representan un riesgo ambiental significativo a especies de flora y fauna. Se relaciona la ocurrencia de estos de estos metales por la acumulación, en los relaves, de minerales de plomo como la galena y de zinc como la esfalerita. De igual forma, las concentraciones de mercurio cuantificadas por EAA, particularmente, en Río Gold y Los Pujidos, son altas. Según la literatura consultada, y dada la acidez del medio, es probable que este metal se movilice hacia las fuentes de agua superficiales, trasladando la contaminación al medio acuático.
- Se resalta también el cromo, el cadmio y la plata como metales pesados que, al igual que los anteriores, contribuyen al desequilibrio natural del medio, dado que, por ser metales pesados, pueden bioacumularse y biomagnificarse, transfiriendo la contaminación a especies de plantas y animales; pueden llegar, incluso, a los seres humanos y causarles problemas de salud. Estos metales estudiados tienen su origen en la composición mineralógica de la zona estudiada y, en el caso del mercurio, se debe a su uso en la amalgamación del oro.
- El análisis de mercurio en los sedimentos activos aguas arriba y aguas abajo de El Hundidor, La Ceiba, Quintana y La Cirila dio como resultado su presencia aguas abajo de la actividad de Quintana (0,081 mg/kg) y La Cirila (0,429 mg/kg). Esto indica que es probable que el mercurio empleado en el beneficio del oro se haya movilizado hacia los sedimentos activos de las quebradas a las cuales se realizan vertimientos. Ello conduce a la contaminación del medio, afectando a los organismos vivos presentes, pues, según las recomendaciones canadienses y americanas, una concentración de mercurio superior a 0,18 mg/kg supera el nivel de efecto umbral (TEC), por lo que sí podría haber efectos dañinos en especies vivas.
- De acuerdo con los resultados obtenidos por FRX, el material de cabeza presenta porcentajes de hierro y azufre que no superan el 5,81 % y el 5,22 % respectivamente. Además, se encontró contenido de potasio, calcio y magnesio, los cuales son elementos de naturaleza alcalina.
- Observando los resultados de FRX para elementos de traza, en el material de cabeza de plantas y entables visitados en Remedios, se detectaron, principalmente, metales pesados como plomo, zinc y arsénico. En lo que respecta al azufre, se relaciona con galena, esfalerita y arsenopirita.
- Debido a que los sedimentos activos de las quebradas analizadas por FRX, presentan una cantidad mayor o similar de elementos traza aguas arriba de la actividad minera, en comparación con los elementos traza aguas abajo, se puede concluir que dichos elementos en los sedimentos activos de Remedios son de origen genético.
- Los resultados de FRX para relaves arrojan una composición porcentual de azufre que corresponden al 10,65 % en Los Pujidos, al 8,64 % en Río Gold (El Hundidor), al 4,27 % en La Ceiba y al 1,29 % en Quintana, posibilitando la formación de sustancias ácidas al reaccionar en ambientes oxidantes.

- Por FRX se detectaron potasio y calcio como elementos mayores presentes en los relaves visitados, los cuales, por su naturaleza alcalina, pueden ser contribuyentes para neutralizar sustancias ácidas formadas.
- En los relaves visitados, se encontraron metales pesados como plomo, zinc y arsénico. En concordancia con el material de cabeza, se puede decir que la acumulación de dichos metales es debida a los procesos de beneficio de oro en los entables y plantas; por tanto, debe ser tenida en cuenta en la mejora continua de los procesos extractivos, pues estos metales pueden ser perjudiciales para los ecosistemas asociados.
- No se cuantificaron concentraciones de mercurio por fuera de los límites permitidos ambientalmente (valor máximo de 2,00 ppb; Resolución n.º 631 de 2015). De los puntos muestreados, el vertimiento que detectó una concentración de mercurio considerable es el correspondiente a relaves generados por la planta El Hundidor (0,596 µg/L), aunque el valor está dentro del rango permitido. Es de considerar que al presentar el relave un vertimiento con un valor de pH levemente básico (7,52), esta condición no favoreció la movilidad del mercurio en la solución filtrante, ya que el relave tiene una concentración mayor de mercurio de 80,83 mg/kg que no se ve reflejada en el vertimiento.
-

7.6. RECOMENDACIONES

- Dadas las condiciones en las cuales se encuentran los depósitos de relaves del proceso de beneficio del oro, se recomienda realizar una adecuación del espacio que cubra las canchas de relaves e impermeabilice el fondo del depósito con geomembranas impermeables, a fin de disminuir la exposición de los minerales presentes a fenómenos ambientales como las precipitaciones y a fenómenos de meteorización que promueven la generación de drenaje ácido de mina, así como la movilidad de metales pesados que pueden contaminar las fuentes hídricas cercanas.
- Se recomienda realizar ensayos dinámicos para predicción de drenaje ácido de minas que brinden información cuantitativa de este fenómeno y permitan definir con mayor certeza si un residuo minero tiene la capacidad de neutralizar la acidez generada por exposición de sulfuros polimetálicos al ambiente.
- Se le debe dar un mejor manejo a los vertimientos y relaves que se encuentran asociados a quebradas como la de Quintana, pues si se observa la composición porcentual de zinc en los sedimentos activos aguas abajo, se puede evidenciar una pequeña acumulación de dichos metales pesados. Esto puede contribuir a la generación de drenajes ácidos y, además, eliminar microorganismos y bacterias benéficas para procesos de limpieza natural de los ecosistemas, conllevando una disminución drástica en el pH del medio circulante, lo que, a su vez, podría ocasionar destrucción de la flora, la fauna y del paisaje.

Se recomienda realizar ensayos dinámicos para predicción de drenaje ácido de minas que brinden información cuantitativa de este fenómeno y permitan definir con mayor certeza si un residuo minero tiene la capacidad de neutralizar la acidez generada por exposición de sulfuros polimetálicos al ambiente.

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.

Planta de beneficio mina Quintana - Remedios (Antioquia). Fotografía tomada por William Pulido, Servicio Geológico Colombiano





8.1. PROCESO DE BENEFICIO DESARROLLADO ACTUALMENTE

La mayoría de plantas de beneficio o entables usan para el proceso de conminución trituradoras de martillos para la trituración y barriles denominados “cocos” para la molienda. Estos cocos funcionan con motores eléctricos de 7,5 hp los cuales pueden estar conectados directamente a la red eléctrica o a generados diésel. Algunas de las plantas o entables, como Los Pujidos o La Palma, tienen en sus circuitos de conminución molinos de bolas en circuito abierto, estos se destacan por el uso de transmisiones con bandas a los motores. Para la concentración de los minerales valiosos una vez liberados en el proceso de conminución, son usados canalones y mesas de concentración que se encuentran inmediatamente después del proceso de molienda. Cabe destacar que las plantas de beneficio de la mina Quintana y La Palma utilizan el proceso de flotación en tanques para obtener un concentrado que es posteriormente llevado a cianuración, lo que demuestra que es posible tecnificar los entables existentes con tecnologías apropiadas para el beneficio de los minerales auríferos de la región.

Para realizar las pruebas experimentales necesarias para comprobar y ajustar las rutas de tratamiento metalúrgico, se recurre a muestras de los materiales muestreados de los frentes de explotación y de las mismas tolvas del material que alimenta las plantas seleccionadas. De acuerdo a las características mineralógicas encontradas en este, se deducen, se verifican experimentalmente y se ajustan las condiciones bajo las cuales se recomienda operar los procesos para un eficiente tratamiento del mineral aurífero. Con base en la ubicación geográfica y composición mineralógica de las plantas fueron seleccionadas las plantas de Los Pujidos y La Cirila para realizar los ensayos metalúrgicos.

El proceso de beneficio de la planta Los Pujidos cuenta con una trituración primaria en trituradora de mandíbulas, trituración secundaria en triturador de martillos, molienda primaria en molinos de bolas, concentración en mesa tipo Wilfley, remolienda en barriles y cianuración en tanques agitados. El diagrama de flujo del proceso de beneficio de la mina Los Pujidos se muestra en la figura 8.2.

Figura 8.1. Diagrama de beneficio actual. Fuente: autores.

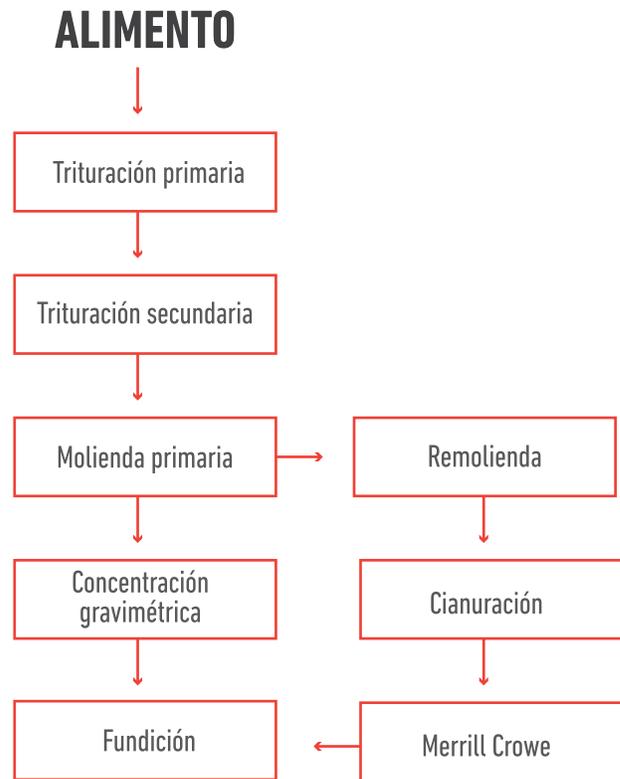


Figura 8.2. Diagrama de flujo de la planta de beneficio de la mina Los Pujidos. Fuente: autores.

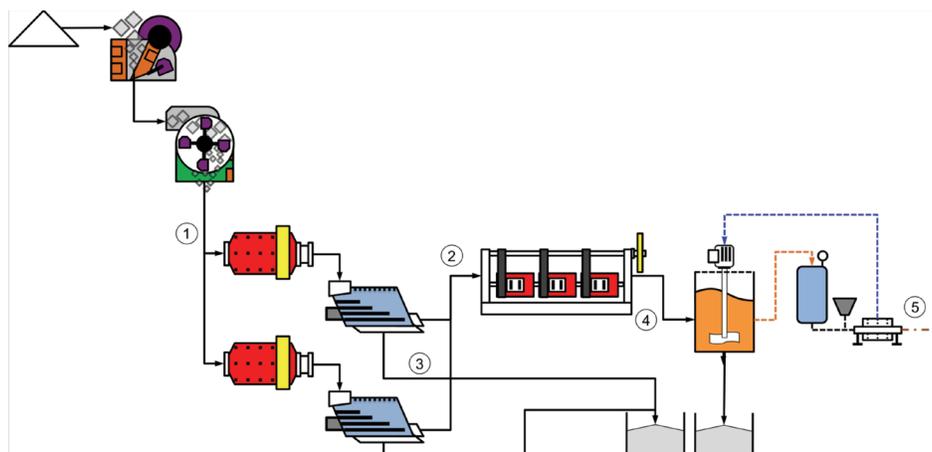


Figura 8.3. Descripción de los equipos de la planta. Fuente: autores.

EQUIPO	NÚMERO DE EQUIPOS	CARACTERÍSTICAS
Trituradora de mandíbulas	1	Abertura: 0,15 m Potencia nominal: 10 hp
Trituradora de martillos	1	Diámetro del rotor: 0,7 m Potencia nominal: 30 hp
Molino de bolas	2	Capacidad: 20 – 40 t/día Diámetro x longitud: 1,0 x 1,3 m Potencia nominal: 12,5 – 20 hp Tamaño máximo de bola: 3 pulgadas Porcentaje de sólidos del producto: 65%
Mesa concentradora	2	Tipo de mesa: Wilfley Ancho x longitud: 2,0 x 4,3 m
Trituradora de mandíbulas	1	Abertura: 0,15m Potencia nominal: 10hp
Trituradora de martillos	1	Diámetro del rotor: 0,7m Potencia nominal: 30hp
Tanques de cianuración	1	Capacidad de los tanques: 6,0 m³ Potencia nominal del agitador: 10 hp Porcentaje de sólidos de la pulpa: 30%

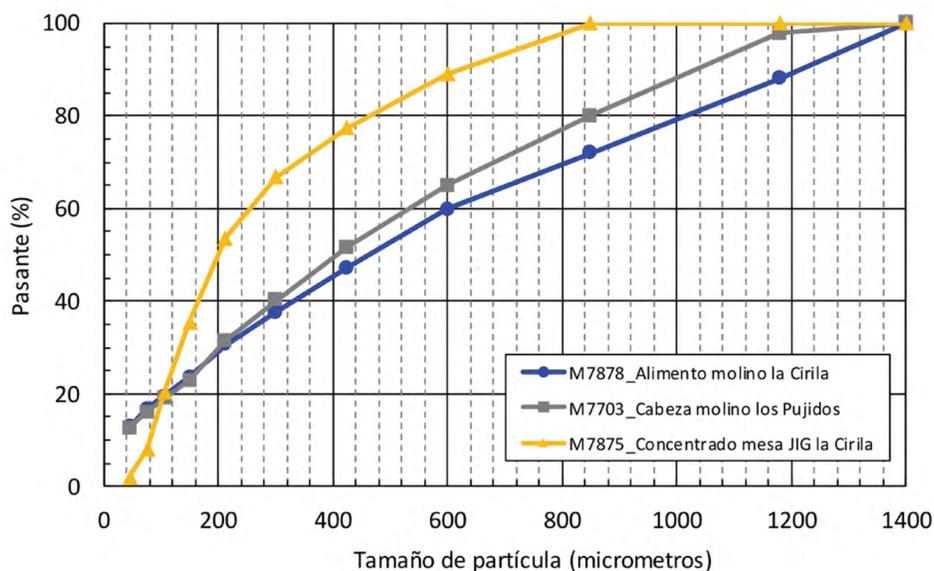
8.2. PRUEBAS METALÚRGICAS DE LABORATORIO

8.2.1. PESO ESPECÍFICO, ÍNDICE DE HARDGROVE EN ÍNDICE DE TRABAJO DE BOND (WI)

Figura 8.4. Peso específico e índices de Hardgrove y Bond para diferentes muestras de proceso de la zona. Fuente: autores.

MUESTRA	DENSIDAD (g/cm³)	HARDGROVE	WI Bond (kWh/t)
Frente de mina Rio Gol	2,69	68,8	7,6
Cabeza de veta la Primavera	2,68	40,5	13,0
Cabeza molino de bolas los Pujidos	2,66	45,9	11,5
Alimento al molino la Cirila	2,69	48,2	10,9
Concentrado mesa JIG la Cirila	3,14	-	-

Figura 8.5. Distribuciones de tamaños de partícula de las muestras de la zona de Remedios y Segovia. Fuente: autores.



8.2.2. ACONDICIONAMIENTO DEL MINERAL PARA CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Figura 8.6. Distribuciones de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación de la mesa Wilfley) para las muestras de la zona de Remedios y Segovia. Fuente: autores.

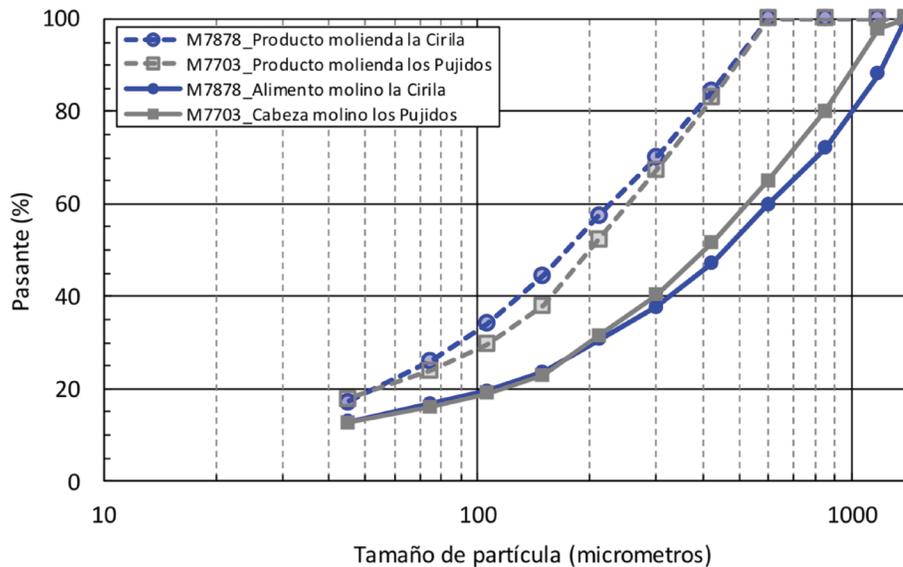
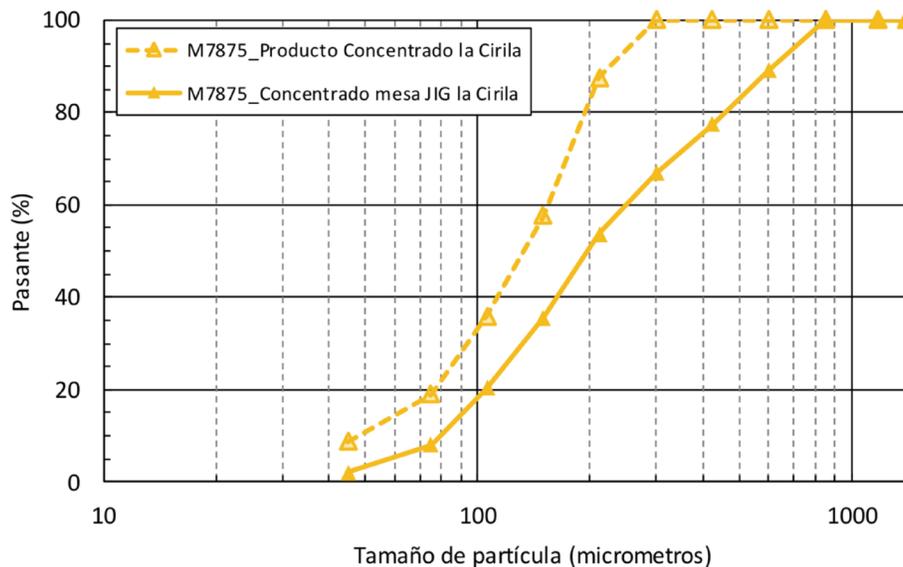


Figura 8.7. Distribución de tamaño de partícula de la muestra inicial y el producto (alimentación del centrífugo Knelson) para la muestra de concentrado mesa JIG de la Cirila. Fuente: autores.



8.2.3. PLANTA DE BENEFICIO LA CIRILA

Concentración en mesa del mineral de cabeza de la mina La Cirila

Cabeza: Cabeza de molino de la Cirila.
Molienda hasta $d_{80} = 386$ micrómetros.
Tiempo de concentración: 10 minutos.
Agua de fluidización: 7.5 L/m.

Refinación en batea

Figura 8.8. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina La Cirila. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza	2544,4	100%	3,13	7972,8		
Concentrado	54,7	2,15%	194,6	7079,8	88,8	62,17
Medios	1281,8	50,38%	0,3	446,5	5,6	
Colas	1207,9	47,47%	0,4	446,5	5,6	

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley La Cirila.

Molienda hasta d80 =425 micrómetros.

Tiempo de concentración: 5 minutos.

Concentración por flotación

Figura 8.9. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina La Cirila. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza (concentrado de mesa)	88,3	100%	194,54	17178,28		
Concentrado	2,1	2,38%	5824	12230,40	22,23%	29,93
Colas	86,2	97,62%	57,4	4947,88	77,77%	

Medios y colas de Mesa

Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley La Cirila.

Molienda hasta d80 =75 micrómetros.

Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos.

Tiempo de espumación: 8 minutos.

Cianuración

Figura 8.10. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta La Cirila. Fuente: autores.

	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Medios de mesa	Cabeza	1000	100,00	0,40	400		
	Concentrado 1	19,1	1,91	12,11	253,1	63,28	30,28
	Concentrado 2	1,8	0,18				
	Colas	979,1	97,91%	0,15	146,9	36,72%	
Colas de mesa	Cabeza	500	100,00	0,85	423,5		
	Concentrado 1	31,9	6,38%	5,50	175,5	41,42%	6,47
	Colas	468,1	93,62%	0,53	248,1	58,58%	

Figura 8.11. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta La Cirila. 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	1.13	13.46	33	75
Colas de batea	7.25	4.15	25	75

Figura 8.12. Lixiviación de oro por cianuración para los concentrados de flotación planta La Cirila. Fuente: autores.

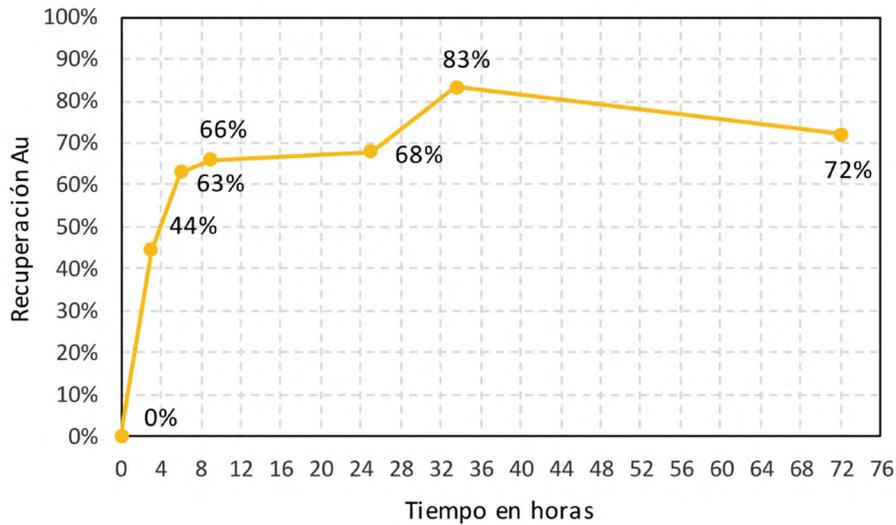
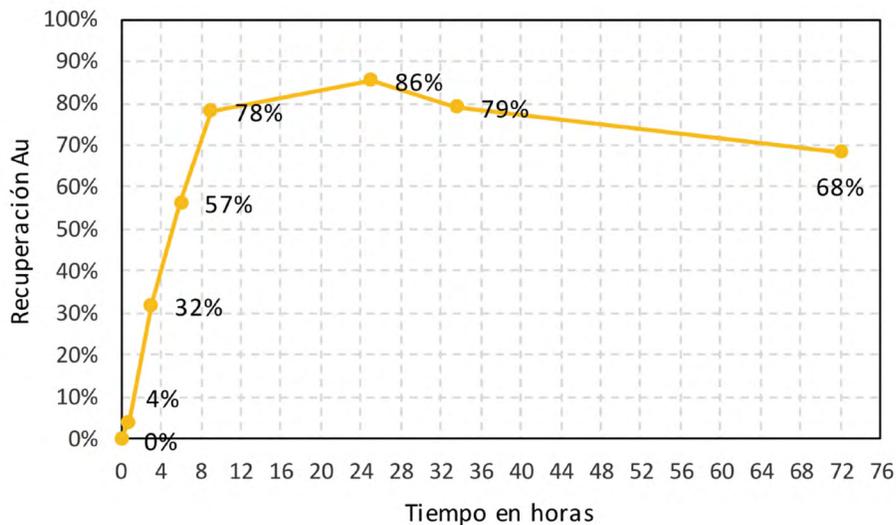


Figura 8.13. Lixiviación de oro por cianuración para las colas de batea planta La Cirila. Fuente: autores.



8.2.4. PLANTA LOS PUJIDOS

Concentración en mesa del mineral de cabeza de la Los Pujidos

Cabeza 1: Cabeza proceso Pujidos
Molienda hasta d80 =386 micrómetros
Tiempo de concentración: 7 minutos
Agua de fluidización: 6.9 L/m

Figura 8.14. Concentración en mesa Wilfley para el mineral de cabeza de la mina Los Pujidos. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza	4600	100%	2,16	9936		
Concentrado	64,0	1,4%	126,4	8086,8	81,4	58,51
Medios	3321,0	72,2%	0,3	1095,9	11,0	
Colas	1215,0	26,4%	0,6	753,3	7,6	

Refinación en batea

Cabeza: Concentrados del ensayo de mesa Wilfley Pujidos

Molienda hasta d80 =425 micrómetros

Tiempo de concentración: 5 minutos

Figura 8.15. Refinación en batea para los concentrados de mesa de la mina Pujidos. Fuente: autores.

IDENTIFICACIÓN	Peso (g)	% Peso	Tenor Au (g/t)	peso Au (µg)	% Recuperación	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Cabeza 1	64	100%	132,08	8499,98		
Concentrado	1,7	2,66%	2361,4	4014,38	47,23%	17,87
Colas	62,3	97,34%	72	4485,60	52,77%	

Concentración por flotación

Cabeza: Medios y colas del ensayo de mesa Wilfley planta Los Pujidos

Molienda hasta d80 =106 micrómetros

Tiempo de acondicionamiento: 6 minutos

Tiempo de espumación: 8 minutos

Figura 8.16. Resultados concentración por flotación de los medios y colas del ensayo de mesa de la planta Pujidos. Fuente: autores.

	TIPO	PESO (g)	% PESO	TENOR Au (g/t)	PESO Au (µg)	% RECUPERACIÓN	RAZÓN DE CONCENTRACIÓN
Medios de mesa	Cabeza	996,5	100,00	0,46	460		
	Concentrado 1	21	2,11%	6,22	289,0	62,83%	13,52
	Concentrado 2	25,5	2,56%				
	Colas	950	95,33%	0,18	171,0	37,17%	
Colas de mesa	Cabeza	495,9	100,00	1,9	942,7		
	Concentrado	70,9	14,30%	9,70	687,7	72,95%	5,1
	Colas	425	85,70%	0,60	255,0	27,05%	

Cianuración

Figura 8.17. Indicadores para la cianuración de los concentrados de flotación y colas de batea planta Pujidos. 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	7.35	0.98	48	75
Colas de batea	13.91	1.04	31	75

Figura 8.18. Lixiviación de oro por cianuración los concentrados de flotación planta Pujidos. Fuente: autores.

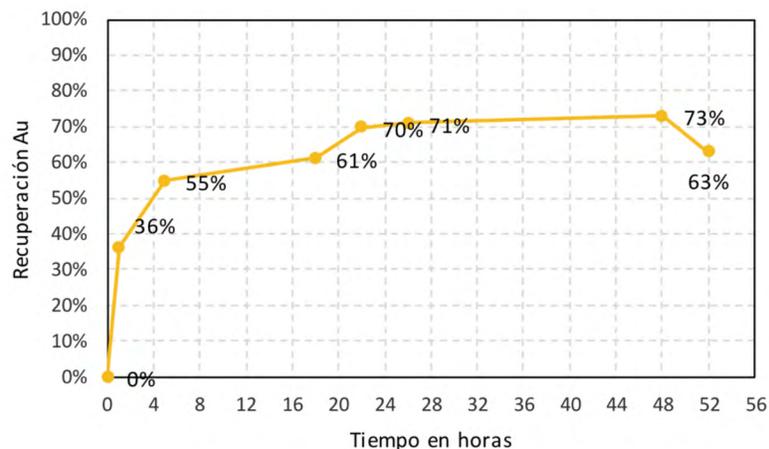
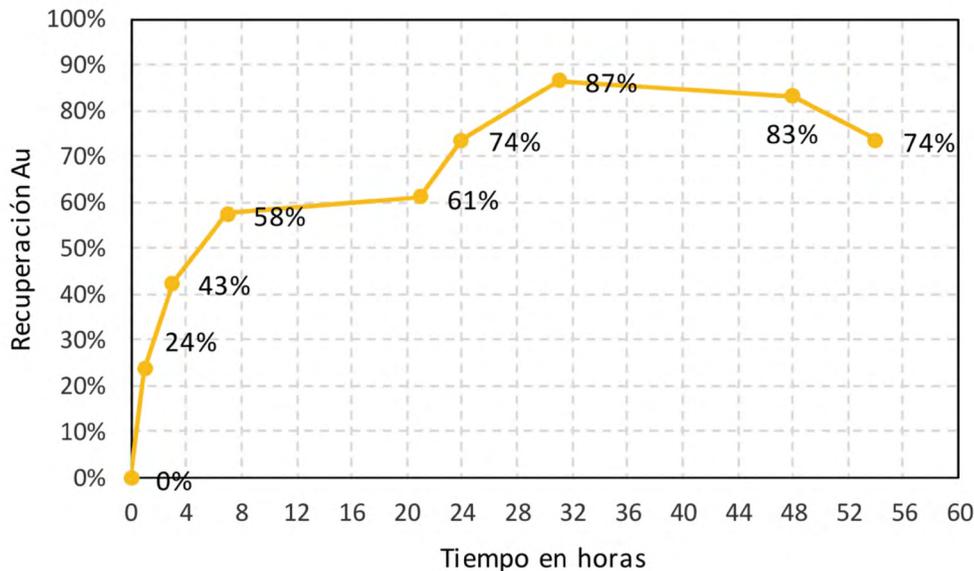


Figura 8.19. Lixiviación de oro por cianuración colas de batea planta Pujidos. Fuente: autores.



8.3. TENORES DE ORO EN LAS PLANTAS VISITADAS

Figura 8.20. Tenores de oro encontrados en la distintas planta por cada muestra tomada en la zona minera. Fuente: autores.

MINA	TENOR (g/t)	MINA	TENOR (g/t)
MINA RÍO GOLD		MINA LOS PUJIDOS	
Frente mina Río Gol (HUNDIDOR), filón Remedios	1,98	Cabeza molino de bolas Los Pujidos	2,23
Colas de cocos mina Río Gol Remedios	7,47	Concentrado de mesa Los Pujidos	>100
Colas finales mina Río Gol Remedios	4,38	Colas de mesa Los Pujidos	3,93
MINA LA CEIBA		Colas cocos Hg Los Pujidos	14,2
Cabeza mina La Ceiba Remedios	1,21	Colas de cianuración Hg Los Pujidos	2,23
Colas de cocos mina La Ceiba Remedios	10,85	MINA PEDRO MENDOZA	
MINA LA QUINTANA		Cabeza Molino Pedro Mendoza	0,67
Cabeza Molino La Quintana Remedios	6,3	MINA LA CIRILA	
Colas flotación La Quintana Remedios	0,42	Cola de mesa La Cirila	1,94
Vertimiento Colas cianuración La Quintana Remedios	2,62	Concentrado de Mesa y JIG en remoladores La Cirila	76,4
Colas flotación 2 La Quintana Remedios	0,82	Cola de remoladores La Cirila	11,9
Colas patio de relaves La Quintana Remedios	0,68	Cola de mesa relaves La Cirila	0,45
MINA LA PALMA		Alimento al molino La Cirila	3,02
Cabeza planta La Palma	13,8	Cabeza de martillo La Cirila	4,96
Producto remolador La Palma	21,8	Concentrado de Mesa La Cirila	77,9
Colas mesa 2 La Palma	>100	MINA LA PRIMAVERA	
Colas de Flotación La Palma	0,82	Cabeza ripio La Primavera	5,5
Colas cocos Hg La Palma	8,01	Cabeza veta La Primavera	5,88
Producto molino La Palma	14,5		

8.4. CONSIDERACIONES MINERALÓGICAS DETERMINANTES EN LOS PROCESOS METALÚRGICOS

- **Composición mineralógica. Asociaciones entre los minerales:**

- Los filones corresponden a venas de cuarzo (entre el 40 % y el 70 %) de textura masiva, así como cuarzo de recristalización con carbonato (<0,1 %), y presentan principalmente una mineralización de pirita, esfalerita, galena, calcopirita y oro, con presencia de arsenopirita en el sector de La Cirila y pirrotina en menor proporción a profundidad en Quintana.

- La asociación mineralógica del oro con diferentes sulfuros evidencia que este se halla principalmente incluido (aproximadamente un 50,15 %) en pirita y menor proporción galena y esfalerita; asociado a sulfuros el 43,75 % también en pirita, galena y arsenopirita; el oro incluido en cuarzo y carbonatos, considerado libre, corresponde al 6,1 % restante. Solo en la mina Quintana el análisis de la muestra recolectada en el nivel más profundo se encuentra oro incluido principalmente en pirrotina con un 46,85 %.

- Los análisis mineralógicos de la muestra de cabeza de proceso de la mina La Cirila, indican que cerca del 85 % de la mena corresponde a ganga de cuarzo de la mena y de fragmentos líticos derivados de la roca encajante; tiene una proporción baja de sulfuros inferior al 7 % y el resto son carbonatos. Esto facilitaría un proceso de cianuración y la neutralización en las pilas de relave.

- Los análisis mineralógicos realizados a la muestra de cabeza de proceso de la mina Los Pujidos indican que, en la distribución mineralógica en porcentaje en peso, cerca del 80 % de la mena corresponde a ganga de cuarzo y fragmentos líticos derivados de la roca encajante de la mena, así como pirita (12,,7%) y pequeñas cantidades de carbonato de calcio.

- **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. Salvo en el sector de Quintana, donde la presencia de pirrotina podría causar la necesidad de algún pretratamiento oxidativo a la cianuración.

- **Grado de liberación de los minerales metálicos.**

- Los análisis de liberación de minerales metálicos nos permitieron determinar el tamaño de partícula al cual la molienda se debe conducir sin llegar a producir sobremolienda y, además, tener un tamaño óptimo para las concentraciones gravimétricas a las cuales fueron sometidos los minerales.

- En la mina La Cirila el tamaño de partícula para una liberación superior al 80 % fue de 425 µm y a 75 µm sería del 98 % de partículas metálicas libres.

- Para el sector de Los Pujidos, la medida hecha reporta que en una molienda de 425 µm se tendría una liberación de los minerales metálicos de un 95 %. La liberación ocurre en las primeras etapas de molienda. Considerando el sistema binario de ganga-sulfuros, se observa que en su mayoría los sulfuros se hallan liberados en la molienda primaria y por encima de 300 micrones prevalecen en varios porcentajes de asociación en proporciones menores al 3 %. Una pequeña porción está representada en la fracción de menor tamaño; ello puede deberse a la presencia de sulfuros microcristalinos diseminados en fragmentos líticos de la roca hospedante.

- Para el sector de la mina Quintana, a una molienda de 106 micrones se tendría una liberación de los minerales metálicos de un 80 %. A 45 micrómetros la liberación sería del 90 %.

- De igual manera se determinó el tamaño de partícula al que se debían tener los minerales rechazados de los ensayos gravimétricos. Para ser llevados a una etapa de flotación y cianuración, estos

tamaños de partícula fueron deducidos según el tamaño de los granos de oro que aún permanecían incluidos o asociados a otros minerales como sulfuros y ganga (ver figuras xxxx, XXX y XXX, capítulo 4), y fueron inferiores a 75 μm .

- **Grado de liberación del oro**

- En el material de la mina La Primavera, la distribución general del oro indica prevalencia de tamaño según diámetro equivalente por encima de 70 μm y representan cerca del 82 %. Este oro es recuperable por métodos gravimétricos convencionales, mientras que el 18 % restante de menor tamaño requiere de técnicas no convencionales.

- En el material de la mina Los Pujidos se observa predominio de las partículas menores a 70 μm , mientras que las partículas incluidas son menores a 20 μm . La distribución en peso de las partículas de oro presenta 2 poblaciones: una relacionada con las partículas liberadas, que representan el 55 % y su tamaño se encuentra entre 30 y 70 μm ; y una segunda población asociada a pirita, con tamaños entre 30 y 60 μm , la cual representa el 43 % restante. A pesar de no tener tamaños superiores a 75 μm , la relación con los sulfuros haría que estas partículas fueran recuperables por procesos gravimétricos, aproximadamente un 70 % en una primera etapa de concentración y refinado; bajo procesos gravimétricos podría esperarse un valor inferior al 40 %.

- En la mina La Cirila se observa el predominio de las partículas menores a 70 μm , mientras que hay unas partículas libres cuyo tamaño varía entre 80 y 130 μm , y su distribución en peso representan el 68 %. Las partículas asociadas se encuentran junto a cuarzo, arsenopirita, pirita y galena, y representan el 32 % restante. Es posible tener una recuperación del oro por métodos gravimétricos cercana al 80 % en una primera etapa de concentración y refinado; bajo procesos gravimétricos podría esperarse un valor cercano al 60 %.

- En la mina Los Pujidos las partículas de oro están asociadas a pirita y a galena. Moliendo a 45 micrones se tendría expuesto el 81 % del oro. Por debajo de este tamaño encontraríamos el 19 % restante del oro. Esto representa altos costos para llegar a dichos tamaños.

- En La Cirila el oro se encuentra asociado en bajas proporciones a calcopirita, galena, arsenopirita, ganga-cuarzo y pirita. Con una molienda de 106 micrones se tendría expuesto el 45 % en peso del oro. A 75 micrones, el 70 %.

- En la mina Quintana el oro se encuentra asociado en bajas proporciones a ganga-cuarzo, galena, pirita y esfalerita. Con una molienda de 100 micrómetros se tendrá expuesto el 73 % del oro y a 60 micrómetros el 90 %.

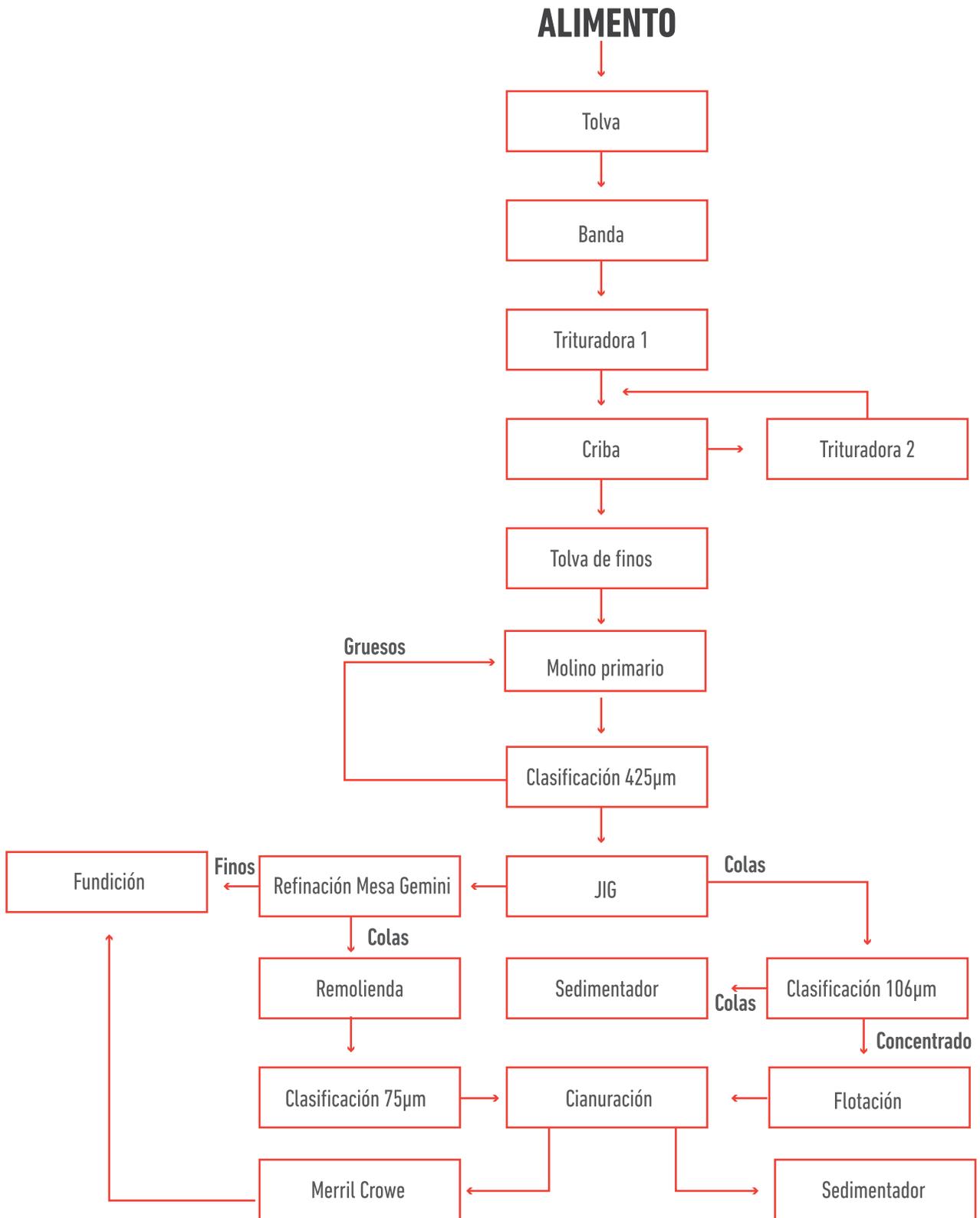
- **La homogeneidad mineralógica de la zona de estudio**

- Podrían tratarse los minerales bajo un mismo concepto de extracción, donde la gravimetría jugaría un papel importante para el oro de fácil liberación y de gran tamaño encontrado en las muestras observadas, y que no requerirían tamaños muy finos de molienda, a pesar de haber rocas de competencia moderada. Asimismo, el oro fino asociado e incluido en los sulfuros se puede extraer bajo la flotación y cianuración, pues la baja presencia de sulfuros (casi nula de cianicidas o consumidores de oxígeno) y un poco mayor de carbonatos, favorecerían estos procesos. Se puede considerar como una sola unidad geometalúrgica.

8.5. 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 de sus etapas, 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.

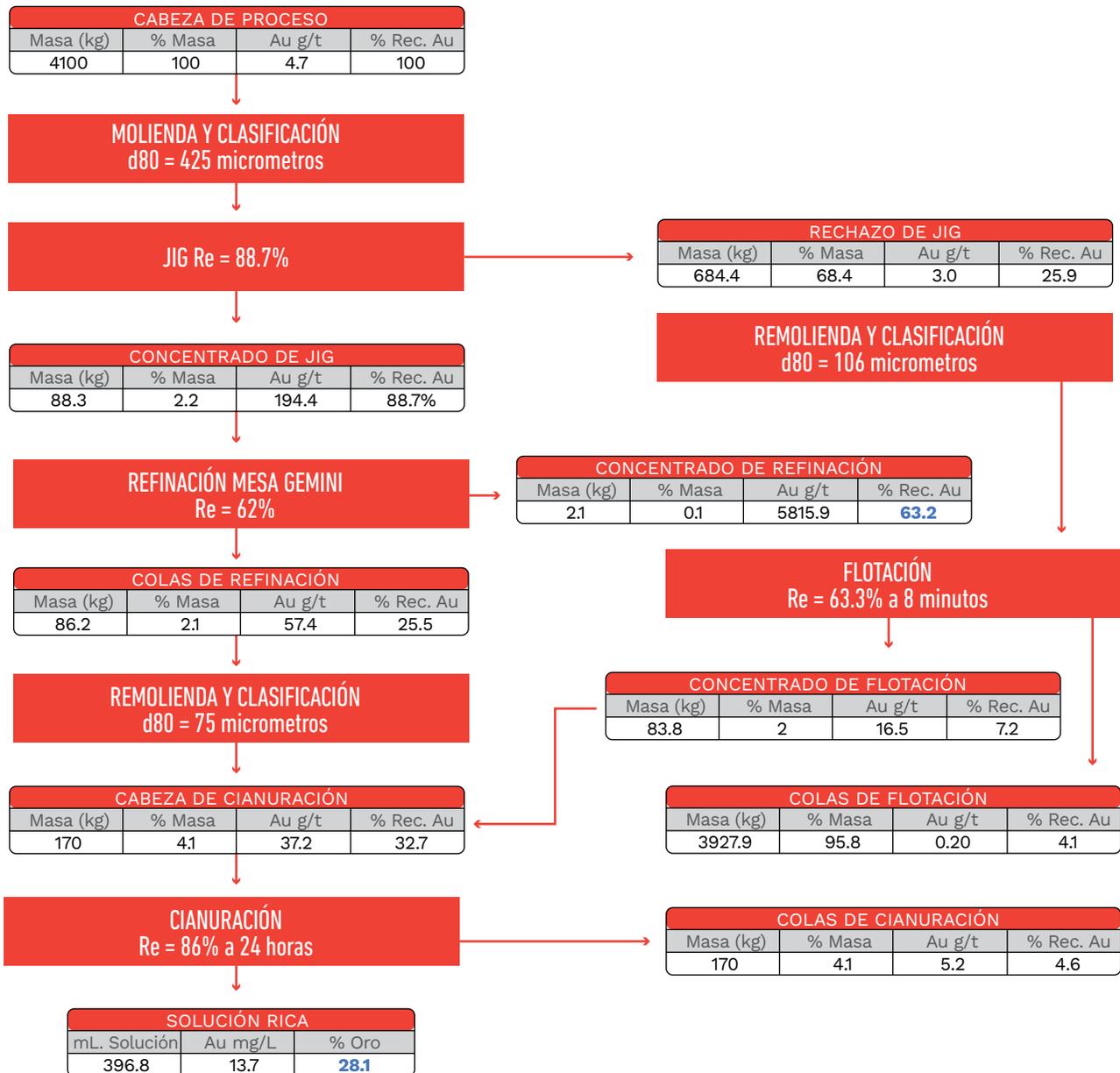
Figura 8.21. Proceso de beneficio sugerido para la zona minera de Remedios (Antioquia). Fuente: autores.



8.6. BALANES DE MATERIA DE LOS PROCESOS SUGERIDOS

La figura 8.22. 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.

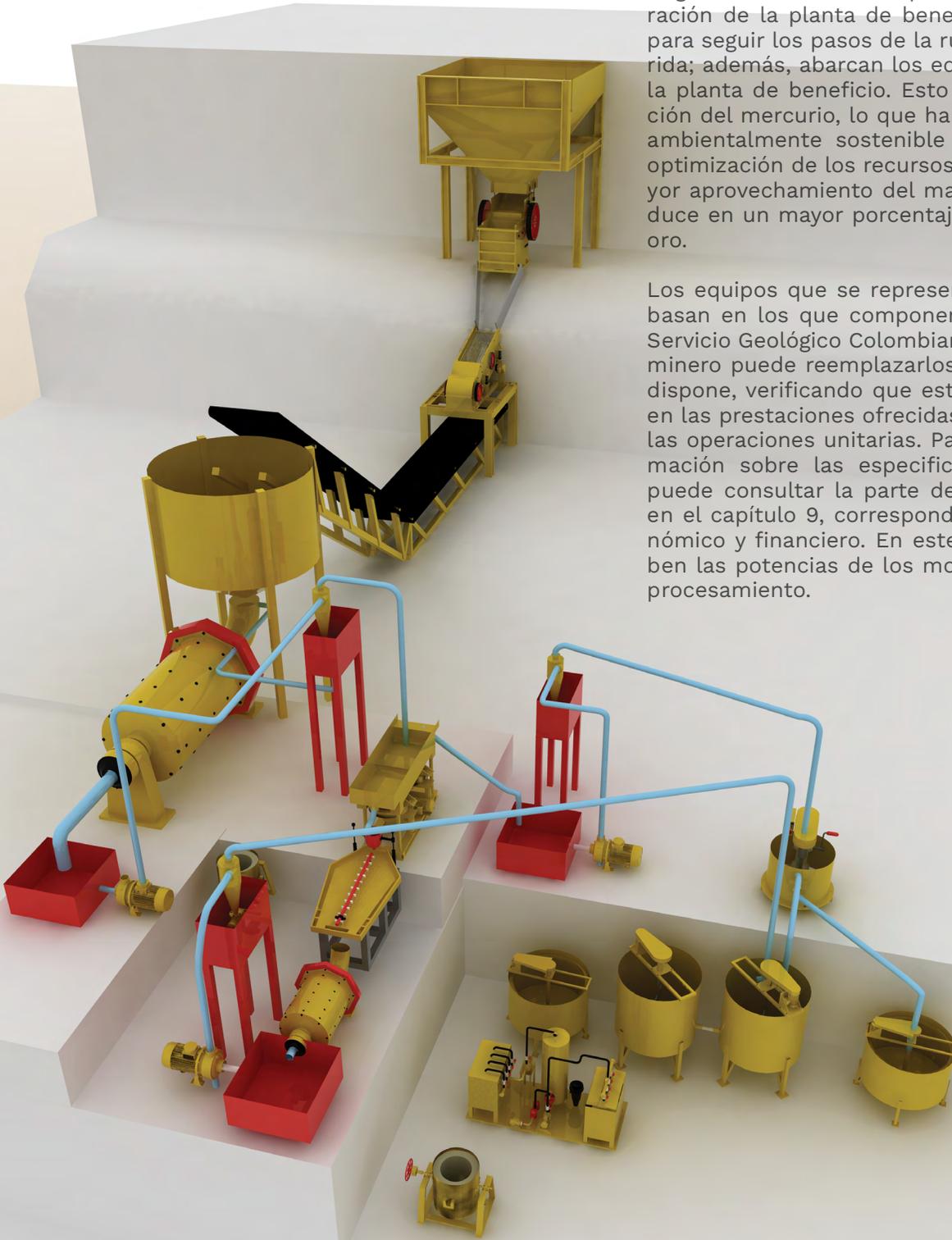
Figura 8.22. Diagrama de balance de materia de proceso sugerido para la zona minera de Remedios (Antioquia). Fuente: autores.



8.7. MONTAJE DE LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

El grafico 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.

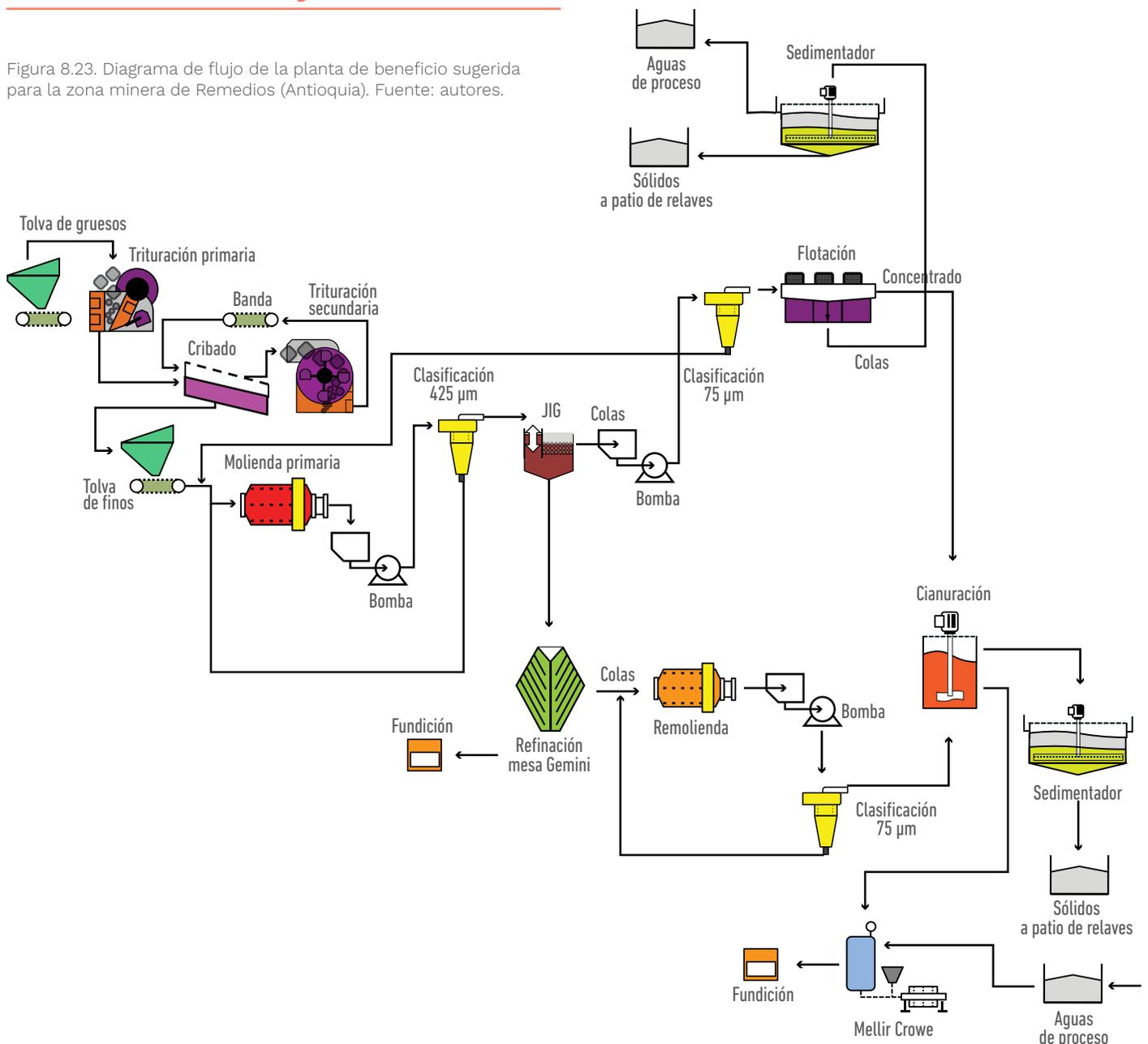


8.8. DIAGRAMA DE FLUJO CORRESPONDIENTE A LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

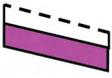
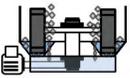
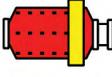
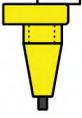
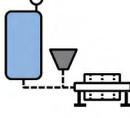
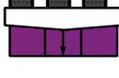
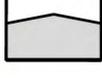
Para tener mayor información sobre las especificaciones técnicas se puede consultar la parte de maquinaria descrita en el capítulo 9, correspondiente al análisis económico y financiero.

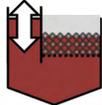
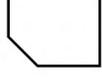
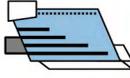
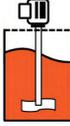
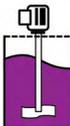
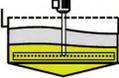
En la figura 8.23. se presenta el diagrama de flujo de la planta de beneficio que se implementaría en la zona minera, con sus respectivas líneas de entradas y salidas de cada operación unitaria. Este diagrama responden a la ruta metalúrgica propuesta y al montaje de la planta sugerida.

Figura 8.23. 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	

8.9. CONCLUSIONES METALÚRGICAS

- Se obtuvo una recuperación neta de oro del 91,3 %, con el método extractivo propuesto.
- El método extractivo propuesto consiste fundamentalmente de una molienda relativamente gruesa ($d_{80} < 400 \mu\text{m}$) 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 60 % 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 necesario aplicar 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 soluble del segundo componente.
- 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 las colas de amalgamación con el proceso de cianuración.
- En la zona se encuentran las técnicas alternativas para la abolición del mercurio y la técnica de la amalgamación, en plantas desarrolladas, los resultados de tenor obtenidos de las muestras tomadas en estas plantas, con resultados similares a los obtenidos en este documento bajo la ruta metalúrgica propuesta.
- Los mineros disponen de insuficientes instrumentos de medida y análisis para tener un control operativo y contable adecuado de sus operaciones.
- La recuperación de oro con el método alternativo propuesto se incrementa en 2 veces con respecto al método actual de amalgamación utilizado.

Con respecto a la reducción de tamaño

- El circuito de reducción de tamaño que se acostumbra en la zona consiste 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 $400 \mu\text{m}$. 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 87 %, con razones de concentración de 74 veces y enriquecimiento superior a 50 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 12 % del oro. Debe molerse a un d80 por lo menos de 75 µm antes de someterlo al proceso de flotación.

Con respecto a la concentración por flotación

- El tamaño de partícula del material a flotar debe ser menor a 75 µm por lo menos, ya que las recuperaciones con un tamaño por debajo de 106 µm no fueron las mejores.

Con respecto a la cianuración

- En general, por cianuración se alcanzaron recuperaciones de oro entre el 70 % y el 90 %, en un máximo de tiempo de 30 horas; se nota una dilución superior al 60 % en las primeras 12 horas de cianuración.
- Con el mineral de la mina Los Pujidos se nota un efecto pasivador de la disolución del oro, que debe ser estudiado más a fondo.
- El método alternativo propuesto, para los ensayos con los minerales de las dos minas, dejaría un material residual de cianuración de los rechazos de refinación de concentrados gravimétricos, con concentraciones de oro inferiores a 10 g de oro por tonelada, en el 2 % de la masa; y de 2 g de oro por tonelada para las colas de cianuración de los concentrados de flotación. Estos resultados representan alrededor del 5 % del oro sin recuperarse; posiblemente, se deba a alguna refractariedad física por falta de liberación.
- No hay altos consumos de cal debido a la presencia de carbonato de sodio en la mena.

8.10. 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, desarrollándolas 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.

Se obtuvo una recuperación neta de oro del 91.3 %, con el método extractivo propuesto

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.

Monumento al oro en Remedios (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 y, finalmente, estimar los ingresos y egresos que resultarán de la operación del proyecto.

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

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

Tasa interna de retorno

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

En este análisis se mide la relación beneficio-costos (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 que 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 que 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 REMEDIOS

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 Remedios, 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 Remedios

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.

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	24 t/día
Volumen de material estéril extraído	16 t/día
Volumen de material mineral extraído	8 t/día
Capacidad de procesamiento planta	1 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	208 t/mes
Tenor de corte por tonelada de material de mina	8,7 g/t
% Total de recuperación de oro	91,3%
Recuperación total de oro	7,94 g/t

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.

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 nuevos 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	Motor de 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 1.

- **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 nuevos para la implementación de la ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

PROCESOS	MÁQUINA Y DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Tolva para almacenar material de mina	4 m x 4 m x 2 m	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 4 m x 2 m	1
	Caja de pulpa	0,80 m x 0,80 m x 1 m	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 m	1
Molino de bolas secundario	1,0 m x 2,5 m	2	
CONCENTRACIÓN	JIG	8 X 12 dúplex	1
	Concentrador Centrifugo	2t/h	2
	Mesa gemini de refinación	40kg/h	1
	Tanque espesador	2,5 m	2
	Celda de flotación circular	1,2 x 1,2 m	2
CIANURACIÓN	Tanques de cianuración agitada	D=3 m, H=3 m	1
	Tanque para precipitación de oro en cinc	D= 3 m, H=3,5 m	1
	Precipitación, sistema merrill 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= 3 m, H=3,5 m	1
	Tanque reactor	D=3 m, H=3 m	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 las siguientes tablas 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 explotación definidos previamente por el equipo técnico (26 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 SENA y a las cajas de compensación familiar (CCF), así como

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 x 690	3 unidades
Broca Helicoidal SDS MAX DIAGER 1. 174 x 36 (32 x 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"	52 metros
Manguera para agua 1"	52 metros
Tablón 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"	2cajas,25 unidades
Clavija industrial	2 unidades
Bombillos de litio	8 unidades
Ducto plástico para ventilador (mangas)	52 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.

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:

Aportes al Sistema General de Seguridad Social

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	4	1	828.116	97.032	3.700.592
Carga y transporte	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Preparación	Operario	2	1	828.116	97.032	1.850.296
Desarrollo	Operario	1	1	828.116	97.032	925.148
General	Supervisor	1	1	828.116	97.032	925.148
Total		10				9.251.480

* El salario total asignado a los operarios y el supervisor corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia durante 2019.

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 (SGSS)

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

- **Aportes parafiscales**

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

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales
Aportes parafiscales (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aporte (SENA, ICBF, CCF)

- **Prestaciones sociales**

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

Fórmula para calcular la provisión para pago de prestaciones sociales

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

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.

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

$$\text{Provisión para pago de intereses de cesantías (\$/mes)} = \text{cesantías (\$)} \times 12\%$$

- **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.

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIA DE COMPRA	CANTIDAD (*)
Arnés en X Expert Line	Quinquenal	10 unidades
Línea de vida de 16 mm, 50 metros	Quinquenal	10 unidades
Cargador individual CH	Anual	15 unidades
Lámpara KL5LM naranja 8.000 lux	Anual	15 unidades
Cargador para lámpara	Anual	4 unidades
Lámpara KL4MS	Anual	4 unidades
Casco con portálampara	Anual	15 unidades
Overol tipo piloto con cinta	Cuatrimestral	10 unidades
Cinturón minero de nylon con anillo	Cuatrimestral	10 unidades
Bota de seguridad exportadora	Cuatrimestral	15 unidades
Bota conga II	Cuatrimestral	15 unidades
Fono Samuray (protector auditivo externo)	Cuatrimestral	15 unidades
Conjunto de 2 piezas de ajuste en broche (impermeable)	Cuatrimestral	15 unidades
Respirador media cara 7500	Cuatrimestral	15 unidades
Guante de nylon de nitrilo	Mensual	20 unidades
Filtros para partículas 7993B A/E 110167-5	Mensual	20 unidades
Lente Nitro II AF 110005-0	Mensual	15 unidades
Protector reusable Libus - Reflex bolsa (protector auditivo de inserción)	Mensual	20 unidades
Autorescatador modelo Ci-30KS	Anual	10 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 10 empleados.

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.

- **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.

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 8.21.), 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 molidores	kg	1,2	250
	Revestimientos trituradora primaria	kg	1,2	250
	Revestimientos trituradora secundaria	kg	1,2	250
	Revestimientos de molino primario	kg	1,2	250
	Revestimientos de molino secundario	kg	1,2	250
CIANURACIÓN***	Cianuro de sodio (NaCN)	kg	12	102
	Cal (CaO)	kg	7	60
	Hidróxido de sodio (potasa)	kg	0,0391	0,33
	Acetato de plomo	kg	0,003	0,03
	Polvo de zinc	kg	0,024	0,205
	Xelite (diatomita)	kg	0,013	0,111
FUNCIONACIÓN	Bórax Pentahidratado	kg	0,044	9
	Carbonato de sodio	kg	0,008	2
	Sílice - Cuarzo	kg	0,025	5
MANEJO AMBIENTAL	Floculante	kg	0,004	1
	Ácido sulfúrico	kg	0,300	62
	Peróxido de hidrógeno	kg	0,269	56

* La dosificación por tonelada fue determinada por el equipo técnico. ** La cantidad consumida mensualmente se estimó para 208 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).

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:

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.

- **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 estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales

$$\text{Aportes parafiscales (\$/mes)} = \text{sueldo básico (\$)} \times \% \text{ aporte (SENA, ICBF, CCF)}$$

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.

- **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

$$\text{Provisión (\$/mes)} = \text{salario total (\$)} \times \% \text{ de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)}$$

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías

$$\text{Provisión para pago de intereses de cesantías (\$/mes)} = \text{cesantías (\$)} \times 12\%$$

- **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 0,75% del valor comercial de la maquinaria (este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento

$$\text{Costo de mantenimiento (\$)} = \text{valor comercial total (\$)} \times 0,75\%$$

- **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 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.

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
FUNDICIÓN	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	Zinc en solución pobre	2
	Absorción atómica	Cobre en solución	2
MANEJO AMBIENTAL	Absorción atómica	Ambientales	4

• 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 siguiente tabla contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

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

Figura 9.15. Consumo de energía por equipos de la fase de beneficio. Fuente: autores.

EQUIPO		CANTIDAD	POTENCIA DE MOTOR HP	POTENCIA Kw	POTENCIA EFECTIVA Kw	HORAS TRABAJO	Kw/ DÍA	Kw/ MES
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	24	172,8	4.493
	Precipitación, sistema Merrill Crowe	14	10,5	8,40	1	8	67,2	1.747
	Compresor	2,5	1,875	1,50	1	24	36	936
Total cianuración								7.176
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	31.325

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, 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 el 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.

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 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 1. Para esto se debe multiplicar la cantidad de oro producido en gramos por el precio al que se vende cada gramo de oro.

La cantidad de oro recuperado se halla mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

Fórmula para calcular la cantidad de oro por tonelada procesada

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

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	8,7	100	8,7
1	9,7	91,3%	7,94

* Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 75 % de recuperación de oro por tonelada. ** Para la zona minera de Remedios se determinó que el tenor es de 4,7 gramos, por tonelada. Sin embargo, el tenor de corte bajo el cual es rentable la operación de la ruta metalúrgica sugerida es de mínimo 8,7 gramos por tonelada.

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

$$\text{Producción mensual de oro (g)} = \text{oro recuperado por tonelada (g)} \times \text{mineral procesado mensualmente (t)}$$

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

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

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.

Para la zona minera de Remedios se determinó que el tenor es de 4,7 gramos, por tonelada. Sin embargo, el tenor de corte bajo el cual es rentable la operación de la ruta metalúrgica sugerida es de mínimo 8,7 gramos por tonelada.

- **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 ruta metalúrgica 1.

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 REMEDIOS

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, y 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	14.290.352	68.704
Partes y accesorios	4.055.470	19.497
Herramientas y suministros	7.401.570	35.584
Combustible y explosivos	22.013.714	105.835
Elementos de seguridad industrial	6.229.011	29.947
Mantenimiento	1.137.389	5.468
Energía eléctrica	1.282.008	6.164
Depreciación maquinaria y equipo	1.263.766	6.076
Total	57.673.281	277.275

* El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 271.200/t.

Figura 9.19. Estructura de los costos de la fase de extracción de oro, operación futura en mina. Fuente: autores.

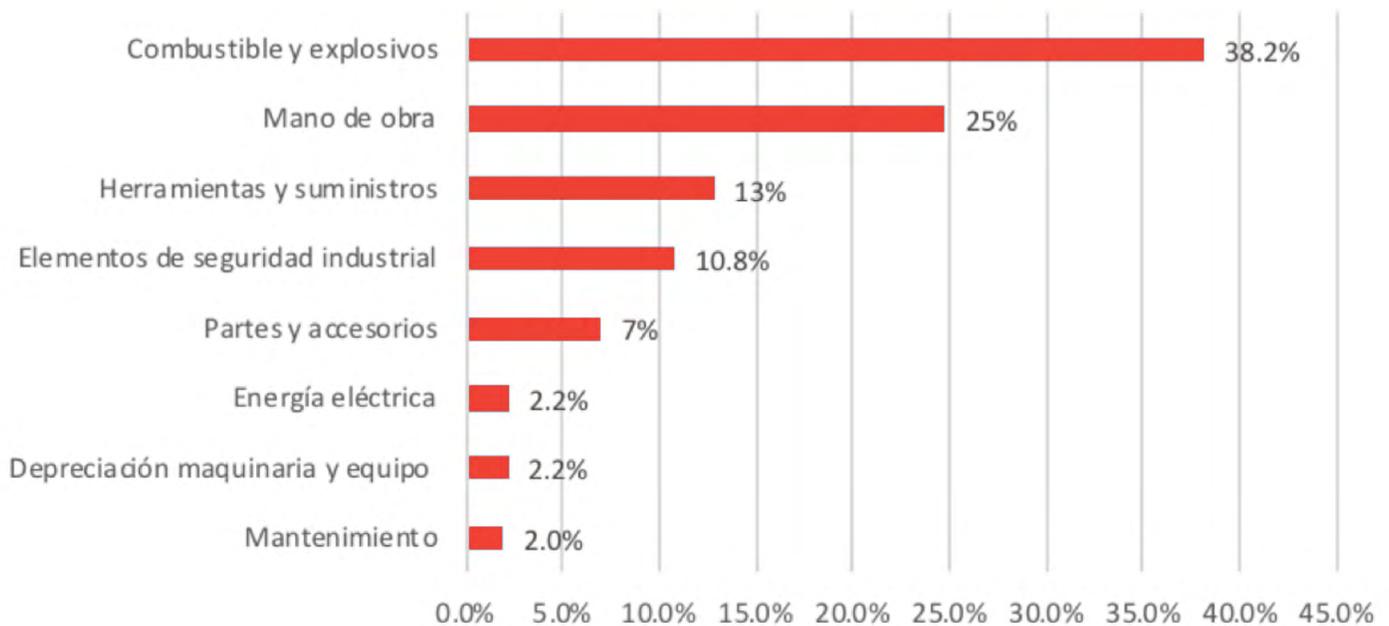


Figura 9.20. Costos de operación total (extracción + beneficio) por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
COSTOS DIRECTOS	
Materia prima, costo de extracción	56.409.600
Insumos	7.455.055
Mano de obra	7.145.195
Mantenimiento	3.353.180
Análisis y pruebas de laboratorio	22.300.000
Servicios públicos	18.689.274
Depreciación	10.578.156
Total costos directos	125.930.459
COSTOS INDIRECTOS	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	12.593.046
Total costos directos + indirectos	138.523.505

Figura 9.21. Estructura de los costos de la fase de beneficio, operación futura en planta. Fuente: autores.

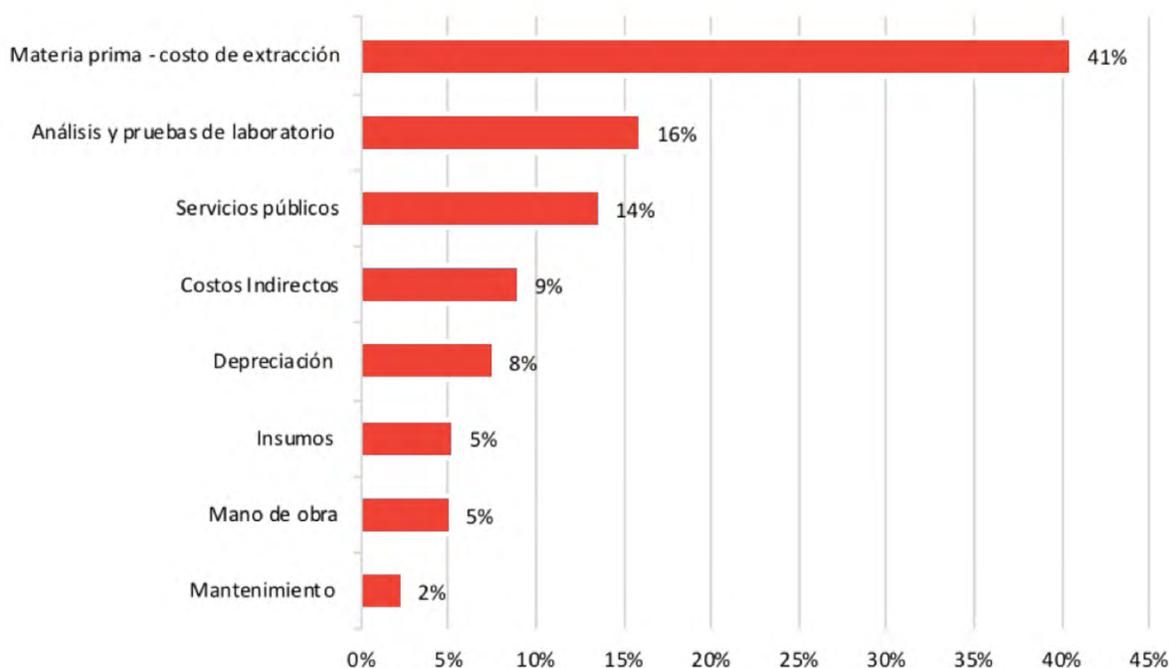


Figura 9.22. Ingresos de operación futura, por mes. Fuente: autores.

TENOR (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
8,7	93,1	7,94	1652	119.815	197.954.126

* 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		2.375.449.506	2.446.712.991	2.520.114.381	2.595.717.813	2.673.589.347
Total ingresos gravables		2.375.449.506	2.446.712.991	2.520.114.381	2.595.717.813	2.673.589.347
(3) Egresos deducibles (-)						
Costos operacionales		1.535.344.194	1.563.423.193	1.592.362.607	1.622.189.364	1.652.931.252
Regalías (4 %)		76.014.384	78.294.816	80.643.660	83.062.970	85.554.859
Depreciación		126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868	126.937.868
Total egresos deducibles		1.738.296.447	1.768.655.877	1.799.944.136	1.832.190.202	1.865.423.980
(4) Utilidad antes de impuestos	637.153.059	678.057.114	720.170.246	763.527.610	808.165.367	
(5) Margen de utilidad operacional		26,8%	27,7%	28,6%	29,4%	30,2%
(6) Impuestos (-)						
Impuesto de renta (33 %) (-)		210.260.510	223.758.848	237.656.181	251.964.111	266.694.571
Total impuestos		210.260.510	223.758.848	237.656.181	251.964.111	266.694.571
(7) Utilidad neta		426.892.550	454.298.267	482.514.065	511.563.499	541.470.796
(8) Margen de utilidad neta		18,0%	18,6%	19,1%	19,7%	20,3%
(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	553.830.418	581.236.135	609.451.933	638.501.367	668.408.664

9.3.1. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA ZONA MINERA DE REMEDIOS

El VPN del proyecto de implementación de la ruta metalúrgica propuesta para la zona minera de Remedios, a una tasa de descuento del 20%, es de COP 374.188.667

El VPN del proyecto de implementación de la ruta metalúrgica propuesta para la zona minera de Remedios, a una tasa de descuento del 30%, es de COP 30.728.267

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 1,58 y 1,57, respectivamente. 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, ruta metalúrgica 1. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	TASA DE DESCUENTO 20 %	TASA DE DESCUENTO 30 %
Valor presente neto (VPN)	\$374.188.667	\$30.728.267
Tasa interna de retorno (TIR)	31%	31%
Relación beneficio/costo (RB/C)	1,58	1,57

9.4. ESTUDIO FINANCIERO DE LA OPERACIÓN ACTUAL VS. LA OPERACIÓN FUTURA EN LA ZONA MINERA DE REMEDIOS

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 Remedios 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 REMEDIOS

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	4,80 t/día
Volumen de material estéril extraído	1,60 t/día
Volumen de material mineral extraído	3,2 t/día
Capacidad de procesamiento	0,4 t/h
Funcionamiento de la planta	8 h/día
Volumen de procesamiento	3,2 t/día
Turnos por día	1 por día
Días de operación al mes	26 días
Volumen de procesamiento	83,2t/mes
Tenor por tonelada de material de mina	4,7 g/t
Porcentaje total de recuperación de oro	75 %
Recuperación total de oro	3,53g/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 REMEDIOS

Figura 9.26. Costos actuales de la fase de extracción, por mes. Fuente: autores.

DESCRIPCIÓN	COP \$	COP \$/t (*)
Mano de obra	5.716.141	68.704
Partes y accesorios	1.303.545	15.668
Herramientas y suministros	2.365.235	28.428
Combustible y explosivos	2.490.113	29.929
Elementos de seguridad industrial	1.101.934	13.244
Mantenimiento	151.925	1.826
Energía eléctrica	419.118	5.037
Depreciación maquinaria y equipo	761.257	9.150
Total	14.309.268	171.986

* El costo de extracción del mineral por cada tonelada, descontando el valor de la depreciación de los bienes físicos, es de COP 162.837/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	13.548.038
Insumos	1.678.203
Mano de Obra	2.858.078
Mantenimiento	238.000
Servicios públicos	4.703.825
Depreciación de Maquinaria y Equipo	1.752.923
Total costos directos	24.779.068
COSTOS INDIRECTOS	
Costos indirectos de fabricación (CIF)	2.477.907
Total costos directos + indirectos	27.256.974

Figura 9.29. Estructura de los costos actuales de la fase de beneficio. Fuente: autores.

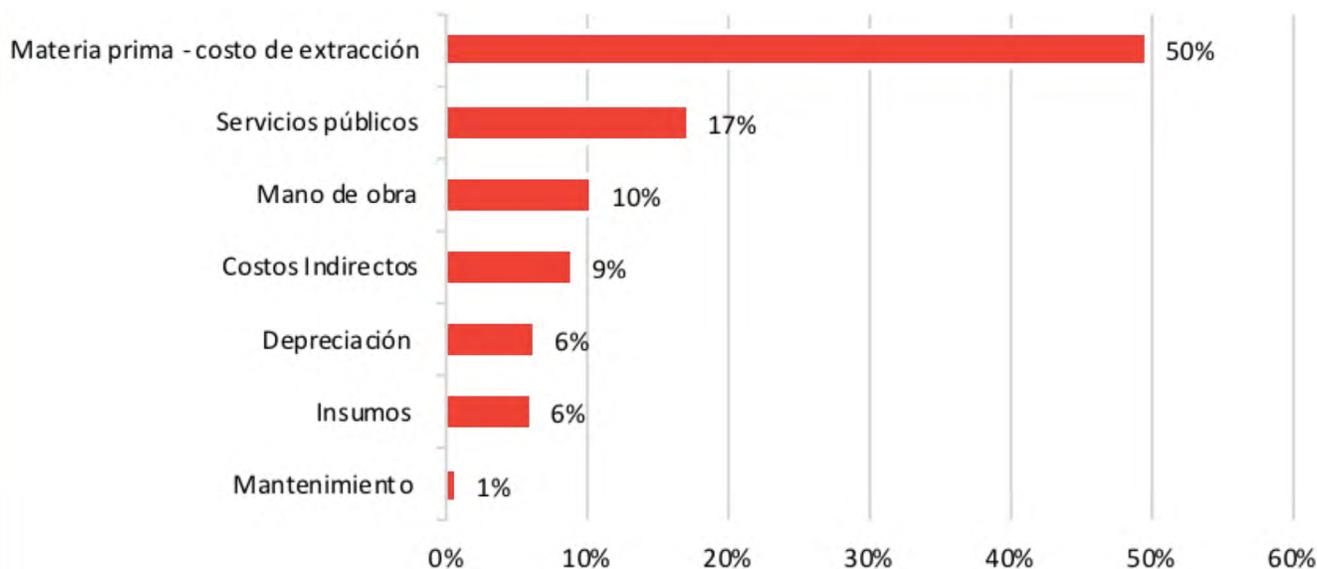


Figura 9.30. Ingresos de la operación actual, por mes. Fuente: autores.

PROCESO	RECUPERACIÓN DE ORO (%)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	RECUPERACIÓN DE ORO (g/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
4,7	75	3,53	293	119.815	35.139.343

* 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	421.672.118	434.322.282	447.351.950	460.772.509	474.595.684
Total ingresos gravables	421.672.118	434.322.282	447.351.950	460.772.509	474.595.684
(2) Egresos deducibles (-)					
Costos operacionales	306.048.613	313.365.747	320.913.055	328.697.958	336.728.120
Depreciación	13.493.508	13.898.313	14.315.262	14.744.720	15.187.062
Regalías	21.035.080	21.035.080	21.035.080	21.035.080	21.035.080
Total egresos deducibles	340.577.201	348.299.140	356.263.398	364.477.758	372.950.262
(3) Utilidad antes de impuestos	81.094.917	86.023.142	91.088.553	96.294.751	101.645.422
(4) Margen de utilidad operacional	19,2%	19,8%	20,4%	20,9%	21,4%
(5) impuestos (-)					
Impuesto de renta (33 %) (-)	26.761.323	28.387.637	30.059.222	31.777.268	33.542.989
Total impuestos	26.761.323	28.387.637	30.059.222	31.777.268	33.542.989
(6) Utilidad neta	54.333.594	57.635.505	61.029.330	64.517.483	68.102.433
(7) Margen de utilidad neta	12,9%	13,3%	13,6%	14,0%	14,3%
(8) Depreciación (+)	21.035.080	21.035.080	21.035.080	21.035.080	21.035.080
(9) Flujo neto de efectivo	75.368.675	78.670.585	82.064.410	85.552.563	89.137.513

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)	75 %	91,3%
Cantidad de oro recuperado por tonelada	3,53 gr	7,94 gr
Costo de producción unitario por gramo de oro	COP 92.938	COP 83.844
Costo de producción unitario por onza troy de oro	USD 964	USD 869
Utilidad antes de impuestos por gramo de oro	COP 23.043	COP 32.137
Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro	USD 239	USD 333
Margen de utilidad operacional (promedio 5 años)	20,3%	28,6%
Utilidad después de impuestos por gramo de oro	COP 15.438	COP 21.532
Utilidad después de impuestos por onza troy de oro	USD 160	USD 223
Margen de utilidad neta (promedio 5 años)	13,6%	19,1%
Indicador de productividad (producto/insumo)	1,29	1,43

Precio de venta por gramo de oro, COP 119 815; precio de venta por onza de troy de oro, USD 1242; tasa de cambio utilizada, COP 3000/USD; factor de conversión utilizado, 1 onza troy = 31,1034768 g.

9.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS. OPERACIÓN FUTURA DE LA ZONA MINERA DE REMEDIOS

La adopción integral de la ruta metalúrgica como una alternativa para mejorar los niveles de eficiencia en el proceso de beneficio de oro le permite a la empresa minera incrementar la productividad total en aproximadamente el 10,85%, al pasar de una razón producto/insumo total del 1,29, 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 1,43 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 de COP 92.938, mientras que se espera que, con la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 83.844. Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios del 10,84 %.

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 Remedios, el costo unitario de producir 1 g de oro es de COP 92.938, mientras que la implementación de la ruta metalúrgica reduce este costo a COP 83.844.

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 del 39,5 %.

9.5. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE BENEFICIO DE ORO EN LA ZONA MINERA DE REMEDIOS

- En el estudio financiero de la operación actual de la planta se utilizó como referencia un porcentaje de recuperación de oro del 75% 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 la zona minera de Remedios es de 4,7 g/t, y que la operación actual permite una recuperación promedio del 75%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 3,53 g por cada tonelada 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 162.837/t, 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 40 % y el 17%, respectivamente.
- Los rubros más representativos en la estructura de costos de la operación actual de la planta son la materia prima y servicios públicos (energía y costo de consumo de agua), cada uno con una participación sobre los costos totales del 50 % y el 17%, 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 8.522 kW/mes, lo que equivale a un costo promedio de energía eléctrica mensual de COP 5.002.414.
- El costo unitario aproximado, teniendo en cuenta los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 92.938 por cada gramo de oro y de USD 964 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 1.242/onza troy.
- La ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) aproximada es de COP 23.043/g de oro y de USD 239/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 20,3%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.
- La ganancia unitaria (después de pagar impuestos) aproximada es de COP 15.438/g de oro y de USD 160/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional del 13,6%, 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 REMEDIOS

- Se estableció un potencial de procesamiento anual para las plantas de beneficio de la zona, después de la implementación de la ruta metalúrgica, de 2.496 toneladas de mineral, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de 8 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 93,1%. Este porcentaje es mayor que la recuperación promedio que se obtiene en la planta en las condiciones actuales.
- T- Teniendo en cuenta que el tenor de corte del material de cabeza promedio que se procesa en la planta debe ser de mínimo 8,7 g, y que la implementación de la ruta metalúrgica en la operación futura permite una recuperación mínima aproximada del 93,1 %, se espera una recuperación de 7,94 g por cada tonelada de mineral beneficiada.
- Se definió un esquema conservador, en el cual se obtiene una recuperación de oro equivalente al 93,1% por cada tonelada de material mineral procesado. Sin embargo, estos rendimientos pueden ser superiores al 95%.
- 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 el costo de los explosivos y combustible, y la mano de obra, cada uno con una participación sobre los costos totales del 38,2 % y el 25 %, 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 41 % y el 16 %, 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, así como 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 33.509 kW/mes.

Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria neta (después de pagar impuestos) de COP 21.532/g de oro y de USD 223/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 19,1%, en promedio, en los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

- 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 4,1 % del total de material de cabeza, es decir que, por cada 8 toneladas procesadas por día, 0,33 toneladas se cianuran.
- El costo unitario aproximado que se puede alcanzar con la implementación de la propuesta de adecuación es de COP 77.138 por cada gramo de oro, y de USD 800 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 1242/onza troy.
- Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) de COP 32.137/g de oro y de USD 333/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional del 28,6%, 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 21.532/g de oro y de USD 223/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 19,1%, 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 Remedios, 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 2,7 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.

Mujer dedicada a las labores mineras en Remedio (Antioquia)
Fotografía tomada por Oscar González, Servicio Geológico Colombiano





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 cerrados en los cuales se efectúa la separación por efecto de la fuerza centrífuga. El funcionamiento de un concentrador de espiral está basado en el principio de concentración a través de un flujo laminar. Este fenómeno se fundamenta en el hecho 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 aledaños. 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

Virgen que protege las labores mineras en Remedios (Antioquia).
Fotografía tomada por Jaime Mojica, Servicio Geológico Colombiano

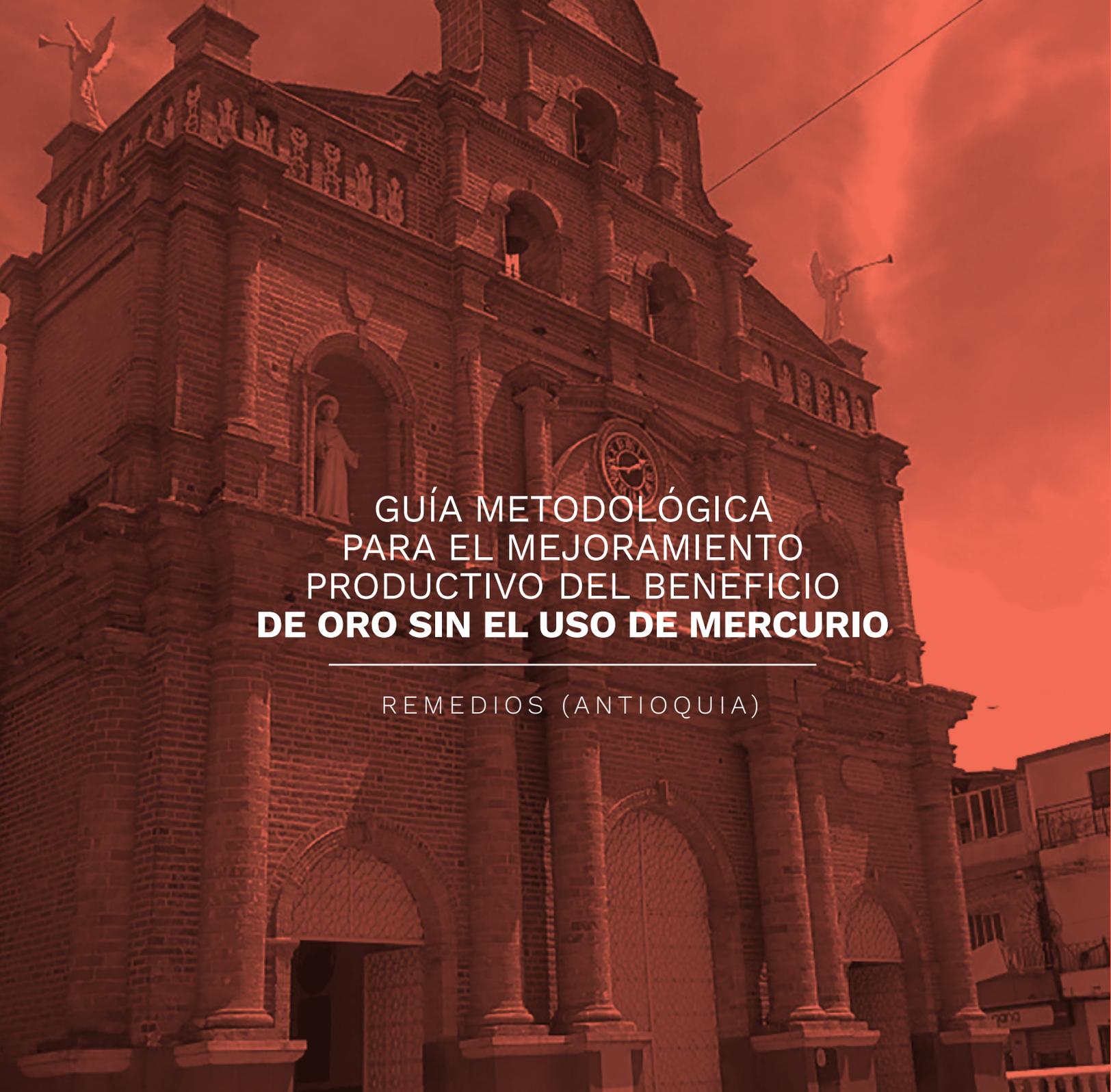


- 911 Metallurgist, P. E. (2018). 0.5 to 50 TPH Industrial Ball Mills. Retrieved November 23, 2018, disponible en <https://www.911metallurgist.com/equipment/ball-mills/>
- Adivire, O. (2006). Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento. Tratamiento de aguas ácidas de mina. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: Dirección de Recursos Minerales y Geoambientales.
- Álzate, M. (2006). Generación de Información básica en geología para incrementar el conocimiento y agregar valor al Proyecto 11 minas, que sirva de plataforma para acceder a recursos económicos de asistencia técnica especializada. Antioquia.
- ARL Positiva. (2017). Guía de seguridad para labores mineras subterráneas. ARL Positiva.
- Austin, L. G. y Concha, F. (eds.). (1994). Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. Concepción, Chile: CYTED.
- 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.
- 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. França, S. C. (eds.). (2010). Tratamento de minérios. 5ª ed. Rio de Janeiro: Cetem.
- Cáceres, G. (2001). Impacto ambiental de la minería del oro. *Revista Metalúrgica UTO*, 22, 19-28. Retrieved from http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S2078-55932001000200004&script=sci_art-text.
- 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 SA. (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 SA.
- 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/~ccolet/Publications/0227-231.pdf>.
- Cox, K. G., Bell, J. D. y Pankhurst, R. J. (1979). *The interpretation of igneous rocks*. Boston: George Allen and Unwin London.
- Denver Equipment Company (1954). *Denver equipment company handbook*. Denver, Colorado.
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramírez, O., Lozano, H. y Vesga, J. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Subzona II B). *Boletín Geológico Ingeominas*, 20(2), 1-173. Bogotá.
- 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>.
- 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.
- 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, Washington, D. C.: CRC Press.
- 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.

- Kawatra, S. (2011). Fundamental principles of froth flotation. En SME mining engineering handbook (1517-1532). Ciudad: Editorial.
- 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.
- 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>.
- 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.
- Metso, (2009) Manual de trituración y cribado
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (1998). Métodos de explotación minera, vetas y aluvión. Bogotá: MinMinas.
- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2015). Glosario técnico 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 estratégico sectorial para la eliminación 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). Determinación y mitigación del potencial de generación ácido en botaderos de estériles mina del proyecto Desarrollo Teniente División El Teniente. En Congreso Geológico Chileno. Concepción, Chile.
- 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.
- 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>.
- Ramírez, G. 1985. Estudio geológico de la Mina de Oro Providencia (Remedios-Antioquia). Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de geóloga en la Universidad Nacional de Colombia.
- Simonin, P. (1867). *La vie souterraine ou les mines et les mineurs*. Paris: Imprimerie Générale de CH. Lahure.
- Skoog, D. A., Holler, F. J. y Nieman, T. A. (2001). Principios de análisis instrumental. 5ª ed. España: Editorial McGraw-Hill.
- Universidad Politécnica de Madrid. (2007). Diseño de explotaciones e infraestructuras mineras subterráneas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Whelan, P. F., and Brown, D. J. (1956), "Particle-Bubble Attachment in Froth Flotation", *Bulletin of the Institute of Mining and Metallurgy*, No. 591, pp. 181-192
- 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, 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”.
- Ministerio de Minas y Energía. Resolución n.º 091 del 20 de febrero de 2015. “por la cual se delimita un Área de Reserva Especial en el municipio de Remedios, departamento de Antioquia”.
- Ministerio de Minas y Energía. Resolución n.º 128 del 8 de marzo del 2017.
- Ministerio de Minas y Energía. 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 40391 del 20 de abril de 2016. “Por la cual se adopta la Política Minera Nacional”.
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1494 de junio 3 de 2003. “Por el cual se delimitan unas zonas de reserva especial y se modifica el Decreto 2200 de 2001”.
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1666 de 2016. “Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, relacionado con la clasificación minera”.
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1722 de 1994. “Por el cual se dictan normas sobre patrimonio adecuado de los establecimientos de crédito”.
- 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)”.
- Presidencia de la República de Colombia. Decreto 4741, M. (2005). “Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”.



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

REMEDIOS (ANTIOQUIA)



El futuro
es de todos

Minenergía

ISBN: 978-958-52317-1-9



9 789585 231719

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO

