



## CONTRATO DE CONSULTORÍA GGC-631-2022

### **CONCEPTUALIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE BUENAS PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS PROCESOS ASOCIADOS A LA MINERÍA DE COBRE Y OTROS MINERALES, ACORDE CON LAS EXPERIENCIAS INTERNACIONALES**

#### ENTREGABLE N°3

### **PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE BUENAS PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL MINERAL DE COBRE Y OTROS MINERALES, ACORDE CON LAS EXPERIENCIAS INTERNACIONALES**

**Bogotá D.C.**

**Diciembre 21 de 2022**



## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>1 RESUMEN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b> .....	<b>18</b>
<b>2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
3.1 Objetivo General .....	22
3.2 Objetivos Específicos .....	22
<b>4 METODOLOGÍA GENERAL</b> .....	<b>23</b>
<b>5 MARCO CONCEPTUAL</b> .....	<b>26</b>
5.1 Definiciones.....	26
5.1.1 Definiciones adoptadas en el marco normativo nacional colombiano.....	26
5.1.2 Definiciones reconocidas en el marco Internacional .....	32
5.2 Minería de cobre en el mundo .....	38
5.3 Minería de cobre en Colombia.....	41
5.4 Normatividad vigente.....	44
5.4.1 Constitución Política de 1991.....	45
5.4.2 Planes nacionales de desarrollo .....	46
5.4.3 Código de minas (Ley 685 del 15 de agosto de 2001) .....	47
5.4.4 Leyes.....	48
5.4.5 Decretos .....	50
5.4.6 Resoluciones .....	50
5.4.6.1 Ambiental .....	51
a. Licenciamiento ambiental.....	53
I. Términos de referencia para estudios ambientales.....	54
II. Trámite de licenciamiento ambiental .....	54
b. Calidad del medio ambiente.....	55
I. Recurso aire.....	55
II. Recurso hídrico.....	55
III. Residuos sólidos .....	57
5.4.7 Gestión de riesgo.....	57
5.4.8 Ahorro y uso eficiente de agua y energía.....	57
5.4.9 Gestión del cambio climático .....	58
5.4.10 Política de transición energética .....	58
5.4.11 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	60



5.4.12	Economía circular .....	61
<b>6</b>	<b>BUENAS PRÁCTICAS EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE .....</b>	<b>64</b>
6.1	Buenas prácticas transversales a los procesos de beneficio y transformación de cobre, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	67
6.2	Mejores técnicas y tecnologías disponibles .....	72
<b>7</b>	<b>LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS PRÁCTICAS .....</b>	<b>74</b>
7.1	LÍNEA ESTRATÉGICA - CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL MINERAL .....	77
7.1.1	Lineamiento No. 1: Caracterización mineralógica, química y física .....	77
7.1.1.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre .....	77
7.1.1.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	77
7.1.1.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	77
7.1.1.4	Componente 1. Tipo de minerales y concentración del material a beneficiar y transformar .....	78
a.	Alcance .....	78
I.	Información requerida .....	78
II.	Actividades a desarrollar .....	79
7.1.2	Lineamiento No. 2: Identificar la ley de cobre y los minerales asociados del material explotado .....	79
7.1.2.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre .....	79
7.1.2.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS .....	79
7.1.2.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	80
7.1.2.4	Componente 1. Establecer la concentración de cobre y minerales asociados ..	80
a.	Alcance .....	80
I.	Información requerida .....	80
II.	Actividades a desarrollar .....	80
7.2	LÍNEA ESTRATÉGICA - PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE .....	82
7.2.1	Lineamiento No. 1: Realizar estudio metalúrgico .....	82
7.2.1.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre .....	82
7.2.1.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	82
7.2.1.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	82
7.2.1.4	Componente 1. Procesos hidrometalúrgicos para el beneficio y transformación de óxidos de cobre .....	83
a.	Alcance .....	83
I.	Información requerida .....	83



II.	Actividades a desarrollar.....	83
7.2.1.5	Componente 2. Procesos pirometalúrgicos para el beneficio y transformación de sulfuros de cobre.....	84
a.	Alcance.....	84
I.	Información requerida.....	84
II.	Actividades a desarrollar.....	84
7.2.1.6	Componente 3. Procesos hidrometalúrgicos a través de la biolixiviación para el beneficio y transformación de óxidos y sulfuros de cobre.....	85
a.	Alcance.....	85
I.	Información requerida.....	85
II.	Actividades a desarrollar.....	85
7.2.2	Lineamiento No. 2: Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre.....	86
7.2.2.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	86
7.2.2.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS.....	86
7.2.2.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento.....	87
7.2.2.4	Componente 1. Establecer la composición del material a triturar.....	87
a.	Alcance.....	87
I.	Información requerida.....	87
II.	Actividades a desarrollar.....	87
7.2.2.5	Componente 2. Selección del tipo y tamaño de los equipos de trituración.....	88
a.	Alcance.....	88
I.	Información requerida.....	88
II.	Actividades a desarrollar.....	88
7.2.2.6	Componente 3. Definir tipo de molienda (convencional / no convencional).....	89
a.	Alcance.....	89
I.	Información requerida.....	89
II.	Actividades a desarrollar.....	89
7.2.2.7	Componente 4. Localización de los equipos de trituración en la planta de beneficio y transformación.....	90
a.	Alcance.....	90
I.	Información requerida.....	90
II.	Actividades a desarrollar.....	90
7.2.3	Lineamiento No. 3: Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre.....	91
7.2.3.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	91
7.2.3.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS.....	91



7.2.3.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	92
7.2.3.4	Componente 1. Caracterización del mineral a concentrar .....	92
a.	Alcance 1.....	92
I.	Información requerida .....	92
II.	Actividades a desarrollar.....	92
b.	Alcance 2.....	93
I.	Información requerida .....	93
II.	Actividades a desarrollar.....	94
7.2.3.5	Componente 2. Definir tipo de flotación y sus circuitos.....	94
a.	Alcance 1.....	94
I.	Información requerida .....	94
II.	Actividades a desarrollar.....	95
b.	Alcance 2.....	95
I.	Información requerida .....	95
II.	Actividades a desarrollar.....	96
7.2.4	Lineamiento No. 4: Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación del cobre .....	96
7.2.4.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	96
a.	Pirometalurgia .....	96
b.	Hidrometalurgia .....	97
7.2.4.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	97
7.2.4.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	98
7.2.4.4	Componente 1. Identificar parámetros minero metalúrgicos para la fundición ..	98
a.	Alcance.....	98
I.	Información requerida .....	98
II.	Actividades a desarrollar.....	98
7.2.4.5	Componente 2. Establecer las características de los equipos pirometalúrgicos	99
a.	Alcance 1.....	99
I.	Información requerida .....	99
II.	Actividades a desarrollar.....	99
b.	Alcance 2.....	101
I.	Información requerida .....	101
II.	Actividades a desarrollar.....	102
7.2.4.6	Componente 3. Especificar la técnica de lixiviación o biolixiviación a usar .....	102
a.	Alcance 1.....	102
I.	Información requerida .....	102
II.	Actividades a desarrollar.....	102



b.	Alcance 2.....	103
I.	Información requerida .....	103
II.	Actividades a desarrollar.....	104
7.2.4.7	Componente 4. Establecer los agentes oxidantes y reductores para el proceso 104	
a.	Alcance 1.....	104
I.	Información requerida .....	104
II.	Actividades a desarrollar.....	105
7.2.4.8	Componente 5. Determinar variables críticas del proceso de biolixiviación ....	105
a.	Alcance.....	105
I.	Información requerida .....	105
II.	Actividades a desarrollar.....	106
7.2.4.9	Componente 6. Definir la ubicación y área del proceso .....	107
a.	Alcance.....	107
I.	Información requerida .....	107
II.	Actividades a desarrollar.....	107
7.2.4.10	Componente 7. Identificar variables y equipos en el proceso de separación sólido - líquido (SX).....	107
a.	Alcance 1.....	107
I.	Información requerida .....	107
II.	Actividades a desarrollar.....	108
b.	Alcance 2.....	108
I.	Información requerida .....	109
II.	Actividades a desarrollar.....	109
c.	Alcance 3.....	109
I.	Información requerida .....	109
II.	Actividades a desarrollar.....	109
d.	Alcance 4.....	110
I.	Información requerida .....	110
II.	Actividades a desarrollar.....	110
e.	Alcance 5.....	110
I.	Información requerida .....	110
II.	Actividades a desarrollar.....	110
7.2.4.11	Componente 8. Definir variables necesarias para la remoción de impurezas y recuperación mediante electroobtención .....	111
a.	Alcance 1.....	111
I.	Información requerida .....	111
II.	Actividades a desarrollar.....	111



b.	Alcance 2.....	111
I.	Información requerida .....	111
II.	Actividades a desarrollar.....	112
<b>7.3</b>	<b>LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA EL BENEFICIO DEL MINERAL DE COBRE.....</b>	<b>113</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Lineamiento No. 1. Trituración del mineral.....</b>	<b>113</b>
7.3.1.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	113
7.3.1.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	113
7.3.1.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	114
7.3.1.4	Componente 1. Trituración primaria o gruesa .....	114
a.	Alcance.....	114
I.	Información requerida .....	114
II.	Actividades a desarrollar.....	115
7.3.1.5	Componente 2. Trituración fina.....	115
a.	Alcance.....	115
I.	Información requerida .....	115
II.	Actividades a desarrollar.....	115
<b>7.3.2</b>	<b>Lineamiento No. 2. Molienda del mineral .....</b>	<b>116</b>
7.3.2.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	116
7.3.2.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	116
7.3.2.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	117
7.3.2.4	Componente 1. Ajuste de variables operacionales para la molienda .....	117
a.	Alcance.....	117
I.	Información requerida .....	117
II.	Actividades a desarrollar.....	118
<b>7.3.3</b>	<b>Lineamiento No. 3. Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado.....</b>	<b>119</b>
7.3.3.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	119
7.3.3.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	119
7.3.3.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	120
7.3.3.4	Componente 1. Acondicionamiento del material a partir de las características minero-metalúrgicas del mineral .....	120
a.	Alcance.....	120
I.	Información requerida .....	120
II.	Actividades a desarrollar.....	121



7.3.3.5	Componente 2. Funcionamiento de los reactivos en el proceso de concentración	121
	a. Alcance.....	121
	I. Información requerida.....	121
	II. Actividades a desarrollar.....	121
7.4	LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO	123
7.4.1	Lineamiento No. 1. Desarrollo del proceso de fundición .....	123
7.4.1.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	123
7.4.1.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	125
7.4.1.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	126
7.4.1.4	Componente 1. Minerales presentes en el concentrado .....	126
	a. Alcance.....	126
	I. Información requerida .....	127
	II. Actividades a desarrollar.....	127
7.4.1.5	Componente 2. Contenido de humedad del concentrado .....	127
	a. Alcance.....	127
	I. Información requerida .....	127
	II. Actividades a desarrollar.....	127
7.4.1.6	Componente 3. Fusión mediante el uso de hornos .....	128
	a. Alcance.....	128
	I. Información requerida .....	128
	II. Actividades a desarrollar.....	129
7.4.1.7	Componente 4. Conversión mediante el uso de hornos de conversión o de fusión	129
	a. Alcance.....	129
	I. Información requerida .....	129
	II. Actividades a desarrollar.....	130
7.4.1.8	Componente 5. Pirorrefinación mediante el uso de hornos .....	131
	a. Alcance.....	131
	I. Información requerida .....	131
	II. Actividades a desarrollar.....	132
7.4.2	Lineamiento No. 2. Desarrollo del proceso de electrorrefinación .....	132
7.4.2.1	Componente 1. Concentración en celdas electrolíticas .....	134
	a. Alcance.....	134
	I. Información requerida .....	134





II. Actividades a desarrollar.....	134
<b>7.5 LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO</b>	<b>136</b>
<b>7.5.1 Lineamiento No. 1. Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre. ....</b>	<b>136</b>
7.5.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	136
7.5.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS .....	137
7.5.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	137
7.5.1.4 Componente 1. Preparación del sitio.....	138
a. Alcance 1.....	138
I. Información requerida .....	138
II. Actividades a desarrollar.....	139
b. Alcance 2.....	139
I. Información requerida .....	140
II. Actividades a desarrollar.....	140
7.5.1.5 Componente 2. Transporte del mineral y apilado.....	140
a. Alcance 1.....	140
I. Información requerida .....	140
II. Actividades a desarrollar.....	141
7.5.1.6 Componente 3. Tratamiento de disolución .....	141
a. Alcance 1.....	141
I. Información requerida .....	141
II. Actividades a desarrollar.....	142
b. Alcance 2.....	143
I. Información requerida .....	143
II. Actividades a desarrollar.....	143
<b>7.5.2 Lineamiento No. 2. Consideraciones operacionales de la extracción por solventes</b>	<b>144</b>
7.5.2.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	144
7.5.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	144
7.5.2.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	145
7.5.2.4 Componente 1. Desarrollo de las etapas de extracción.....	145
a. Alcance 1.....	145
I. Información requerida .....	146
II. Actividades a desarrollar.....	146



b.	Alcance 2.....	146
I.	Información requerida .....	146
II.	Actividades a desarrollar.....	146
c.	Alcance 3.....	147
I.	Información requerida .....	147
II.	Actividades a desarrollar.....	147
7.5.3	Lineamiento No. 3. Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención.....	147
7.5.3.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	147
7.5.3.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS .....	148
7.5.3.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	148
7.5.3.4	Componente 1. Condiciones del sistema eléctrico.....	149
a.	Alcance 1.....	149
I.	Información requerida .....	149
II.	Actividades a desarrollar.....	149
b.	Alcance 2.....	149
I.	Información requerida .....	150
II.	Actividades a desarrollar.....	150
7.5.3.5	Componente 2. Condiciones en el medio acuoso .....	150
a.	Alcance 1.....	150
I.	Información requerida .....	150
II.	Actividades a desarrollar.....	150
b.	Alcance 2.....	151
I.	Información requerida .....	151
II.	Actividades a desarrollar.....	151
7.6	LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE.....	152
7.6.1	Lineamiento No. 1. Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación .....	152
7.6.1.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.....	152
7.6.1.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS .....	153
7.6.1.3	Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento .....	153
7.6.1.4	Componente 1. Caracterización microbiológica .....	154
a.	Alcance.....	154
I.	Información requerida .....	154
II.	Actividades a desarrollar.....	154



b.	Alcance 2.....	154
I.	Información requerida .....	154
II.	Actividades a desarrollar.....	155
<b>7.7</b>	<b>LÍNEA ESTRATÉGICA - SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL.....</b>	<b>157</b>
7.7.1	Lineamiento No. 1. Seguimiento y control a la ley de cobre del material explotado	158
7.7.1.1	Componente 1. Concentración del cobre y minerales asociados .....	158
a.	Alcance 1.....	158
I.	Información requerida .....	158
II.	Actividades a desarrollar.....	158
7.7.2	Lineamiento No. 2. Realizar seguimiento y manejo de las variables operaciones de la planta .....	159
7.7.2.1	Componente 1. Automatización de procesos .....	159
a.	Alcance.....	159
I.	Información requerida .....	159
II.	Actividades a desarrollar.....	159
7.7.2.2	Componente 2. Almacenamiento de datos operacionales .....	161
a.	Alcance.....	161
I.	Información requerida .....	161
II.	Actividades a desarrollar.....	161
7.7.2.3	Componente 3. Control y ajuste de la operación .....	161
a.	Alcance.....	161
I.	Información requerida .....	161
II.	Actividades a desarrollar.....	161
7.7.3	Lineamiento No. 4. Realizar el mantenimiento a los equipos e instalaciones de la planta .....	162
7.7.3.1	Componente 1. Mantenimiento preventivo .....	162
a.	Alcance.....	162
I.	Información requerida .....	162
II.	Actividades a desarrollar.....	162
7.7.3.2	Componente 2. Mantenimiento predictivo .....	163
a.	Alcance.....	163
I.	Información requerida .....	163
II.	Actividades a desarrollar.....	163
7.7.4	Lineamiento No. 5. Seguimiento y control ambiental .....	163
7.7.4.1	Componente 1. Calidad del medio ambiente.....	163
a.	Alcance.....	163



I.	Información requerida .....	163
II.	Actividades a desarrollar.....	164
7.7.4.2	Componente 2. Uso eficiente de recursos.....	166
a.	Alcance.....	166
I.	Información requerida .....	166
II.	Actividades a desarrollar.....	166
7.8	LÍNEA ESTRATÉGICA - ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE .....	169
7.8.1	Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre .....	169
7.8.2	Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS .....	170
7.8.3	Lineamiento No. 1. Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre .....	170
7.8.3.1	Componente 1. Circularidad en el proceso de trituración y molienda para el beneficio del cobre .....	170
a.	Alcance.....	170
I.	Información requerida .....	170
II.	Actividades a desarrollar.....	170
7.8.3.2	Componente 2. Circularidad en el proceso de concentración del cobre.....	172
a.	Alcance 1.....	172
I.	Información requerida .....	172
II.	Actividades a desarrollar.....	172
b.	Alcance 2.....	173
I.	Información requerida .....	173
II.	Actividades a desarrollar.....	174
7.8.4	Lineamiento No. 2. Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación de cobre .....	174
7.8.4.1	Componente 1. Circularidad en procesos pirometalúrgicos.....	174
a.	Alcance 1.....	174
I.	Información requerida .....	175
II.	Actividades a desarrollar.....	175
b.	Alcance 2.....	176
I.	Información requerida .....	176
II.	Actividades a desarrollar.....	177
c.	Alcance 3.....	178
I.	Información requerida .....	178
II.	Actividades a desarrollar.....	178
7.8.4.2	Componente 2. Circularidad en procesos hidrometalúrgicos.....	179



a.	Alcance .....	179
I.	Información requerida .....	179
II.	Actividades a desarrollar .....	179
7.8.4.3	Componente 3. Circularidad en el proceso de biolixiviación .....	181
a.	Alcance .....	181
I.	Información requerida .....	181
II.	Actividades a desarrollar .....	181
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>182</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>187</b>



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de calidad de agua y límites normativos para vertimientos del sector minero. ....	56
Tabla 2. Cobre como mineral estratégico en el CONPES. ....	59
Tabla 3. Identificación de impactos para los procesos de beneficio y transformación del cobre. ....	66
Tabla 4. Buenas prácticas procesos de beneficio del mineral de cobre. ....	69
Tabla 5. Agente usado en la operación de lixiviación. ....	105
Tabla 6. Factores y condiciones limitantes. ....	106
Tabla 7. Tipo de transporte a usar y el sistema de pilas. ....	141
Tabla 8. Puntos que se deben tener en cuenta sobre la red de riego. ....	143
Tabla 9. Algunos microorganismos y sus temperaturas óptimas. ....	155
Tabla 10. Procesos de beneficio. ....	160
Tabla 11. Procesos de transformación. ....	160
Tabla 12. Ejemplos de los procesos de beneficio y transformación. ....	162
Tabla 13. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de trituración y molienda. ....	171
Tabla 14. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de concentración. ....	173
Tabla 15. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de secado de concentrados. ....	176
Tabla 16. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de fundición. ....	178
Tabla 17. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de Electrorrefinación. ....	179
Tabla 18. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de hidrometalurgia. ....	180



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de proyectos y prospectos para mineral de cobre en Colombia.....	19
Figura 2. Metodología de recolección de información primaria y secundaria. ....	23
Figura 3. Estructura metodológica de lineamientos.....	24
Figura 4. Líneas estratégicas para el beneficio y la transformación del mineral de cobre en Colombia. ....	25
Figura 5. Jerarquía normativa para el tratamiento de la regulación enfocada a la evaluación de minerales estratégicos. ....	44
Figura 6. Procesos para el beneficio y la transformación del cobre.....	64
Figura 7. Líneas estratégicas para el beneficio y la transformación del cobre.....	75
Figura 8. Tecnologías de lixiviación según el tipo y ley del mineral.....	103
Figura 9. Diagrama de circularidad en el secado de concentrados de cobre. ....	175
Figura 10. Esquema de insumos y productos del proceso de fusión de concentrados de cobre. ....	176
Figura 11. Esquema de insumos y productos del proceso de conversión de mata de cobre. ....	177
Figura 12. Esquema de insumos y productos del proceso de refinación de cobre blíster. ....	177



## INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con el beneficio y transformación de cobre, acorde con las buenas prácticas internacionales, el cual se elaboró en el marco del Contrato de Consultoría GGC-631-2022 celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía (Dirección de Minería Empresarial) y la empresa ATG Ltda. Dicha propuesta fue desarrollada teniendo en cuenta tanto la información nacional disponible en las diferentes entidades existentes como información internacional correspondiente, así como las conclusiones derivadas de los procesos de presentación, validación y ajuste, se realizaron con los diferentes actores del sector minero en Colombia.

El proceso productivo del cobre inicia con la exploración geológica, etapa en la cual se detectan los yacimientos y su naturaleza. Durante la etapa de explotación, se extraen las rocas y se transportan hacia una primera etapa de conminución, denominada trituración, donde el mineral es reducido de tamaño mediante la acción de tres tipos de trituradoras hasta alcanzar un tamaño, a hoy, no mayor a media pulgada.

Debido a que el cobre en particular se encuentra en forma oxidada y/o sulfurada, para cada mena existe un tratamiento distinto. El cobre sulfurado, obtenido en forma de grandes rocas desde la mina, después de la etapa de trituración, continúa reduciendo su tamaño en la fase de molienda. Posteriormente viene la etapa de flotación o concentración del cobre, pasando así al proceso de fundición, en la que se logra la purificación del mineral, para finalmente proceder a la obtención de cátodos de cobre de alta pureza, mediante el proceso de electrorrefinación. En el caso del cobre oxidado, de la trituración pasa a un proceso de lixiviación y de concentración mediante extracción por solventes, para lograr por último una disolución selectiva mediante electroobtención, e igualmente alcanzar la forma de cátodos de cobre.

El presente trabajo se realiza con el fin de establecer los lineamientos técnicos a seguir en los procesos de beneficio y transformación del cobre, para lo cual se evaluó integralmente la información recopilada, identificando y seleccionando las buenas prácticas y técnicas disponibles a nivel internacional, que fueran aplicables al sector minero colombiano.

Para el efecto, se definieron inicialmente las Líneas Estratégicas, que permiten ejecutar de manera adecuada cada proceso que se lleva a cabo al momento no solo de beneficiar y transformar el mineral de cobre, sino también los procesos anteriores que se realizan, como la extracción del mineral y posteriores como el seguimiento, medición y control del mineral.





El documento contiene una primera parte relacionada con el marco conceptual para la elaboración de la propuesta de lineamientos técnicos, que incluye una descripción de la minería del cobre en el mundo y en Colombia, la normatividad vigente y las buenas prácticas transversales a los procesos de beneficio y transformación del cobre, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Posteriormente se presenta la estructuración y desarrollo de los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas relacionadas con el beneficio y transformación del cobre, donde se describen en detalle los componentes y alcances de cada lineamiento.

Los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas que son propuestos recogen la experiencia de empresas internacionales de talla mundial que adelantan labores de minería en varios países latinoamericanos, lo que servirá de herramienta para que la comunidad minera pueda adoptar a su propio ejercicio dichas prácticas y su resultado se pueda ver reflejado en el aumento de la productividad de la actividad minera de cobre, donde además se apliquen igualmente buenas prácticas durante su operación que coadyuven a controlar de forma efectiva el impacto de esas actividades sobre el medioambiente y las comunidades.



## 1 RESUMEN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Los lineamientos técnicos de política propuestos en el presente documento, parten del marco regulatorio minero y ambiental que se encuentra actualmente vigente, pretendiendo que sean armónicos y coherentes con los términos y dimensiones del actual ordenamiento. En éstos lineamientos se busca presentar los objetivos con líneas de base e indicadores, que sirvan de referencia en la planeación y desarrollo del beneficio y la transformación del mineral de cobre por parte de los titulares mineros y a la vez, puedan ser integrados al sistema de evaluación y seguimiento por parte de la autoridad minera, permitiendo medir a futuro el estado de implementación y avance en la aplicación de dichos lineamientos, con miras al desarrollo de una minería sostenible y más competitiva.

En Colombia el cobre es considerado un mineral estratégico, según lo establecido en la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 del Ministerio de Minas y Energía (Minenergía, 2012), por tal razón, se considera importante profundizar en el conocimiento de este mineral a nivel nacional por parte de los actores y empresas mineras.

Empresas ampliamente reconocidas a nivel mundial se han interesado en adelantar campañas de exploración de yacimientos de cobre en Colombia en los últimos años, las cuales han logrado identificar algunos prospectos. Hoy existen alrededor de 13 proyectos cupríferos (ver **Figura 1**), de los cuales, algunos se encuentran en las etapas tempranas de prospección, otros en etapa de exploración con proyección a convertirse en proyectos de explotación de mediana y gran escala. Solo uno de los proyectos se encuentra actualmente en explotación. Con este potencial, el país podría convertirse en los próximos años, en un proveedor de cobre para el mundo.

Actualmente, el proyecto El Roble, en el departamento del Chocó, es el único que se encuentra en etapa de explotación.

Las iniciativas mineras cupríferas en etapas de prospección y exploración corresponden a los proyectos de Volador, Mandé Norte, El Carmen, San Matías y Cómita, todos en el departamento del Chocó, Pantanos y Quebradona en el departamento de Antioquia y Mocoa en el departamento del Putumayo.

Así mismo, entre las denominadas Áreas Estratégicas Mineras que se encuentran delimitadas por la ANM, es decir aquellas áreas especiales que se encuentran libres y cuentan con un alto potencial para minerales estratégicos en el país, se destacan las que se han adjudicado en contrato de concesión especial, mediante procesos de selección objetiva, cinco Áreas Estratégicas Mineras de cobre, de las seis disponibles en los departamentos de La Guajira (en jurisdicción



de los municipios La Jagua del Pilar y Urumita) y Cesar (en jurisdicción de los municipios La Paz y San Diego).



**Figura 1. Ubicación de proyectos y prospectos para mineral de cobre en Colombia.**  
Fuente: (UPME, 2021).

Como resultado de la revisión de la información secundaria investigada para el desarrollo de la presente consultoría, se identificó que las mayores empresas mineras productoras de cobre del mundo se encuentran localizadas en Chile, Perú, China y Estados Unidos, las que compiten por suministrar un metal que tiene una demanda global elevada y constante y que puede utilizarse en una serie de aplicaciones, adicionalmente, se halló valiosa información para la caracterización de las buenas prácticas de beneficio y transformación, indispensables en la construcción de las propias y correspondientes del sector en Colombia.

Para lograr el objetivo propuesto y con base a lo anteriormente mencionado, se establecieron ocho (8) Líneas Estratégicas Básicas que permitirán estandarizar los procedimientos a utilizar por las empresas mineras en los diferentes momentos en que se encuentren, permitiendo llegar a la meta propuesta. Dichas Líneas Estratégicas son: *i) caracterización del mineral, ii) planificación y diseño de los procesos de beneficio y transformación del cobre, iii) desarrollo de procesos para el beneficio del mineral de cobre, iv) desarrollo de procesos para la transformación pirometalúrgica del mineral de cobre sulfurado, v) desarrollo de procesos para la transformación hidrometalúrgica del mineral de cobre oxidado, vi) desarrollo de procesos para la transformación por biolixiviación del mineral de cobre, vii) seguimiento, medición y control y viii), economía circular en los procesos de beneficio y transformación del cobre.*



## 2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Como se enuncia en el *Libro Blanco del Cobre en Colombia* (Ávila Pinto, 2021):

La demanda de cobre en el mundo muestra un fuerte ritmo de crecimiento sostenido en el corto, mediano y largo plazo como consecuencia de factores que incluyen el aumento en el nivel de ingreso, la urbanización, el incremento de la población y, especialmente, la transición energética que consiste en el remplazo gradual de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables como la hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, entre otras. Paneles solares, turbinas de viento y vehículos eléctricos, necesitan de cobre y otros minerales, sin mencionar su uso en construcción, electrónica e insumos médicos. (p.6)

El Ministerio de Minas y Energía considera que la minería de cobre representa una oportunidad económica para el país, ya que, de acuerdo con las perspectivas globales, existe una creciente demanda de cobre refinado en el mundo, en gran medida suscitado por cambios en las fuentes de energía convencionales. Esta demanda resulta trascendental tanto para los países que cuentan con reservas de cobre, como para los que tienen capacidad de refinación.

Las expectativas frente a este panorama se concentran en el incremento de la participación del país en el mercado del cobre, abriendo la posibilidad de crear encadenamientos productivos de gran impacto alrededor de la minería de este metal. El desarrollo de este tipo de proyectos requiere la incorporación de buenas prácticas en los procesos técnicos de beneficio y transformación, en donde se garantice la apropiada interacción de las operaciones con su entorno a nivel técnico, ambiental y social.

Sin duda, la aplicación de buenas prácticas en la actividad minera derivará en el desarrollo sostenible de este sector, por ello, es fundamental que los procesos de beneficio de minerales, y en particular, los de cobre, sean realizados con las mejores técnicas disponibles, promoviendo el uso eficiente de los recursos y en armonía con el medio ambiente.

Las empresas que actualmente ejecutan operaciones mineras formales en Colombia, así como las que empiezan a operar en el país, se deberán comprometer con la implementación de acciones encaminadas a la adopción de los lineamientos o guías de buenas prácticas internacionales que las vayan perfilando como operaciones de talla mundial comprometidas con desarrollar procesos mineros con los mejores estándares técnicos y ambientales.

Al Ministerio de Minas y Energía, dentro de sus funciones, le corresponde las de formular políticas orientadas a que las actividades que desarrollen las empresas del sector minero-energético garanticen el desarrollo sostenible de los recursos naturales no renovables y la de adoptar planes de desarrollo del sector minero



energético del país en concordancia con los Planes Nacionales de Desarrollo y con la política del Gobierno Nacional,

En este sentido, el Ministerio de Minas y Energía, a través de la Dirección de Minería Empresarial, impulsó la elaboración de lineamientos técnicos, en apoyo a la formulación y desarrollo de la política nacional, mediante la contratación de una consultoría durante el año 2022, que tenga como resultado los documentos con los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar las actividades de beneficio y transformación del mineral de cobre.

En la actualidad la experticia que tiene Colombia en la minería de cobre es baja, por lo que a nivel nacional no se cuenta con metodologías que reglamenten y guíen el desarrollo eficaz de los procesos técnicos relacionados con el beneficio y transformación de minerales de cobre y que además incentiven la aplicación de buenas prácticas y su estandarización.

Por lo anteriormente mencionado, los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas que se proponen, sintetizan la experiencia de empresas internacionales de talla mundial con labores de minería en varios países latinoamericanos, lo que servirá de herramienta para que la comunidad minera la asuma y ponga en marcha, y cuyo resultado se vea reflejado en el aumento de la productividad de la actividad minera de cobre, donde además dichas buenas prácticas repercutan en que desde la operación se pueda controlar de forma efectiva el impacto de las actividades mineras de beneficio y transformación del cobre sobre el medioambiente y las comunidades.



### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Elaboración de una propuesta de lineamientos técnicos de buenas prácticas para estandarizar los procesos asociados a la minería de cobre y otros minerales, acorde con las experiencias internacionales.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- 1.** Determinar las buenas prácticas que se deben aplicar en el desarrollo del beneficio y la transformación del mineral de cobre en el sector minero nacional.
- 2.** Establecer lineamientos técnicos que se encuentren enmarcados dentro de la normatividad vigente para el adecuado desarrollo del beneficio y la transformación del mineral de cobre en Colombia.

## 4 METODOLOGÍA GENERAL

La conceptualización y elaboración de una propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos asociados a la minería de cobre y otros minerales, acorde con las experiencias internacionales, tiene como base la información secundaria nacional e internacional obtenida mediante brochures, capítulos de libros, consultas en páginas web, documentos oficiales, enciclopedias, estudios técnicos y ambientales, guías minero-ambientales, informes técnicos, presentaciones, publicaciones, reportes, trabajos universitarios y demás documentación relacionada con los temas de la presente consultoría, más información primaria obtenida a partir de las reuniones con empresas y actores del sector que permitieron la generación de espacios para que los participantes pudieran retroalimentar al equipo consultor de ATG Ltda., logrando interacción e intercambio de información y experiencias.

La información obtenida mediante la recopilación y análisis de los documentos analizados permitió una mejor interacción al momento de realizar las entrevistas con empresas y actores mineros, ya que se logró validar si las experiencias y buenas prácticas implementadas a nivel internacional se realizaban actualmente a nivel nacional en el proyecto El Roble (único proyecto en explotación de cobre en Colombia), o a futuro en alguna de las empresas que hicieron parte de la recopilación de la información. Adicionalmente las reuniones también permitieron ampliar las lecturas mediante recomendaciones aportadas. Por lo anterior, en la **Figura 2** se muestra el esquema de la información primaria y secundaria recopilada.



**Figura 2. Metodología de recolección de información primaria y secundaria.**  
**Fuente: ATG Ltda., (2022).**

La construcción de los lineamientos fue realizada por el equipo de trabajo de ATG Ltda., conformado éste por profesionales de diferente formación, esto es,



ingeniería de minas, metalurgia, procesos e ingeniería ambiental, empleando para ello el método heurístico de análisis, abordando y evaluando integralmente la información recopilada, identificando y seleccionando conceptos, criterios, directrices, buenas prácticas y técnicas disponibles a nivel internacional, que fueran aplicables al sector minero colombiano, teniendo en cuenta las particularidades del mismo y del territorio.

Antes de abordar la estructuración de las Líneas Estratégicas, es importante definir el concepto de Lineamiento, con el fin de identificar la interrelación que dicho concepto tiene con el planteamiento que se presenta a continuación:

“**Lineamiento:** es una orientación de carácter general, corresponde a una disposición o directriz que debe ser implementada en las entidades del Estado colombiano” (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, 2015, párr. 06).

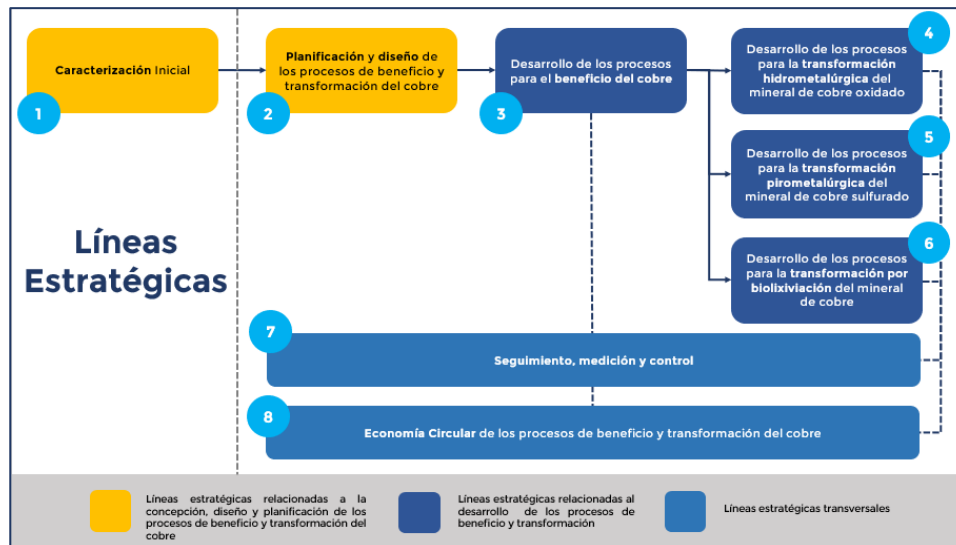
A partir del conocimiento y definición de Línea Estratégica (objetivos, conceptos y acciones), y del significado de *Lineamiento* (orientación, disposición, directriz), se formularon cuestionamientos respecto a los procesos de beneficio y transformación del cobre, los cuales se resolvieron a través de un paso a paso, partiendo de la creación de lineamientos, los cuales fueron desarrollados mediante el planteamiento de *Componentes* (subproceso o actividad necesaria para realizar el lineamiento), *Alcance* (propósito y limitación del componente), *Información Requerida* (¿Qué se necesita para desarrollar o conocer el componente?) y *Actividad* (¿cómo lograr construir la información requerida para satisfacer el componente y por ende el lineamiento planteado?). Ver **Figura 3**.



**Figura 3. Estructura metodológica de lineamientos.**  
Fuente: ATG Ltda., (2022).



En síntesis, los lineamientos se estructuraron a partir de componentes, que corresponden a la información que se requiere conocer para su aplicación. Para cada componente se establece un alcance, y unas actividades específicas que permitirán su desarrollo, lo que en conjunto estructura lineamientos sólidos y consistentes que dan respuesta a necesidades y requerimientos para cada Línea Estratégica. En la **Figura 4** podemos evidenciar cuáles son las líneas que serán abordadas a lo largo del presente documento.



**Figura 4. Líneas estratégicas para el beneficio y la transformación del mineral de cobre en Colombia.**  
**Fuente: ATG Ltda., (2022).**



## 5 MARCO CONCEPTUAL

### 5.1 Definiciones

Las definiciones fueron recopiladas principalmente de la Resolución 40599 - Glosario Técnico Minero, elaborado por el Ministerio de Minas y Energía para el sector en el año 2015, la Resolución 1326 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del 2017, de la página web de Codelco y Codelco Educa y algunas fueron extraídas de autores e instituciones oficiales de países como Chile y Perú. A continuación, se presentan las definiciones de los conceptos relacionados con la minería del cobre y otros minerales, haciendo énfasis en los procesos de beneficio y transformación.

#### 5.1.1 Definiciones adoptadas en el marco normativo nacional colombiano

**Beneficio de los minerales:** consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, lavado, concentración y otras operaciones similares, a que se somete el mineral extraído para su posterior utilización o transformación. (*Resolución 40599*, 2015, p.13).

**Beneficio de minerales:** conjunto de operaciones empleadas para el tratamiento de menas y minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados con el uso de las diferencias en sus propiedades. (*Resolución 40599*, 2015, p.13).

**Caracterización mineralógica:** análisis que permite conocer los diferentes minerales que entran a la fase de beneficio. (*Resolución 40599*, 2015, p.16).

**Catalizador:** una sustancia que ayuda o promueve una reacción química sin formar parte del producto final. Hace que la reacción tenga lugar más rápidamente o a menor temperatura, y permanece sin cambio al final de la reacción. En procesos industriales, sin embargo, el catalizador debe ser cambiado periódicamente para mantener una producción económica. (*Resolución 40599*, 2015, p.17).

**Componentes:** aspectos ambientales que constituyen un medio (abiótico, biótico o socioeconómico) como, por ejemplo, componente atmosférico, hidrológico, faunístico, demográfico, entre otros. (*Resolución 1312*, 2016, p.12)

**Concentración (beneficio):** operación unitaria en la cual se busca eliminar el material que no es de interés económico con el fin de disminuir el volumen de mineral a procesar. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas (diferencia de densidad, atracción de campos magnéticos, eléctricos) o físico químicas de los minerales. (*Resolución 40599*, 2015, p.21)



**Concentración gravimétrica:** método de concentración que aprovecha la diferencia en el peso específico entre los minerales a separar. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Concentración mecánica:** tratamiento del mineral bruto por procedimientos físicos que aumentan su riqueza al eliminar una parte mayor o menor del material estéril, tales como: lavado, clasificación, trituración, molienda, dimensionado y pulido de rocas. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Concentración mecánica (geología económica):** proceso físico de selección y acumulación de partículas minerales por diferencias en los pesos específicos de los materiales estudiados o involucrados. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Concentración por medios densos:** método de concentración que se basa en la diferencia de densidades entre el fluido empleado para la operación y los minerales a separar. Durante el proceso, las partículas más densas que el fluido se hunden, mientras las livianas flotan. Concentración residual Acumulación de minerales in situ como resultado de procesos de meteorización de las rocas. Las lateritas se producen por este tipo de procesos. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Concentrado:** es el producto enriquecido de las operaciones de concentración de minerales. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Concentrado bulk:** concentrado que contiene más de un metal con valor comercial. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Conminución:** serie de operaciones unitarias durante las cuales un mineral es sometido a reducción de tamaño mediante trituración y molienda. (*Resolución 40599, 2015, p.21*)

**Conversión:** proceso de purificación, destinado a eliminar el azufre y el hierro de los sulfuros que forman parte del eje del cobre. (*Resolución 40599, 2015, p.22*)

**Cristalización:** formación de porciones de materia con estructura cristalina, y en ciertos casos con formas poliédricas, a partir de una solución o de un líquido, gas o sólido amorfo; cuando los átomos asumen una posición definitiva en la red cristalina, esto es lo que sucede cuando un metal líquido se solidifica. (Nota: la fatiga o falla de los metales debido a esfuerzos repetitivos es, algunas veces, erradamente atribuida a la cristalización). (*Resolución 40599, 2015, p.23*)



**Diagrama de operaciones (beneficio) (Diagrama de flujo):** es una representación gráfica de la secuencia de operaciones realizadas durante el procesamiento de un mineral. (*Resolución 40599, 2015, p.26*)

**Economía Circular:** sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales a través la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019, p.75)

**Electrólisis (Separación):** es el proceso en el cual una corriente eléctrica es pasada a través de una solución que contiene metales disueltos, y hace que el metal se deposite en el cátodo. (*Resolución 40599, 2015, p.29*)

**Electrometalurgia:** rama de la metalurgia extractiva que estudia los procesos de disolución, precipitación o refinación de metales mediante el uso de corriente eléctrica. (*Resolución 40599, 2015, p.29*)

**Electrorrefinación:** proceso de refinación de un material metálico mediante la aplicación de corriente eléctrica. (*Resolución 40599, 2015, p.29*)

**Escoria:** masa vítrea de baja densidad resultante de los procesos de fusión y refinación de metales, que contiene la mayor parte de las impurezas de la materia prima. (*Resolución 40599, 2015, p.30*)

**Floculación:** aglomeración de partículas finas suspendidas en un líquido, por métodos químicos o físicos. (*Resolución 40599, 2015, p.35*)

**Flotación:** proceso de concentración mediante el cual las partículas de un mineral son inducidas a adherirse a las burbujas creadas por un agente espumante presente en la pulpa, que las hace flotar. Flotación bulk Recuperación de todas las especies valiosas (oro, plomo, plata, cinc, cobre, etc.) en un solo producto llamado concentrado bulk, por ejemplo, concentrado de plata - plomo - oro - cobre, concentrado de plata - plomo. (*Resolución 40599, 2015, p.35*)

**Flotación diferencial:** es el proceso por el que dos o más especies valiosas son recuperadas en concentrados separados. (*Resolución 40599, 2015, p.35*)

**Fundición:** proceso pirometalúrgico mediante el cual un metal es llevado del estado sólido al líquido (*Resolución 40599, 2015, p.36*)



**Geometalurgia:** se refiere a la relación existente entre el comportamiento metalúrgico del mineral que es tratado en la planta de beneficio y las características geológicas que afectan dicho comportamiento, tales como las especies mineralógicas presentes, la dureza, el grado de fracturamiento, entre otros. (*Resolución 40599, 2015, p.38*)

**Hidrometalurgia:** rama de la metalurgia extractiva que estudia la obtención de metales o compuestos a partir de minerales o fuentes secundarias mediante procesos que tienen lugar a bajas temperaturas en medio acuoso u orgánico (*Resolución 40599, 2015, p.39*)

**Impacto Ambiental:** cualquier alteración sobre el medio ambiente (medios abiótico, biótico y socioeconómico) que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad. (*Resolución 1312, 2016, p.13*)

**Lixiviación (beneficio):** proceso hidrometalúrgico 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. (*Resolución 40599, 2015, p.44*)

**Lixiviación biológica:** 1. Proceso de recuperación de metales de minerales de bajo tenor que se basa en liberar una solución de los metales con la utilización de bacterias. 2. Es el proceso de usar bacterias que ocurren naturalmente para acelerar la oxidación de minerales sulfídicos que contienen algunas formas de oro y a su vez previenen que los químicos lixiviantes alcancen el oro. Cuando la mena es expuesta a grandes concentraciones de estos organismos que consumen sulfuros, se pueden remover cantidades suficientes de material sulfídico para luego recuperar el oro mediante procesos normales de lixiviación. (*Resolución 40599, 2015, p.44*)

**Medio:** división general que se realiza del ambiente para un mejor análisis y entendimiento del mismo. En el contexto de los estudios ambientales corresponde al abiótico, biótico y socioeconómico. (*Resolución 1312, 2016, p.13*)

**Medio ambiente:** es todo aquello que rodea al ser humano y que comprende elementos naturales, tanto físicos como biológicos, elementos artificiales y elementos sociales y las interacciones de éstos entre sí. (*Resolución 1312, 2016, p.13*)

**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. (*Resolución 40599, 2015, p.47*)



**Metalurgia extractiva:** arte y ciencia de la extracción de los metales a partir de sus menas o de los agregados minerales (que se presentan naturalmente) mediante métodos mecánicos y químicos, para ser utilizados por el ser humano. Las principales divisiones de la metalurgia extractiva pueden ser clasificadas en: preparación de minerales (mineral dressing), pirometalurgia, hidrometalurgia y electrometalurgia. (*Resolución 40599, 2015, p.47*)

**Metalurgia química:** parte de la metalurgia extractiva que comprende una serie de procesos unitarios mediante los cuales se realiza la extracción de los metales de los minerales preparados y su refinación, y que conduce a la transformación química del alimento. (*Resolución 40599, 2015, p.47*)

**Molienda:** operación de reducción de tamaño de un mineral realizada posteriormente a la trituración; puede ser de tipo primario o secundario según el tamaño requerido del producto. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**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. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**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. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**Molino de barras:** molinos para molienda fina (última etapa de molienda en la que el material que se entrega pasa por un tamiz de malla de 1 milímetro cuadrado de sección) similares a los molinos de bolas. Son equipos cilíndricos que tienen en su interior barras de acero que cuando el molino gira, caen sobre el material. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**Molino de bolas:** cilindro metálico cuyas paredes están reforzadas con material fabricado en aleaciones de acero al manganeso. Estas molduras van apernadas al casco del molino y se sustituyen cuando se gastan. El molino gira y la molienda se realiza por efecto de las bolas de acero al cromo o manganeso que, al girar con el molino, son retenidas por las ondulaciones de las molduras a una altura determinada, desde donde caen y pulverizan por efecto del impacto, el material mineralizado mezclado con agua. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**Molino de guijarros:** molino cilíndrico, similar al molino de barras, con sólo un compartimiento y una carga de partículas de mineral cribadas como medio de molienda. Muy usados en minas de oro de Sudáfrica. Se utilizan cuando la proporción de tamaños gruesos es demasiado baja, donde la fracción gruesa de la alimentación se separa y el resto se tritura hasta un tamaño más fino, y se introduce





todo en el molino de guijarros para completar la molienda fina. (*Resolución 40599, 2015, p.51*)

**Molino de pisones:** el equipo y la estructura que lo contiene, utilizada para moler material de mena mediante piezas de hierro, piedra o madera, pesadas, que caen constantemente, similar a la acción de pulverización de material con un mortero. Cuando se utiliza para molienda de menas de oro y plata, generalmente se realiza la amalgamación en el molino. (*Resolución 40599, 2015, p.52*)

**Molino semiautógeno:** molino de gran capacidad que recibe material directamente del chancador primario. El molino tiene en su interior bolas de acero de manera que, cuando el molino gira, el material cae y se va moliendo por efecto del impacto. La mayor parte del material que sale de este molino pasa a la etapa de flotación para obtener el concentrado de cobre, y una menor proporción vuelve a la molienda en el molino de bolas para seguir moliéndolo. La molienda semiautógena emplea una combinación de mineral y una reducida carga de bolas de acero, entre el 6 y el 10% del volumen del molino. La molienda semiautógena por vía seca en circuito cerrado puede dar un producto terminado. (*Resolución 40599, 2015, p.52*)

**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. (*Resolución 40599, 2015, p.52*)

**Pirometalurgia:** parte de la metalurgia extractiva que estudia los procesos de obtención de metales a partir de sus minerales mediante el uso de temperaturas elevadas. (*Resolución 40599, 2015, p.57*)

**Reciclable:** característica de un producto, empaque o componente que puede ser separado de la corriente de desechos, recolectado, procesado y retornado para usarse en forma de materia prima o producto. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019, p.75)

**Reutilización:** la prolongación de la vida útil de los materiales recuperados que se vuelven a utilizar sin que se requiera un proceso de transformación previo. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019, p.75)

**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. (*Resolución 40599, 2015, p.72*).

**Trituración:** reducción inicial del tamaño del mineral hasta un grado que permita su molienda. (*Resolución 40599, 2015, p.72*)

**Trituración primaria:** proceso por el cual el mineral es triturado entre  $1/2$  a  $1/6$  de su tamaño original, en preparación a la siguiente etapa de reducción (segunda o tercera etapa de trituración o circuito de molienda). (*Resolución 40599, 2015, p.72*)

**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). (*Resolución 40599, 2015, p.72*)

**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. En carbones, la trituración selectiva consiste en la separación de los tamaños menores de 3 mm, y se llevan a molienda los tamaños mayores. (*Resolución 40599, 2015, p.72*)

**Uso eficiente de recursos:** cantidad óptima de materiales, energía o agua para producir o distribuir un producto o empaque. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019, p.75)

### 5.1.2 Definiciones reconocidas en el marco Internacional

**Ácido sulfúrico:** ( $H_2SO_4$ ) como sustancia pura es un líquido aceitoso, transparente e incoloro. Cuando se calienta a más de  $30\text{ }^{\circ}C$  desprende vapores. Este ácido reacciona con todos los metales, por eso se utiliza en el proceso de lixiviación. En contacto con la piel puede ocasionar quemaduras graves. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.1)

**Avitone:** Es una poliacrilamida de fórmula  $C_6H_{10}N_2$  cuya interacción con el proceso de electrorrefinación de cobre es a nivel de la capa de difusión de iones, pudiendo actuar también como agente nivelador de los depósitos, regulando el crecimiento de los granos de cobre, en particular cuando el campo eléctrico es intenso. (Vargas Olivares, 2010, p. 41)

**Ánodos:** placas metálicas de cobre o plomo que se instalan en la celda electrolítica por las cuales entra la corriente eléctrica (carga positiva). En la electrorrefinación los ánodos son placas gruesas de cobre producto de la etapa de





fundición, los cuales se someten a refinación mediante electrólisis, en la que todo el cobre que los constituye se disuelve y se deposita en el cátodo de cobre puro, contituyendo un producto de alta pureza. Las impurezas que contiene (metales nobles como oro, plata, etc.) quedan depositadas en el fondo de la celda en la forma de barro anódico. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.20)

**Barro anódico (Anodic bar)/ Lodo anódico:** Los barros anódicos son los componentes del ánodo que no se disuelven y se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas. El barro anódico está formado por metales tales como oro, plata, selenio, platino y paladio, por lo que constituye un subproducto valorizado. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.28)

**Biolixiviación:** la biolixiviación es una técnica que disuelve metales en un medio acuoso, a través de bacterias (*thiobacillus ferrooxidans*) que liberan cobre en mayor cantidad que con métodos convencionales. Estas bacterias o microorganismos se alimentan principalmente de arsénico y azufre, dos impurezas que hay que extraer del mineral para producir cobre. Es decir, las bacterias pueden oxidar el azufre a ácido sulfúrico y el arsénico a una especie que es inofensiva para el ser humano. En esto radica la diferencia con respecto a los hornos de fundición, los que expulsan vapor de azufre y arsénico a la atmósfera que deben ser depurados mediante sistemas o chimeneas de alto costo. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Biolixiviación*).

**Biometalurgia:** obtención del metal mediante un proceso confiado a la acción de bacterias. (Servicio Geológico Mexicano, 2017, párr.18)

**Cátodos de cobre:** placas de cobre de alta pureza que se obtienen en el proceso de electrorrefinación y de electroobtención. Estos cátodos también se llaman cátodos de cobre electrolítico de alta pureza y tienen una concentración de 99,9%. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.50)

**Celdas electrolíticas:** corresponden a los recipientes donde se lleva a cabo la electrólisis tanto en el proceso de electroobtención como en el de electrorrefinación. Estos recipientes o piscinas son construidos en polímeros (plástico) por fuera y por dentro, en ellos la solución portadora de la especie disuelta del metal (previamente purificada y concentrada) se hace circular. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.52)

**Celdas de flotación:** son espacios cerrados donde se realiza la concentración del cobre mediante el burbujeo de aire en una solución. Las partículas



de cobre que son hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y suben a la superficie, desde donde rebasan a canaletas que se encuentran a los costados. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.53)

**Chancado (Trituración):** proceso mediante el cual se disminuye el tamaño de las rocas mineralizadas triturándolas en equipos denominados chancadoras. (Valenzuela Piñeiro, 2018, pág.17)

**Cobre blíster:** cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refinado y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electrorrefinación. Su nombre proviene del aspecto que tienen los productos moldeados en su superficie (blister = ampolla). (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.62)

**Cobre blíster:** material metálico con un nivel de pureza de alrededor de 99,5% de cobre, utilizado como materia prima para elaborar productos de alta calidad como el cobre refinado a fuego (RAF) y, especialmente, los cátodos de cobre. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario*, párr.4)

**Cobre de alta pureza (High Grade Copper):** tiene una alta conductividad eléctrica y se utiliza en la fabricación de conductores eléctricos, especialmente en conductores de diámetros pequeños. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.63)

**Cobre (Copper):** es un metal anaranjado brillante, rojizo, notable por un conjunto de propiedades que lo hacen extraordinariamente útil y conveniente para una diversidad de usos. El nombre cobre viene de la isla de Chipre, donde se encontraba una de las minas más antiguas de este metal. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.65)

**Lingotes RAF (Cobre RAF):** producto que se obtiene a partir del concentrado que es fundido y refinado a través de varios hornos hasta transformarse en lingotes de alta calidad, con un contenido mínimo de 99,9% de cobre. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario*, párr. 13)

**Cola Animal:** es una proteína de elevado peso molecular que contiene una secuencia de aminoácidos con uniones peptídicas: en la electrorrefinación de cobre, la cola animal actúa adsorbiéndose sobre sitios metálicos de cobre, bloqueando puntos de crecimientos preferencial y zonas adyacentes. La adsorción de cola genera en consecuencia un efecto sobretensor de la reacción catódica, que se incrementa en la medida que la concentración de aditivo aumenta. (Vargas Olivares, 2010, p.41)



**Colectores:** reactivos de formulación compleja que se agregan a la pulpa de mineral (mezcla de mineral molido y agua) y que tienen por objeto recubrir las partículas de minerales sulfurados y provocar una adherencia a las burbujas de aire, lo cual permite finalmente colectarlas en forma selectiva en la parte superficial de las celdas que contienen la pulpa. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.69)

**Concentración por flotación:** utiliza un proceso físico-químico complejo (reactivos) para la separación de material. (Servicio Geológico Mexicano, 2017, párr.13)

**Concentración magnética:** se vale de la atracción de ciertos minerales hacia un campo magnético. (Servicio Geológico Mexicano, 2017, párr.14)

**Concentrado de cobre:** pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Su proporción depende de la mineralogía de la mina. (Consejo Minero, 2002, p.68)

**Copper Mark:** es un marco de garantía integral que promueve prácticas de producción responsable y demuestra la contribución de la industria a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Es el primer y único marco desarrollado específicamente para la industria del cobre. (Freeport – McMoRan, s.f.)

**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. Esto es lo que sucede cuando un metal líquido se solidifica, pues los átomos asumen una posición definitiva en la red cristalina. (Nota: la fatiga o falla de los metales debido a esfuerzos repetitivos es, algunas veces, atribuida erróneamente a la cristalización). (Resolución 40599, 2015, p.23)

**Economía Circular:** sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. (Ellen MacArthur Foundation, s.f.)

**Electroobtención:** (Electrowinning, EW) proceso electrometalúrgico donde se disponen alternadamente un ánodo y un cátodo, dentro de una solución electrolítica previamente concentrada. El proceso se realiza mediante la aplicación de una corriente eléctrica de baja intensidad, la cual provoca que los cationes de Cu



sean atraídos hacia el cátodo y se depositen sobre éste en forma metálica. (Consejo Minero, 2002, p.69)

**Electrorrefinación:** en esta fase los ánodos, también conocidos como cobre blíster, obtenidos en la fundición, se transforman en cátodos de cobre de 99,99% de concentración. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.121)

**Escoria (Slag):** Material constituido en un 90% o más por sílice y hierro, con algún contenido de cobre residual, que se separa de la mezcla fundida en el interior de hornos de reverbero o convertidores por gravedad, quedando ésta en la parte superior desde donde es retirada en forma separada de la parte donde está el cobre por vaciado del horno. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.135)

**Extracción por solvente:** (Solvent Extraction, SX). Método de separación de una o más sustancias de una mezcla mediante el uso de solventes. En el proceso de extracción del cobre, la resina orgánica permite capturar el cobre en solución, dejando las impurezas, tales como hierro, aluminio, manganeso y otros en la solución original. La solución orgánica cargada con cobre es separada en otro estanque, donde se la pone en contacto con electrolitos que tienen una alta acidez, lo cual provoca que la resina suelte el cobre y se transfiera a la solución electrolítica, la cual es enviada finalmente a la planta de electroobtención. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.144)

**Floculación selectiva:** técnica de separación aprovechando las propiedades físicoquímicas de los diversos minerales en suspensión mixta, haciendo posible la separación de los minerales valiosos de las gangas por medio de la adsorción preferencial de un floculante orgánico sobre el mineral particular a flocular, dejando el resto de partículas en suspensión. Metallurgist. (s.f.)

**Lavado:** se elimina el lodo y material orgánico presentes en algunos minerales. (Servicio Geológico Mexicano, 2017, párr.6)

**Matte-Mata:** mezcla bruta de sulfuros fundidos formada como un producto intermedio de la fundición de minerales de sulfuro de metales, especialmente cobre, níquel y plomo. En lugar de fundirse directamente en metal, los minerales de cobre generalmente se funden en Matte, preferiblemente con un contenido de cobre de 40 a 45 por ciento, junto con hierro y azufre. (Britannica, s.f., párr.1)

**Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):** Son la agenda global de desarrollo aprobada el 25 de septiembre de 2015 en el marco de la Asamblea General de las Naciones Unidas, con el objetivo de promover la sostenibilidad ambiental, la erradicación de la pobreza y la inclusión social, la prosperidad



económica y la paz. Son 17 objetivos asociados a 169 metas que fueron adoptados por las partes firmantes. Cada país ha definido compromisos concretos alrededor de los ODS para alcanzar las metas propuestas a 2030. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>

**Óxidos de cobre:** Se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Pero esto no significa que no sean valiosos o útiles, de hecho, fueron los primeros tipos de cobres en ser explotados por los seres humanos. Estos óxidos de cobre se pueden encontrar en minerales tales como: malaquita, azurita, crisocola, cuprita y brochantita. (Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO, 2017)

**Sulfuros de cobre:** Los sulfuros de cobre corresponden a minerales de sulfuro con azufre, cobre y, en algunos casos, otros elementos. Para efectos geominero-metalúrgicos se subdividen en dos grupos: sulfuros primarios y sulfuros secundarios, los criterios para esta clasificación hacen referencia a la formación geológica de estos minerales. Los sulfuros primarios se forman a mayores profundidades en ambientes reductores, mientras que los segundos, se forman cercanos a la superficie al entrar en contacto con el oxígeno. (Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO, 2017)

**Reactivos colectores:** Tienen la función de hacer que las partículas de cobre y molibdeno hagan todo lo posible por rechazar el agua. Su objetivo es generar una conducta "hidrófoba" (fobia al agua) en el mineral para que este se separe del agua e ingrese a las burbujas de aire. (Codelco Educa, 2019c)

**Reactivos depresores:** Su función es generar el efecto inverso que los reactivos colectores, pero en otro tipo de minerales presentes en las "piscinas". Es decir, que el material que no interesa recolectar, prefiera el agua antes que el aire. (Codelco Educa, 2019c)

**Reactivos espumantes:** Su tarea es generar burbujas resistentes. Educa. (Codelco Educa, 2019c)

**Refinación electrolítica de cobre:** Es un proceso de disolución electroquímica del cobre desde el ánodo, depositando el cobre como un metal casi puro en el cátodo por medio de electrolisis directa; la tecnología básica de refinación de cobre tiene muchos años, pero en estos últimos se han desarrollado importantes cambios, gran parte de estos se han incorporado en el rediseño de la actual planta. (Vargas Olivares, 2010, p.50)

**Relave minero (Tailings):** Corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación. Este residuo, también conocido como cola, es transportado mediante canaletas o cañerías hasta lugares



especialmente habilitados o tranques, donde el agua es recuperada o evaporada para quedar dispuesto finalmente como un depósito estratificado de materiales finos (arenas y limos). (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.405)

**Ripios (Tails):** Se refiere al material que queda como residuo del mineral una vez que todo el cobre ha sido lixiviado, el cual es desechado en áreas especiales o botaderos de ripios. Corresponde a la cola del proceso de lixiviación. (Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.), *Glosario de conceptos mineros*, párr.409)

**Thiourea.** Es una molécula orgánica que contiene en su estructura química radicales como  $S_2^-$  y grupos  $NH_2$  que facilitan la adsorción específica sobre sitios metálicos de cobre. En el proceso de Electrorrefinación de cobre la thiourea se le conoce por su rol afinador de grano. (Vargas Olivares, 2010, p.41)

**Xantato:** Son productos sólidos usados en la flotación de minerales sulfurados y metálicos. Los componentes básicos son: Bisulfuro de Carbono, Soda o Potasa Cáustica y un determinado Alcohol, el cual le otorga las propiedades colectoras en el circuito de Flotación para los minerales metálicos y poli metálicos. Todos los Xantatos son solubles en agua, usualmente se alimentan como soluciones en concentraciones del 5 al 20% en peso. Estos reactivos son ampliamente usados para todos los minerales sulfurados, con una tendencia fuerte a flotar sulfuros de hierro, salvo que se usen depresores. No son empleados en circuitos muy ácidos, porque tienden a descomponerse. (Boletín Agrario, 2022)

## 5.2 Minería de cobre en el mundo

Según Codelco Educa (s.f) en *Exploración “En búsqueda del metal rojo”*, el cobre se encuentra diseminado en ciertos sectores de la corteza terrestre y su ubicación está determinada por los distintos procesos geológicos que han ocurrido en la historia del planeta. El origen de este mineral está ligado a la introducción de magma a gran temperatura y con gran presión en la corteza terrestre.

Pietrzyk & Tora (2018), indican que los recursos de cobre restantes se presentan en forma de minerales de sulfuro en alrededor del 90% y minerales de óxido en alrededor del 9%. El cobre se recupera de los minerales metálicos que se encuentran en más de 160 compuestos.

El éxito de la exploración de recursos requiere altas inversiones a largo plazo en las etapas iniciales de la evaluación de recursos, lo que conlleva un alto riesgo de pérdidas. Las minas de cobre actualmente operadas a nivel mundial, luchan con una serie de problemas y barreras, comenzando con el agotamiento de los minerales de calidad y la necesidad de extraer depósitos cada vez más profundos





y terminando con las crecientes expectativas de los gobiernos, los numerosos requerimientos de las autoridades reguladoras, y posiciones en contra de la actividad de las comunidades locales.

Según Pietrzyk & Tora (2018), la estimación de los recursos de cobre no descubiertos, con base en el estado del conocimiento geológico, fue proporcionada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), en 2013. Estos recursos, se estimaron asumiendo dos formas básicas de ocurrencia, siendo tan típicas que constituyen el 80% de los recursos identificados. Esos son depósitos de pórfido (60%) y depósitos de minerales sedimentarios (20%).

El reconocimiento geológico de los recursos de mineral de cobre en los diferentes países en donde se tiene certeza geológica del mineral, incrementará las cifras de recursos mineros y reservas, además hay que tener en cuenta la profundidad a la que se encuentra el contenido medio de Cu en la corteza terrestre, que es de unos 3,3 km, la que se debería tomar como límite estimado para futuras explotaciones mineras y también el límite para la evaluación de recursos y reservas a nivel mundial.

La explotación de minerales cobra relevancia por la necesidad de producirlos con sus propiedades particulares que ayuden a la transformación energética, como es el caso de metales como cobre, litio, molibdeno, cobalto, etc. En el mundo se han hecho campañas a gran escala de exploración para estos minerales con la finalidad de extraerlos mediante métodos de explotación tanto en minería subterránea como en minería a cielo abierto.

Según artículo publicado por Tecnología Minera (2022), el mercado del cobre a nivel mundial ha estado en aumento debido a una fuerte actividad manufacturera global y a la creciente demanda de vehículos eléctricos, la necesidad de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero, la transformación energética, el incremento en la industria eólica, en la industria energética solar, etc.

En el artículo Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina (Jones et al., 2021), se abordan las perspectivas asociadas al mercado del cobre, entregando proyecciones y análisis del comportamiento de la demanda en diferentes regiones y destacando la participación de los diferentes mercados. En cuanto a la oferta, se describe la situación actual del sector productivo, desarrollando estimaciones futuras, especialmente en los casos de Chile y Perú.

Al referirse al consumo regional del cobre, los autores Jones et al. (2021), exponen que China ha sido la principal fuerza detrás del aumento del consumo de cobre en la última década, impulsado por su rápida expansión económica, la creciente urbanización y la inversión en infraestructura e industria. La participación



de China representó el 53,6% del consumo total de cobre refinado en 2020, Asia (excluida China), representó el 21,4%, seguido por Europa y América del Norte con el 13,4% y el 9,1% del total mundial, respectivamente.

Los autores Jones et al. (2021), al hacer referencia a las Energías renovables y eficiencia energética, estiman que en 2020 se consumieron aproximadamente 640.000 t de cobre en tecnologías de energías renovables, lo que equivale al 2,4% de la demanda mundial. La energía solar fotovoltaica es el tipo de energía renovable que más cobre consume, lo que equivale al 64% de la demanda de energías renovables en 2020. La energía eólica terrestre es la segunda tecnología más importante para la demanda de cobre con un 24,5%.

En cuanto a la oferta de cobre, entre 2010 y 2019, la producción de cobre refinado creció de 18,7 a 23,3 millones de toneladas. Más del 85% de la producción provino de fuentes primarias, y el restante provino principalmente de chatarra utilizada en fundiciones durante la producción de blíster o en el proceso de producción de ánodos.

A continuación, y de manera sucinta, se relacionan los 10 mayores productores de cobre en el mundo, según el artículo publicado por Tecnología Minera (2022), destacándose algunos países latinoamericanos:

10: México

En el año 2021, México produjo 732.863 toneladas de cobre, mostrando una disminución de 4,6 % frente a las 768.542 de 2020, informó CAMIMEX.

09: Indonesia

Está considerando implementar una prohibición a las exportaciones de concentrados de cobre a partir de 2023.

08: Rusia

Ocupa el octavo lugar en la liga de productores de cobre, su producción se estimó en 820.000 toneladas métricas en 2021.

07: Zambia

El cobre alcanzó un máximo de 720.000 toneladas en la década de 1970, pero ha ido en declive progresivo y se pronostica un crecimiento promedio del 2,2 % durante 2012-2030, según Fitch Solutions.

06: Estados Unidos

Las exportaciones de cobre en Estados Unidos aumentaron a US\$829,92mn en enero, frente a los US\$746,62mn de diciembre de 2021.

05: Australia

Australia es el tercer mayor exportador de mineral de cobre del mundo, disfruta de una participación del 7,1 % en un mercado anual valorado en \$64.200 millones.

04: República Democrática del Congo





El cobre refinado es un mercado de exportación de \$4.060 millones, mientras que el mineral de cobre (\$544 millones) y el cobre crudo (\$249 millones), también son sectores clave.

#### 03: China

La producción de cobre refinado de China totalizó 10,49 millones de tm en 2021, un 7,4 % más que el año anterior, según datos de la Oficina Nacional de Estadísticas.

#### 02: Perú

Con volúmenes que totalizaron 199.255 toneladas en enero, un 12,7 % más año con año.

#### 01: Chile

Chile lidera la liga de países productores de cobre. Sus minas más grandes incluyen Escondida, Collahuasi, El Teniente, Chuquibambilla y Los Pelambres.

Las presiones a la baja brindan poco respiro a un mercado que se enfrenta a reservas bajas y precios altos. La economía de Chile depende en gran medida del precio del cobre, que alcanzó máximos históricos en 2021 pero se prevé que baje en 2022. Se espera que la alta demanda de bienes de consumo se enfríe considerablemente, especialmente ante el aumento de la inflación, que podría llevar a Chile a recesión en la segunda mitad del año (Tecnología Minera, 2022, párr. 3-14).

### 5.3 Minería de cobre en Colombia

En la corteza terrestre, el cobre es un metal base no ferroso y se encuentra en combinación con hierro, azufre, carbono y oxígeno. El cobre puro rara vez se encuentra, constituyendo aproximadamente el 1% de todos los compuestos de cobre. El origen de estos yacimientos se asocia al magma que asciende introduciéndose en las capas superiores de la corteza, en forma de cuerpos intrusivos, formándose dos tipos de material mineralizado relacionados con potenciales yacimientos de cobre: **sulfuros y óxidos**.

Desde la normativa ambiental y minera, cualquier empresa que esté interesada en explorar, explotar y/o beneficiar mineral de cobre en Colombia, deberá cumplir con las leyes, decretos y resoluciones que rigen la actividad minera en el país y que involucran la Constitución Política, el Plan Nacional de Desarrollo y el Código de Minas.

El Servicio Geológico Colombiano en convenio con la Organización de Naciones Unidas realizó una exploración geológica para la búsqueda de metales en las cordilleras Central y Occidental, en la cual se identificó el cinturón metalogénico que hace presencia en la cordillera de los Andes, en donde se han encontrado importantes yacimientos polimetálicos que han dado origen a grandes proyectos mineros. Esta investigación definió los tres cinturones de pórfidos cupríferos de las zonas Occidental, Oriental y Central, correspondientes al territorio colombiano y en los cuales se concentran los proyectos mineros que aún están en la fase de



exploración a la espera de los avales de viabilidad ambiental para pasar a la explotación:

Occidental: Pantanos – Pegadorcito, Andaqueda, Murindó, Acandí y Piedrancha.

Oriental: Andes, El Infierno – Chili, California, Dolores y Mocoa.

Central: El Tambo, Dominical, Piedrasentada y El Pisno.

Colombia tiene avances significativos en el conocimiento de la geología básica para mineral de cobre, sin embargo, el conocimiento detallado de la geología para este metal es reducido y prácticamente inexplorado, por esto en los últimos años se han adelantado campañas de exploración a cargo de multinacionales, debido al aumento del consumo de cobre a nivel mundial y a la perspectiva alta de algunos depósitos, de convertirse en yacimientos minerales que se pueden explotar.

El Servicio Geológico Colombiano (2012), clasificó, según el conocimiento geológico, geoquímico y geofísico, un total de 59 áreas estratégicas con potencial para minería de cobre, las cuales fueron separadas en tres tipos: Tipo I, Tipo II y Tipo III, siendo las más importantes las dos primeras por comprender alrededor de 3.800.000 ha, contenidas en 30 áreas, con conocimiento aceptable para el hallazgo de minerales estratégicos y áreas prioritarias para la adquisición de información por parte del gobierno nacional. De acuerdo al estudio en mención, se manifiesta que casi el 17% de las áreas referenciadas son estratégicas con conocimiento aceptable de los minerales de cobre, faltando por explorar aproximadamente el 83%.

En la actualidad, la única empresa que produce cobre en Colombia es la canadiense Ático Mining con el complejo El Roble, ubicado en El Carmen de Atrato (Chocó). La operación es subterránea de mediana escala y el metal es considerado de alta calidad. Según su presidente en Colombia, “La empresa está constantemente buscando ampliar los recursos que extiendan el horizonte de operación y la capacidad instalada de producción de concentrados de cobre. Se han realizado importantes inversiones que superan los US\$70 millones”.

A nivel exploratorio y a la espera de resoluciones minero-ambientales, existen empresas multinacionales interesadas en explotar y beneficiar cobre en Colombia, entre otras se encuentran: Proyecto de Exploración Quebradona (AngloGold Ashanti, s.f) ubicado en el municipio de Jericó en el departamento de Antioquia; Proyecto de Exploración Soto Norte (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2022) ubicado en la parte oriental del macizo de Santander en la cordillera de los Andes; Proyecto Mocoa (FAusIMM, M. R., P.Geo., R. S., & FAusIMM, B. D., 2022) ubicado en la Cordillera Oriental en el departamento del Putumayo y el Proyecto de Exploración San Matías (Nordmin Engineering Ltd, 2022) ubicado en el municipio de Puerto Libertador, departamento de Córdoba.



Es importante el potencial que tiene Colombia a nivel de yacimientos de cobre. Se espera que la viabilidad social y ambiental permitan proceder con estos proyectos que colocarían al país como el tercer productor de cobre en Latinoamérica en el 2030, según la viceministra de minas y Energía de Colombia (Tiempo Minero, 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, la comercialización del mineral en Colombia tiene como referente el **Reporte técnico y estudio de prefactibilidad** elaborado por Nordmin Engineering Ltd (2022) para la empresa Córdoba Minerals, en el cual se abordan estrategias de marketing, procesos de pesaje, muestreo y determinación de humedad y logística que en este caso aplica para el de depósito Alacrán de Cobre-Oro-Plata, ubicado dentro del área de exploración del proyecto San Matías, pero que se podría ampliar y tomar como referente para los demás proyectos mineros que se encuentran en estudio y exploración para explotar el mineral.

Como se ha proyectado que Colombia pueda llegar a ser un gran productor de cobre, es importante tener una buena guía que permita comercializar el mineral de manera adecuada y considerando todos los panoramas que se puedan presentar, como la supuesta alza del precio actual, reflejada en términos nominales pero no en términos reales, la problemática que se ha presentado para este mineral frente a la pandemia de COVID-19 y la invasión militar que se produce en Ucrania por parte de Rusia.

Para la determinación del precio del cobre siempre habrá diferentes puntos de vista sobre lo que depara el futuro, según los análisis y las suposiciones. Con una serie de operaciones mineras importantes que entrarán en funcionamiento en uno o dos años, muchos analistas pronostican una disminución de los precios desde los máximos actuales.

En términos de mercado de concentrados de cobre, que corresponde a la materia prima principal para las fundiciones de Cu que es producido por las minas que procesan minerales de sulfuro que contienen Cu, históricamente Japón y Europa fueron centros de demanda de concentrados, pero ahora el epicentro se ha trasladado a China.

Es por esto que se debe tener en cuenta varios aspectos como:

- **La estrategia de marketing**
  - Calidad del concentrado de cobre
  - Cantidad del concentrado de cobre
  - Compradores. Directo con fundiciones o a través de comerciantes



- **La logística**

- Almacenamiento de minas
- De mina a puerto
- Instalaciones portuarias
- Seguridad del producto
- Condiciones de entrega
- Fletamento de buques de exportación
- Gestión de riesgos
- Acuerdos de venta
- Estudios de mercado y contratos

#### 5.4 Normatividad vigente

Es importante incorporar un contexto jurídico basado en una compilación y la relación de la normativa vigente en materia de minería para los denominados minerales estratégicos como el cobre y temas afines, teniendo como base el orden jerárquico esquematizado en la **Figura 5**.



*Figura 5. Jerarquía normativa para el tratamiento de la regulación enfocada a la evaluación de minerales estratégicos.*

*Fuente: ATG Ltda., (2022).*



#### 5.4.1 Constitución Política de 1991

Es la norma de normas (art.4), en ellas se establece una amplia carta de derechos, deberes y obligaciones; también establece la organización del Estado, la participación ciudadana, el pluralismo, la economía, la administración de justicia y la autonomía local.

En materia minera, el Artículo 332 de la Constitución Nacional define que el Estado es el único dueño del subsuelo y de todos los recursos naturales no renovables habidos en él (Lo anterior, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes).

*“ARTICULO 332. El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.”*

En relación con los recursos mineros, la Constitución Política de Colombia define que:

*“ARTICULO 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.*

*Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.*

*Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.”*

*“ARTICULO 334. <Artículo modificado por el artículo 1o. del Acto Legislativo 3 de 2011. El nuevo texto es el siguiente:> La dirección general de la economía estará a cargo del Estado. Este intervendrá, por mandato de la ley, en la explotación de los recursos naturales, en el uso del suelo, en la producción, distribución, utilización y consumo de los bienes, y en los servicios públicos y privados, para racionalizar la economía con el fin de conseguir en el plano nacional y territorial, en un marco de sostenibilidad fiscal, el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, la distribución equitativa de las oportunidades y los beneficios del desarrollo y la preservación de un ambiente sano. Dicho marco de sostenibilidad fiscal deberá fungir como instrumento para alcanzar de manera progresiva los objetivos del Estado Social de Derecho. En cualquier caso, el gasto público social será prioritario...”*

Tratándose de territorios indígenas, en la Constitución se establece que:

*“ARTICULO 330. De conformidad con la Constitución y las leyes, los territorios indígenas estarán gobernados por consejos conformados y reglamentados según los usos y costumbres de sus comunidades y ejercerán las siguientes funciones:*

- 1. Velar por la aplicación de las normas legales sobre usos del suelo y poblamiento de sus territorios.*
- 2. Diseñar las políticas y los planes y programas de desarrollo económico y social dentro de su territorio, en armonía con el Plan Nacional de Desarrollo.*



3. *Promover las inversiones públicas en sus territorios y velar por su debida ejecución.*
4. *Percibir y distribuir sus recursos.*
5. *Velar por la preservación de los recursos naturales.*
6. *Coordinar los programas y proyectos promovidos por las diferentes comunidades en su territorio.*
7. *Colaborar con el mantenimiento del orden público dentro de su territorio de acuerdo con las instrucciones y disposiciones del Gobierno Nacional.*
8. *Representar a los territorios ante el Gobierno Nacional y las demás entidades a las cuales se integren; y*
9. *Las que les señalen la Constitución y la Ley.*

**PARAGRAFO. La explotación de los recursos naturales en los territorios indígenas se hará sin desmedro de la integridad cultural, social y económica de las comunidades indígenas. En las decisiones que se adopten respecto de dicha explotación, el Gobierno propiciará la participación de los representantes de las respectivas comunidades.**” (Negrita y subrayado fuera de texto)

#### 5.4.2 Planes nacionales de desarrollo

Los Planes Nacionales de Desarrollo son la hoja de ruta de cada gobierno, contienen objetivos, programas, inversiones, metas y lineamientos estratégicos de políticas públicas formuladas por cada Presidente de la República para su respectivo cuatrienio.

De acuerdo con los artículos 339 y ss. de la Constitución Política de Colombia de 1991, los Planes Nacionales de Desarrollo – PND se componen por una parte general y un plan de inversiones de las entidades públicas del orden nacional: en la parte general se señalan los propósitos y objetivos nacionales de largo plazo, las metas y prioridades de la acción estatal en el mediano plazo y las estrategias y orientaciones generales de la política económica, social y ambiental que serán adoptadas por el gobierno. En el plan de inversiones públicas se especificarán los presupuestos plurianuales de los principales programas y proyectos de inversión pública nacional y la especificación de los recursos financieros requeridos para su ejecución y sus fuentes de financiación. Los últimos tres (3) Planes Nacionales de Desarrollo – PND que hemos tenido en Colombia son:

- Ley 1450 del 16 de junio de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014.
- Ley 1753 del 9 de junio de 2015. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018.
- Ley 1955 del 25 de mayo de 2019. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.

De estos tres (3) Planes Nacionales de Desarrollo – PND, el Plan Nacional de Desarrollo **2010-2014**, contenido en la Ley 1450 de 2011, aborda específicamente el tema de Reservas Mineras Estratégicas en su Artículo 108; el Plan Nacional de Desarrollo **2014-2018**, contenido en la Ley 1753 de 2015, aborda





específicamente el tema de Áreas de Reserva para el Desarrollo Minero en su Artículo 20; y el Plan Nacional de Desarrollo **2018-2022**, contenido en la Ley 1955 de 2019, aborda específicamente el tema del Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales en su Artículo 328.

Es importante anotar que, de estos Planes Nacionales de Desarrollo, aún permanecen en el ordenamiento jurídico algunas disposiciones, especialmente porque no tienen una derogatoria expresa o tácita por normas posteriores de igual jerarquía.

### 5.4.3 Código de minas (Ley 685 del 15 de agosto de 2001)

El actual Código de Minas Colombiano se encuentra contenido en la Ley 685 de 2001, en él se definen temas como: propiedad estatal, derecho de exploración y explotación, zonas reservadas, excluidas y restringidas para la minería, la prospección, exploración, construcción y montaje y la explotación minera; el contrato de concesión; regímenes especiales; minería sin título, minería ocasional, barequeo; exploración y explotación ilícita de minas; aspectos externos a la minería; régimen procedimental: normas de procedimiento, oposiciones, amparo administrativo, competencia; Registro Minero Nacional; sistema nacional de información minera; entre otros temas.

Sobre la Propiedad de los Recursos Mineros, y estando en concordancia con el artículo 332 Constitucional, el Código de Minas – Ley 685 de 2001, define que el Estado es el dueño del suelo y del subsuelo y de todos los minerales, de cualquier clase y ubicación, que se encuentren yacientes en ellos, sin consideración a la propiedad, posesión o tenencia de los predios. Se citan los artículos 5 y 7 de la Ley 685 de 2001:

**“ARTÍCULO 5°. PROPIEDAD DE LOS RECURSOS MINEROS.** *Los minerales de cualquier clase y ubicación, yacientes en el suelo o el subsuelo, en cualquier estado físico natural, son de la exclusiva propiedad del Estado, sin consideración a que la propiedad, posesión o tenencia de los correspondientes terrenos, sean de otras entidades públicas, de particulares o de comunidades o grupos.*

*Quedan a salvo las situaciones jurídicas individuales, subjetivas y concretas provenientes de títulos de propiedad privada de minas perfeccionadas con arreglo a las leyes preexistentes.”*

**“ARTÍCULO 7°. PRESUNCIÓN DE PROPIEDAD ESTATAL.** *La propiedad del Estado sobre los recursos minerales yacientes en el suelo o el subsuelo de los terrenos públicos o privados, se presume legalmente.”*





#### 5.4.4 Leyes

### Ley 1333 del 21 de julio de 2009 - “Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones”

El Estado es el titular de la potestad sancionatoria en materia ambiental y la ejerce sin perjuicio de las competencias legales de otras autoridades a través del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible, las Unidades Ambientales de los grandes centros, los establecimientos públicos ambientales a que se refiere el artículo 13 de la Ley 768 de 2002 y la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales; estas autoridades quedan habilitadas e investidas de facultades para imponer, y ejecutar las medidas preventivas y sancionatorias.

Esta ley, tiene dentro de su contenido regulaciones sustanciales y procedimentales en materia ambiental como: titularidad de la potestad sancionatoria en materia ambiental, principios rectores, el procedimiento administrativo para la imposición de medidas preventivas y para el trámite sancionatorio ambiental, la definición de “Infracción”, causales de atenuación y de agravación de la responsabilidad, causales eximentes de responsabilidad, caducidad de la acción, cesación del procedimiento, determinación de la responsabilidad, tipos de medidas preventivas y sanciones, creación del Registro Único de Infractores Ambientales – RUIA, a cargo del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, entre otras reglas y competencias.

El artículo 327 de la Ley 1955 de 2019, por ejemplo, dispone en su párrafo séptimo, lo siguiente:

*“(…) Los alcaldes vigilarán el cumplimiento de lo dispuesto en este artículo e impondrán las medidas a que haya lugar, sin perjuicio de las medidas preventivas y sancionatorias que imponga la autoridad ambiental para la prevención o por la comisión de un daño ambiental de acuerdo con lo dispuesto en la Ley 1333 de 2009, o la norma que la modifique, adicione o sustituya. (…)”*

Además de tener que acatar las prohibiciones establecidas en el Artículo 157 de la Ley 685 de 2001<sup>1</sup> y en el Artículo 105 de la Ley 1801 de 2016<sup>2</sup>, en lo que tiene que ver con la no extracción de minerales en zonas declaradas y delimitadas como

<sup>1</sup> “Artículo 157. Lugares no permitidos. No se permitirá el barequeo en los siguientes lugares:

a) En los que no pueden realizarse labores mineras de acuerdo con el artículo 34 y los numerales a), b), c), d) y e) del artículo 35 de este Código (...).”

<sup>2</sup> “Artículo 105. Actividades que son objeto de control en el desarrollo de la minería. Las siguientes actividades son contrarias a la minería y por lo tanto no deben efectuarse. Su realización dará lugar a medidas correctivas o a la imposición de medidas preventivas de que trata la Ley 1333 de 2009, según sea el caso y sin perjuicio de las de carácter penal o civil que de ellas se deriven:

1. Desarrollar actividades mineras de exploración, explotación, o minería de subsistencia o barequeo en bocatomas y áreas declaradas y delimitadas como excluíbles de la minería tales como parques nacionales naturales, parques naturales regionales, zonas de reserva forestal protectora, páramos y humedales RAMSAR...”



zonas de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente, esto es, en:

- Parques Naturales Nacionales,
- Parques Naturales de carácter Regional,
- Zonas de Reserva Forestal Protectoras,
- Zonas de Humedales RAMSAR
- Reservas de Recursos Naturales Temporales,
- Zonas de Páramo

Dejándose claro que en caso de desarrollarse cualquier tipo de actividad minera dentro de dichas zonas excluibles de minería, o en caso de violación a las normas contenidas en el Código de Recursos Naturales Renovables, Decreto-ley 2811 de 1974, en la Ley 99 de 1993, en la Ley 165 de 1994 y en las demás disposiciones ambientales vigentes que las sustituyan o modifiquen, será constitutivo de infracción ambiental, acarreándose la imposición de medidas preventivas y sancionatorias de que trata la Ley 1333 de 2009, según sea el caso y sin perjuicio de las de carácter administrativo que dispongan las alcaldías y las de carácter penal por la comisión de delitos.

Cita el Artículo 5 de la Ley 1333 de 2009:

**ARTÍCULO 5. INFRACCIONES.** *Se considera infracción en materia ambiental toda acción u omisión que constituya violación de las normas contenidas en el Código de Recursos Naturales Renovables, Decreto-ley 2811 de 1974, en la Ley 99 de 1993, en la Ley 165 de 1994 y en las demás disposiciones ambientales vigentes en que las sustituyan o modifiquen y en los actos administrativos emanados de la autoridad ambiental competente. Será también constitutivo de infracción ambiental la comisión de un daño al medio ambiente, con las mismas condiciones que para configurar la responsabilidad civil extracontractual establece el Código Civil y la legislación complementaria, a saber: El daño, el hecho generador con culpa o dolo y el vínculo causal entre los dos. Cuando estos elementos se configuren darán lugar a una sanción administrativa ambiental, sin perjuicio de la responsabilidad que para terceros pueda generar el hecho en materia civil.*

**PARÁGRAFO 1º.** *En las infracciones ambientales se presume la culpa o dolo del infractor, quien tendrá a su cargo desvirtuarla.*

**PARÁGRAFO 2º.** *El infractor será responsable ante terceros de la reparación de los daños y perjuicios causados por su acción u omisión”*

En materia de medidas preventivas la Ley 1333 de 2009 dispone que:

**“ARTÍCULO 12. OBJETO DE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS.** *Las medidas preventivas tienen por objeto prevenir o impedir la ocurrencia de un hecho, la realización de una actividad o la existencia de una situación que atente contra el medio ambiente, los recursos naturales, el paisaje o la salud humana.”*



Y en materia del proceso sancionatorio, el artículo 18 de la Ley 1333 de 2009 dispone que:

**“ARTÍCULO 18. INICIACIÓN DEL PROCEDIMIENTO SANCIONATORIO.** *El procedimiento sancionatorio se adelantará de oficio, a petición de parte o como consecuencia de haberse impuesto una medida preventiva mediante acto administrativo motivado, que se notificará personalmente conforme a lo dispuesto en el Código Contencioso Administrativo, el cual dispondrá el inicio del procedimiento sancionatorio para verificar los hechos u omisiones constitutivas de infracción a las normas ambientales. En casos de flagrancia o confesión se procederá a recibir descargos.”*

#### 5.4.5 Decretos

##### **Decreto 1414 de 2011 - "Por medio del cual se reglamente parcialmente el Artículo 108 de la Ley 1450 de 2011"**

Este decreto propone unas condiciones para delimitar Áreas Estratégicas Mineras o incorporar nuevas zonas a las mismas tiene que ver con áreas libres que según caracterización efectuada por el Servicio Geológico Colombiano poseen potencial minero para la exploración y explotación de minerales estratégicos o áreas que queden libres como consecuencia de la terminación de un título minero por cualquier causa, una vez se encuentren en firme los correspondientes actos administrativos de terminación.

##### **Decreto 1073 de 2015 - "Por la cual medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía"**

El Decreto 1073 de 2015 es el compendio o versión integrada de todas las normas del sector minero, petrolero y energético del país.

En él se encuentran incluidas normas referentes al sector minero como: Decreto 276 de 2015, Decreto 1666 de 2016, Decreto 4134 de 2011 y Ley 685 de 2001, entre otras normas desarrolladas en el presente documento.

#### 5.4.6 Resoluciones

Según la ANM, 2020, las Áreas de Reserva Estratégica Minera son áreas libres con alto potencial para minerales estratégicos, identificadas por el Servicio Geológico Colombiano en los informes producto de la prospección adelantada en la zona de interés. Estas áreas fueron declaradas como áreas estratégicas mineras para minerales de cobre y sus minerales asociados mediante las **Resoluciones No. 008 y 009 del 16 de febrero de 2021**, respectivamente, para ser sometidas al proceso de selección objetiva.



Una vez delimitadas las Áreas de Reserva Estratégica Minera por parte de la Autoridad Minera, no es posible recibir nuevas propuestas ni suscribir contratos de concesión minera en estas áreas, las cuales deben ser otorgadas mediante un contrato especial de exploración y explotación por medio de procesos de selección objetiva.

En los procesos generales para contratar una de las Áreas Estratégicas Mineras se identifican cuatro fases: reserva de zonas con potencial, delimitación y declaración de áreas estratégicas mineras, habilitación de interesados, y la presentación y selección de ofertas.

Posteriormente corresponde a la suscripción, por parte del oferente adjudicatario, de la minuta del contrato, la cual contiene los términos y condiciones del contrato especial de exploración y explotación de minerales de la AEM adjudicada.

Cuando en el contexto de lo anterior se identifica y certifica por parte del Ministerio del Interior la presencia de una comunidad étnica en inmediaciones o relacionada con el proyecto, se adelantará una Consulta Previa, referida al consentimiento previo, libre e informado por parte de las comunidades étnicas y la evaluación de los posibles impactos que el proyecto genere, a fin de prevenirlos, controlarlos, mitigarlos o compensarlos.

La **Resolución 18-0241 de 2012** delimitó y declaró como áreas estratégicas mineras, para los minerales determinados como estratégicos en la Resolución número 18 0102 del 30 de enero de 2012 del Ministerio de Minas y Energía, un área total de 2.900.947.78 ha, referidas en 313 bloques o polígonos según se establece en el documento denominado "**Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado**", de febrero de 2012, el cual hace parte integral de la resolución mencionada inicialmente.(Art.1)

Según la UPME (2021), el cobre es considerado un mineral estratégico para Colombia, de acuerdo a lo establecido en la **Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 del Ministerio de Minas y Energía** (Art.1) y continuará siéndolo en el mediano plazo, según la revisión de los minerales estratégicos realizada por la institucionalidad minera en 2019.

#### 5.4.6.1 Ambiental

Desde el componente minero ambiental y dando cumplimiento a la **Ley 685 de 2001** (por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones), los Ministerios de Minas y Energía y del Medio Ambiente, a través de la **Resolución 18-0861 del 20 de agosto de 2002** adoptaron las Guías Minero Ambientales de Exploración, Explotación y de Beneficio y Transformación, las cuales son un



instrumento de consulta obligatoria y orientación de carácter conceptual, metodológico y procedimental que enuncian aspectos a considerar, en las etapas de producción, cierre y abandono de las minas, dando elementos importantes en el alcance minero y ambiental, para el desarrollo de proyectos de pequeña, mediana y gran minería. (Art. 1-2)

En materia de minería, la legislación ambiental vigente contempla dos instrumentos ambientales, los cuales se exigen de acuerdo a la etapa en la que se encuentre el proyecto minero.

“Es así, entonces, que para la etapa de exploración, la normativa vigente exige que el titular minero desarrolle dichas actividades bajo el amparo de las Guías Minero ambientales, las cuales son una herramienta de consulta y orientación conceptual y metodológica para mejorar la gestión, el manejo y desempeño” (Unidad de Restitución de Tierras [URT], 2015, pp.22 -23).

De igual manera “Para las otras dos etapas, es decir construcción y montaje y explotación, la legislación vigente prevé que el instrumento ambiental por excelencia y por medio del cual se deben realizar los trabajos propios de dichas actividades es la Licencia ambiental” (URT, 2015, p.23).

Así pues,

“para que al titular minero le sea otorgada la licencia ambiental, debe radicar ante la autoridad ambiental competente el Plan de Manejo Ambiental, de forma simultánea a la presentación del Programa de Trabajos y Obras – PTO. En ese orden de ideas la Licencia Ambiental, debe ser correlativa a todas aquellas actividades que se desarrollaran a través del plan minero (PTO)” (URT, 2015, p.23).

Para la etapa de exploración y previo al inicio de los trabajos, el informe de las actividades que serán desarrolladas para el cumplimiento de las guías minero ambientales debe ser inscrito en el Registro Nacional Minero y ante la autoridad ambiental competente, para que esta pueda hacer el respectivo seguimiento ambiental a los trabajos de exploración.

Adicional a lo anterior, una vez otorgado y debidamente inscrito el contrato único de concesión, para la etapa de exploración se deberá tener en cuenta que si en el desarrollo de las actividades mineras propias de la etapa se requiere el uso de recursos naturales renovables, se deberán solicitar ante la autoridad ambiental competente los permisos menores a que haya lugar, como son los permisos de vertimiento, concesión de aguas, etc. (URT, 2015, p.23).

Cabe mencionar que el Artículo 35 del Código de Minas contempla restricciones a la actividad minera en ciertas áreas del país, en atención a la naturaleza especial de este tipo de zonas, lo que quiere decir que pueden realizarse actividades de exploración y explotación minera en dichas zonas SOLO SI se obtienen los permisos adicionales, exigidos en la norma. (Ley 685, 2001)



Por lo anterior, a estas se las denomina zonas de minería restringida. Tal es el caso de las áreas de reserva forestal: *“La restricción de la actividad minera en las áreas de reserva forestal de la Ley 2 de 1959 opera hasta tanto el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expida el acto administrativo por medio del cual se autorice la sustracción de la respectiva área” (Citado en URT, 2015, p.15).*

En términos de normatividad ambiental, en el **Decreto 1076 de 2015** por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible y que corresponde a un decreto compilatorio de normas reglamentarias preexistentes, se encuentra toda la normatividad relacionada con el sector, la cual debe ser revisada en su totalidad para verificar de manera específica qué obligaciones aplican al proyecto, obra o actividad que se pretenda desarrollar.

A continuación, se abordan las temáticas generales aplicables a la minería del cobre y se listan las principales normas asociadas a cada temática.

#### a. Licenciamiento ambiental

“La Licencia ambiental es la autorización que otorga la autoridad ambiental para la ejecución de un proyecto, obra o actividad, que de acuerdo con la Ley y sus reglamentos” (Decreto 1076, 2015, Art. 2.2.2.3.1.3.) tiene la potencialidad de generar impactos ambientales significativos. Las autoridades ambientales competentes para otorgar o negar, suspender o revocar las licencias ambientales son la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), las Corporaciones Autónomas Regionales y las de Desarrollo Sostenible, los municipios, distritos y áreas metropolitanas cuya población sea superior a un millón de habitantes dentro de su perímetro urbano y las autoridades ambientales creadas mediante la Ley 768 de 2002. El Decreto 1076 de 2015, en su artículo 2.2.2.3.1.2., define las competencias de estas autoridades.

La normativa determina que los estudios que soportan el licenciamiento ambiental son el Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) y el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), a los cuales se les denomina “estudios ambientales”. Los estudios ambientales deben ser presentados por los interesados en obtener una licencia ambiental para un proyecto, obra o actividad y deben contener la información que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, o eventualmente las autoridades ambientales han considerado necesaria para realizar la evaluación de la solicitud y que han hecho conocer mediante términos de referencia. El DAA soporta la solicitud de evaluación de alternativas y el EIA soporta la evaluación de la viabilidad ambiental de ejecutar un proyecto, obra o actividad.





## I. Términos de referencia para estudios ambientales

Las autoridades ambientales (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales o Corporaciones Autónomas Regionales), realizan control y seguimiento al aprovechamiento sobre los recursos naturales renovables que se pretenden usar, aprovechar o afectar para el desarrollo de un proyecto, obra o actividad, como parte de la aprobación y trazabilidad de los instrumentos ambientales requeridos u obtenidos por las empresas para cada uno de sus proyectos.

Dentro de la normatividad relacionada con proyectos del sector minero se encuentra la **Resolución 2206 de 2016** del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que corresponde a los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones, así como la **Resolución 0447 de 2020** que corresponde a los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental global o definitiva para proyectos de explotación de pequeña minería.

## II. Trámite de licenciamiento ambiental

Conforme al Decreto 1076 de 2015, la Metodología General para Presentación de Estudios Ambientales, los términos de referencia y la normativa ambiental vigente, el usuario debe elaborar el estudio ambiental requerido, el cual debe ser presentado a la autoridad ambiental competente junto con los requisitos establecidos en el decreto en mención, para iniciar el trámite correspondiente.

Como principales documentos anexos al estudio ambiental, se deben presentar:

- Certificado del Ministerio del Interior sobre presencia o no de comunidades étnicas y de existencia de territorios colectivos en el área del proyecto de conformidad con lo dispuesto en el Decreto 2613 de 2013. (Dicha certificación deberá demostrar coincidencia entre el área de influencia y el nombre del proyecto propuesto en el EIA o PMA).
- Copia de la radicación del documento exigido por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH), a través del cual se da cumplimiento a lo establecido en la Ley 1185 de 2008. (El documento radicado ante el ICANH deberá corresponder con el nombre del proyecto propuesto en el EIA o PMA)

La autoridad ambiental competente,





(...) empieza a realizar la evaluación ambiental para determinar la viabilidad o no del proyecto, obra o actividad. La evaluación se realiza tanto de tipo documental, como mediante visita técnica de campo, de igual manera se puede solicitar pronunciamiento a otras entidades, con el fin de obtener los suficientes elementos de juicio para su pronunciamiento.

Todo el proceso de evaluación se realiza en conjunto entre profesionales técnicos y jurídicos. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], s.f. numeral 11).

Así mismo,

Una vez surtido el proceso de evaluación por parte de la Autoridad Ambiental, mediante concepto técnico se fundamenta la viabilidad o no de la licencia ambiental. Dicho concepto técnico se acoge mediante acto administrativo, que posteriormente es notificado al solicitante, en los términos de la Ley 1437 de 2011, por la cual se expide el Código de Procedimiento (ANLA, s.f. numeral 11).

## **b. Calidad del medio ambiente**

### **I. Recurso aire**

En términos de calidad de aire, en la **Resolución 2254 de 2017**, *por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*, se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional (Art.1).

Para las emisiones de fuentes fijas (fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa), que para el caso de un ducto o chimenea de descarga es considerada fuente fija puntual, la normatividad aplicable es la **Resolución 909 de 2008** *por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*.

En términos de ruido, la **Resolución 627 de 2006** establece los niveles máximos de emisión de ruido ambiental y ruido de emisión (por parte de una fuente). Los límites son establecidos por la autoridad ambiental competente, para mantener un nivel permisible de presión sonora, según las condiciones y características de uso del sector, de manera tal que proteja la salud y el bienestar de la población expuesta, dentro de un margen de seguridad.

## **II. Recurso hídrico**

En el **Decreto 3930 de 2010** se establecen “las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico al suelo y a los alcantarillados” (Art.1). Mediante el



ordenamiento del Recurso Hídrico se realiza la clasificación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas, para fijar en forma genérica su destinación a los diferentes usos y sus posibilidades de aprovechamiento.

Para el caso de los vertimientos, la norma que los regula a nivel nacional es la **Resolución 631 de 2015** del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*, en el título VI, artículo 10, se establecen los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de agua superficiales de actividades de minería.

**Tabla 1. Parámetros de calidad de agua y límites normativos para vertimientos del sector minero.**

Ítem	Descripción	Unidad	Extracción de minerales de Níquel y otros minerales metalíferos no ferrosos
<b>GENERALES</b>			
1	pH	Unidades	6,00 - 9,00
2	DQO	mg/L O <sub>2</sub>	150
3	DBO <sub>5</sub>	mg/L O <sub>2</sub>	50
4	Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	50
5	Sólidos Sedimentables	mL/L-h	10
6	Grasas y aceites	mg/L	10
7	Fenoles	mg/L	0,20
8	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
<b>HIDROCARBUROS</b>			
9	Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10
<b>COMPUESTOS DE FÓSFORO</b>			
10	Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
11	Fósforo Total	mg/L	Análisis y reporte
<b>COMPUESTOS DE NITRÓGENO</b>			
12	Nitratos	mg/L	Análisis y reporte
13	Nitritos	mg/L	Análisis y reporte
14	Nitrógeno amoniacal	mg/L	Análisis y reporte
15	Nitrógeno total	mg/L	Análisis y reporte
<b>IONES</b>			
16	Cianuro Total	mg/L	1,0
17	Sulfatos	mg/L	250 o 1000 cuando se realicen procesos de hidrometalurgia
<b>METALES Y METALOIDES</b>			
18	Arsénico	mg/L	0,10
19	Cadmio	mg/L	0,05
20	Zinc	mg/L	3,0
21	Cobre	mg/L	1,0
22	Cromo Total	mg/L	0,50
23	Hierro total	mg/L	5,0
24	Mercurio	mg/L	0,002
25	Níquel	mg/L	0,50
26	Plomo	mg/L	0,20
<b>OTROS PARÁMETROS PARA ANÁLISIS Y REPORTE</b>			
27	Acidez total	mg/L	Análisis y reporte
28	Alcalinidad total	mg/L	Análisis y reporte
29	Dureza Cálcica	mg/L	Análisis y reporte
30	Dureza Total	mg/L	Análisis y reporte
31	Color Real	m-1	Análisis y reporte

Fuente: ATG Ltda., (2022), tomado y modificado del (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).



### III. Residuos sólidos

**Decreto 1076 de 2015**, se compilan los temas de generación de residuos convencionales, peligrosos, comparendo ambiental, entre otros.

**Resolución 1326 de 2017**, se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.

**Resolución 1407 de 2018**, se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras disposiciones.

**Decreto 284 de 2018**, se adiciona al Decreto 1076 de 2015, lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE y se dictan otras disposiciones.

#### 5.4.7 Gestión de riesgo

Por medio del **Decreto 2157 de 2017**, se adoptan las directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del Artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. En la Sección 2, “Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas” Subsección 1, “Formulación del Plan”, se establecen los siguientes procesos que deben ser abordados en la elaboración del plan:

- **Proceso conocimiento del riesgo:** establecimiento del contexto, valoración del riesgo y monitoreo del riesgo.
- **Proceso de reducción del riesgo:** intervención correctiva, intervención prospectiva y protección financiera.
- **Proceso manejo del desastre:** Plan de Emergencias y Contingencia-PEC (Art. 2.3.1.5.2.1.1.)

#### 5.4.8 Ahorro y uso eficiente de agua y energía

Por otra parte, la **Ley 1715 de 2014** promueve el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía renovable al sistema energético nacional. De allí parten cuestiones y consideraciones para tener en cuenta lo estipulado en el **Decreto 1076 de 2015**, *Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible* y a su vez lo marcado en la normatividad vigente relacionado con la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía.



A grosso modo, es importante tener en cuenta como soporte legal nacional los Programas de Uso Eficiente y Ahorro de los recursos naturales; el **Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua PUEAA** (Corporación Autónoma Regional de Risaralda [CARR], 2010), reglamentado mediante la **Ley 373 de 1997**, junto con la **Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico** (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) que buscan garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz en un horizonte de 12 años (2010- 2022).

Igualmente, la **Resolución 41286 de 2016**, del Ministerio de Minas y Energía *por medio de la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2017 - 2022* para el desarrollo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía PROURE, en la cual define los objetivos y metas indicativas de eficiencia energética, acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de metas al sistema energético nacional.

#### 5.4.9 Gestión del cambio climático

La **Ley 1931 de 2018** corresponde a la Política de Cambio Climático, la cual,

“tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, Áreas Metropolitanas y Autoridades Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono”. (Ley 1931,2018, Art. 1)

#### 5.4.10 Política de transición energética

Mediante el **CONPES 4075 de 2022**, se establece la **Política de Transición Energética**. En ella se plantean “lineamientos y estrategias para incrementar la seguridad energética, incentivar el conocimiento y la innovación en transición energética, generar mayor competitividad y desarrollo económico desde el sector energético y desarrollar un sistema energético con bajas emisiones” (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022 p. 12).

El objetivo general de la citada política es “consolidar el proceso de transición energética del país a través de la formulación e implementación de acciones y estrategias intersectoriales que fomenten el crecimiento económico, energético, tecnológico, ambiental y social del país con el fin de avanzar hacia su transformación energética” (DNP,2022, p.60).

El documento CONPES- Política de Transición Energética, está compuesto por seis secciones así:



- 1. Introducción
- 2. Antecedentes y justificación: relacionados con los sectores de energía eléctrica, hidrocarburos, movilidad sostenible, y minería.
- 3. Diagnóstico: estado actual de la transición energética en el país
- 4. Definición de la política: objetivos, estrategias y las acciones, que serán implementadas para consolidar el proceso de transición energética del país.
- 5. Recomendaciones: con las propuestas al Consejo de Política Económica y Social (CONPES).

En términos de cobre, en el CONPES se aborda la temática en las secciones que se describen en la **Tabla 2**.

*Tabla 2. Cobre como mineral estratégico en el CONPES.*

Sección CONPES	Subsección	Descripción
<p><b>SECCIÓN 3. DIAGNÓSTICO</b></p> <p>Presenta el diagnóstico del estado actual de la transición energética en el país</p>	<p><b>3.3. Escasas medidas para el fomento de la competitividad y el desarrollo económico desde el sector minero energético</b></p> <p>Este eje problemático analiza las circunstancias que enfrenta el sector minero energético para aumentar su competitividad y alcanzar un desarrollo económico sostenible.</p>	<p><b>3.3.5. Baja inversión nacional en exploración de minerales estratégicos para la transición energética a nivel nacional</b></p> <p>“Entre 2012 y 2019 la inversión en exploración minera en Colombia disminuyó 75%. Cabe resaltar que el 53% de los títulos en etapa de exploración en el país se concentran en metales preciosos; seguido por materiales de construcción con una participación de 38%; carbón con 4%, y otros minerales como cobre y níquel con 3%. Ministerio de Minas y Energía, (2022). En este sentido las bajas inversiones en exploración minera conllevan a un bajo conocimiento del potencial geológico del territorio, cobrando mayor relevancia en minerales estratégicos para la transición energética mundial como cobre, níquel, platino, y oro. Lo anterior, conlleva al retraso de la puesta en marcha de proyectos de explotación minera y la disminución de oportunidades para atraer inversión nacional y extranjera que contribuya al desarrollo económico y social de las regiones productoras del país” (p.50)</p>
	<p><b>3.4. Altas emisiones de GEI asociadas al sistema energético del país</b></p> <p>Este eje problemático aborda y analiza las adversidades que enfrenta el sector energético del país para avanzar hacia un sistema de bajas emisiones de GEI.</p>	<p><b>3.4.6. Insuficientes herramientas de planeación y regulación para la implementación de buenas prácticas de economía circular en el sector minero</b> (...)</p> <p>“Por otra parte, en el país los procesos de beneficio en los que se separa el mineral de interés de otros geomateriales desconocen procesos de economía circular para el aprovechamiento de otros minerales como tierras raras, plata, platino, cobre, entre otros. Lo anterior, al considerar que los yacimientos nacionales de minerales como el oro o níquel son polimetálicos. Las colas de relaves o residuos de las minas de oro o níquel tienen grandes posibilidades de reúso, de acuerdo con el tipo de tecnología que se utilice para su reprocesamiento. Alrededor del mundo se han implementado tecnologías de recuperación de metales de interés dentro de estos residuos de hasta el 70% (UPME, 2018). Sin embargo, el bajo desarrollo de tecnología e innovación en el sector ha</p>



Sección CONPES	Subsección	Descripción
		dejado de lado las potencialidades que presentan estos residuos en la elaboración de materiales de construcción como ladrillos. Situación que resulta problemática al considerar que estas estrategias resultan alternativas para la solución de la problemática ambiental que se genera en operaciones con altas tasas de producción de estériles”(pp.59 - 60)
<p><b>SECCIÓN 4. DEFINICIÓN DE LA POLÍTICA</b></p> <p>Define el objetivo de la política, las estrategias, y las acciones, que serán implementadas para consolidar el proceso de transición energética del país.</p>	<p><b>4.3 Plan de acción</b></p> <p>Se establecieron cuatro objetivos específicos desarrollados a través de veintiuna líneas de acción que implican el desarrollo de actividades por parte de diferentes entidades del nivel nacional involucradas en este documento.</p>	<p><b>4.3.3. Estrategia para incrementar las medidas para fomentar la competitividad y el desarrollo económico desde el sector minero energético</b></p> <p><u>Línea de acción 14. Estrategia para incentivar la producción de minerales necesarios para la Transición energética</u></p> <p>La UPME diseñará una estrategia para la producción de cobre, oro, y otros minerales necesarios para consolidar la estrategia de transición energética, con base en el potencial geológico colombiano. De acuerdo con lo anterior y complementando esta iniciativa se realizará un plan sub sectorial para definir estrategias que conlleven y promuevan el aprovechamiento de los recursos y reservas disponibles en el territorio nacional de mineral de Cobre, Oro y minerales estratégicos. Lo anterior permitirá atraer inversión nacional y extranjera para el desarrollo de iniciativas de exploración y ejecución de estrategias que lleven a poner en marcha proyectos de explotación. Esta acción se ejecutará entre 2022 y 2027 (pp.74-75).</p>
<p><b>SECCIÓN 5. RECOMENDACIONES</b></p> <p>Presenta las recomendaciones al Consejo de Política Económica y Social (CONPES)</p>	<p><b>4. Solicitar al Ministerio de Minas y Energía</b></p>	<p>.. r. A través de la UPME, diseñar una estrategia para la producción de cobre, oro y otros minerales necesarios para consolidar la estrategia de transición energética, con base en el potencial geológico colombiano (p.84)</p>

Fuente: ATG Ltda., (2022), tomado y modificado del (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2022).

#### 5.4.11 Objetivos de Desarrollo Sostenible

En el marco para el desarrollo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia, se lleva a cabo la Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia a partir del **CONPES 3918 de 2018**, que traza indicadores y metas encaminadas a consolidar un modelo de desarrollo sostenible para el país con un horizonte a 2030.

De esta manera, genera una hoja de ruta para cada una de las metas establecidas, incluyendo indicadores, entidades responsables y los recursos requeridos para llevarlas a buen término hacia el desarrollo sostenible. Sin embargo, esta política no establece medios de implementación para el cumplimiento de las metas nacionales y, por lo tanto, el CONPES 3934 de 2018, **Política de Crecimiento Verde** (DNP. 2018), se hace necesaria para la definición de acciones estratégicas que permitan la consecución de un crecimiento económico, ambiental y social. (Ministerio de Minas y Energía, 2021)





Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) asociados a la economía circular son:

- ODS 6 - Agua limpia y saneamiento
- ODS 7 - Energía asequible y no contaminante
- ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico
- ODS 9 - Industria, Innovación e Infraestructura
- ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles
- ODS 12 - Producción y consumo responsable
- ODS 13 - Acción por el clima
- ODS 14 - Vida submarina
- ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres
- ODS 17- Alianza para lograr los objetivos

#### 5.4.12 Economía circular

En Colombia, las primeras iniciativas directamente relacionadas con la economía circular surgen en el año 1997, cuando el Ministerio del Medio Ambiente (actualmente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) expidió la **Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos** (Ministerio de Medio Ambiente [MMA], 1997) que tiene como objetivos:

La política de residuos sólidos al desarrollarse bajo los principios del desarrollo sostenible se fundamenta en tres presupuestos: la minimización del impacto ambiental negativo que causan los residuos, el crecimiento económico y el mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad en general así como de las condiciones sociales de quienes intervienen en las actividades relacionadas con la gestión de los residuos (MMA, 1997, p.9.)

Y la **Política Nacional de Producción más Limpia** que busca:

Prevenir y minimizar eficientemente los impactos y riesgos a los seres humanos y al medio ambiente, garantizando la protección ambiental, el crecimiento económico, el bienestar social y la competitividad empresarial, a partir de introducir la dimensión ambiental en los sectores productivos, como un desafío de largo plazo. (MMA, 1997, p.30).

En el año 2000, con la expedición de la **Política de Parques Industriales Eco-eficientes** por parte de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá se buscó la creación de espacios geográficos donde diversas empresas se ubicaran, de manera que al estar conectados a la infraestructura logística (vías, fluviales o puertos), en zonas industriales, pudieran compartir infraestructura o acceder a un régimen tributario favorable (zonas francas). Por la conglomeración de empresas de diferentes sectores y tamaños, los parques industriales presentan oportunidades para desarrollar actividades de simbiosis industrial para el cierre de ciclos de materiales o para compartir servicios o infraestructura, como por ejemplo plantas de tratamiento de aguas residuales.





Mediante el **Decreto 4741 de 2005** se reglamentó parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral y en el año 2007, mediante la **Resolución 1362 de 2007** se desarrolló la normativa sobre la responsabilidad extendida del productor en materia de la Gestión de los Residuos Peligrosos; en el 2010 la normativa en materia de pilas, acumuladores, computadores, periféricos y bombillas fluorescentes; posteriormente la **Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible** (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) y la **Política para la Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos – RAEE** ( Ley 1672 de 2013) contribuyen a la conceptualización de la economía circular (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2019). Además, plantea los objetivos de minimizar la producción de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, con el fin de minimizar los riesgos en la salud humana y el medio ambiente, finalmente incentivar el aprovechamiento como una alternativa de empleo y como un sector económicamente viable.

Desde el año 2010, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece programas de responsabilidad extendida del productor que obliga a los productores e importadores de productos regulados a asegurar su recolección en el mercado; es por ello que es indispensable tener en cuenta la **Resolución 1457 de 2010**, pues en ella se establecen los Sistema de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas como línea de acción de los flujos de materiales industriales.

Actualmente Colombia cuenta con la **Resolución 1256 de 2021** que modificó la **Resolución 1207 de 2014** expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones, en línea con lo establecido en la Estrategia Nacional de Economía Circular que contempla el reúso como una práctica para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos.

El Departamento Nacional de Planeación (DNP), junto con otras entidades regulatorias y competentes, expidieron nuevos elementos para fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país, entre ellos la **Política de Desarrollo Productivo a partir del CONPES 3866 de 2016** (DNP, 2016) que promueven la generación de encadenamientos y el fortalecimiento de cadenas de valor como uno de los factores generadores de la productividad enmarcados en siete (7) ejes: la Transferencia de conocimiento y tecnología, la Innovación y emprendimiento, el Capital humano, el Financiamiento, los Encadenamientos productivos, la Calidad y el Comercio exterior.

No obstante, es con el **CONPES 3874 de 2016** que se expide la **Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos** (DNP, 2016), en la que



se introduce el concepto de “avanzar en el cierre de ciclos” de manera oficial en el país.

Adicionalmente, es necesario contemplar en el marco normativo la **Resolución 1257 de 2021, por la cual se modifica la resolución 0472 de 2017** expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en cuyo alcance se reglamenta la Gestión Integral de los Residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD), como uso circular de los flujos de materiales de construcción.

De acuerdo a lo anterior, el **CONPES 3934 de 2018** establece la **Política de Crecimiento Verde** (DNP. 2018), con el objetivo de impulsar a 2030 el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, al tiempo que se asegura el uso sostenible del capital natural y la inclusión social, de manera compatible con el clima; así mismo define dentro de su plan de acción algunas estrategias hacia el fortalecimiento de los mecanismos y los instrumentos para optimizar el uso de recursos naturales y energía en la producción y el consumo, así como la **Resolución 1407 de 2018** de Responsabilidad extendida del productor para envases y empaques.

En el año 2020, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, [ICONTEC], organismo nacional de normalización, según el Decreto 1595 de 2015, establece la **Guía Técnica Colombiana GTC 314 – 2020 “Marco para la implementación de los principios de la economía circular en las organizaciones”**, elaborada por el CTN 14: Gestión Ambiental y herramientas para el desarrollo sostenible, ratificada por el Consejo Directivo de 2020-11-25 y en la que se materializan los objetivos macro de aplicación desarrollados en varios CONPES, como por ejemplo los que se consignan en la Política de Crecimiento Verde.

Finalmente, en el año 2021, el Ministerio de Minas y Energía elaboró la **“Propuesta de Lineamientos Técnicos de Política de Buenas Prácticas para Estandarizar los Procesos de Economía Circular en la actividad minera”**, en cuyo documento se establecen lineamientos que comprenden las siguientes etapas principales: exploración, construcción y montaje, explotación y cierre y post-cierre, los cuales fomentan el fortalecimiento del sector. (Ministerio de Minas y Energía, 2021)



## 6 BUENAS PRÁCTICAS EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

En la “**Guía Minero Ambiental de Beneficio y Transformación**” se define el **proceso de beneficio de los minerales**, el cual consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, mezcla y homogenización, lavado, concentración y otras operaciones similares a las que se somete el mineral extraído para su posterior transformación y utilización. Asimismo, se define el **proceso de transformación** como la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial después del cual resulta un producto diferente y no identificable con el mineral en su estado natural. (Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente, 2002)

Los procesos de beneficio y transformación del cobre se realizan según la mineralogía del material que permite determinar si se presenta como óxidos de cobre o como sulfuros de cobre, los primeros se transforman por la vía de la hidrometalurgia y los segundos principalmente por la vía pirometalúrgica y en algunos casos de sulfuros secundarios por la vía de la hidrometalurgia, ver **Figura 6**.

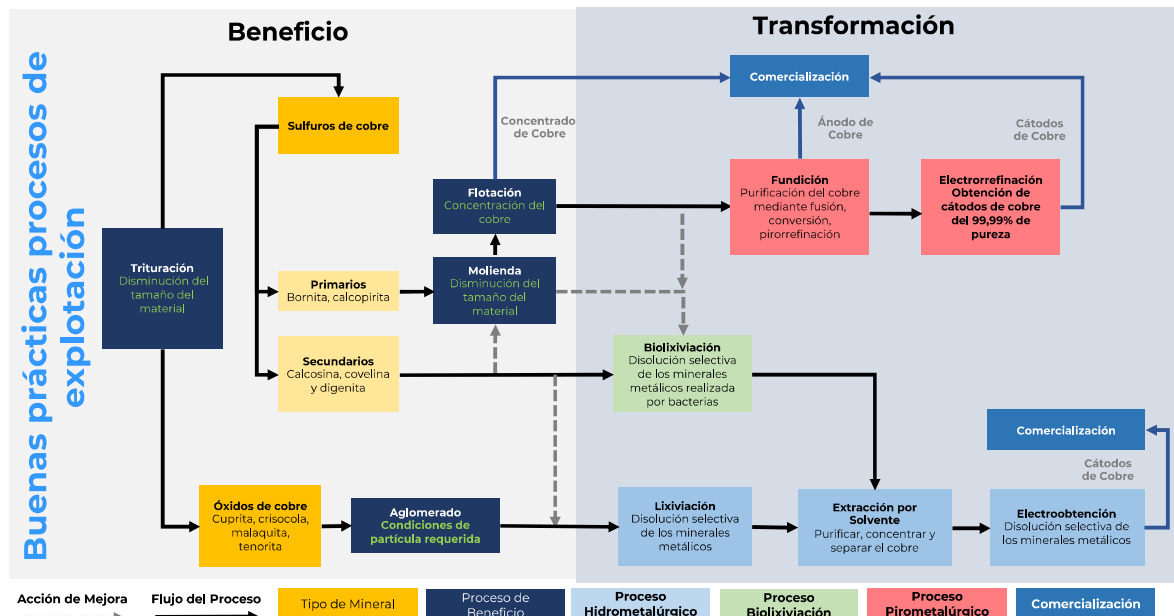


Figura 6. Procesos para el beneficio y la transformación del cobre  
 Fuente: ATG Ltda., (2022).

En el proceso de beneficio y transformación del cobre se identifican los **componentes hidrológico, suelo y atmosférico** pertenecientes al medio abiótico, como los de mayor afectación, debido a los lixiviados, residuos y gases que se generan en los procesos de trituración, molienda, flotación, fundición y los mecanismos químicos de separación tales como lixiviación y/o biolixiviación.



A continuación, se listan los principales impactos ambientales identificados para cada componente y que fueron consultados en el listado de impactos ambientales específicos en el marco del licenciamiento ambiental, elaborado por la Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020).

### Componente Hidrológico

- **Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial y/o subterráneo:** cambios en las características fisicoquímicas, microbiológicas y/o hidrobiológicas de las aguas superficiales y/o subterráneas como consecuencia de un proyecto, obra o actividad.
- **Alteración en la oferta y disponibilidad del recurso hídrico superficial y/o subterráneo:** cambio de los caudales y/o volúmenes en un cuerpo de agua superficial y/o subterráneo que causan una modificación de la oferta hídrica como consecuencia de un proyecto, obra o actividad.

### Componente Suelo

- **Alteración en la calidad del suelo:** cambio en las características y propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como consecuencia de un proyecto, obra o actividad.
- **Incremento en la generación de residuos sólidos:** aumento de residuos sólidos convencionales y peligrosos que deben ser gestionados y según la disposición que se realice pueden afectar el uso y la calidad del suelo como consecuencia de un proyecto, obra o actividad.


### Componente Atmosférico

- **Alteración a la calidad del aire:** cambio en las concentraciones de los contaminantes criterio y/o tóxicos en el aire, producto de las emisiones generadas como consecuencia de un proyecto, obra o actividad.
- **Alteración en los niveles de presión sonora:** cambio en los niveles de ruido ambiental como consecuencia de la emisión de ruido de un proyecto, obra o actividad.

En la **Tabla 3** se presentan los principales impactos identificados para los procesos de beneficio y transformación del cobre.



**Tabla 3. Identificación de impactos para los procesos de beneficio y transformación del cobre.**

 Impactos  Procesos	Medio Abiótico					
	Componente Atmosférico		Componente Hidrológico		Componente Suelo	
	Alteración a la calidad del aire	Alteración en los niveles de presión sonora	Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial y/o subterráneo	Alteración en la oferta y disponibilidad del recurso hídrico superficial y/o subterráneo	Alteración a la calidad del suelo	Incremento de la generación de residuos sólidos
<b>Beneficio del Mineral de Cobre</b>						
Trituración	✗	✗		✗		
<b>Beneficio de Sulfuros de Cobre</b>						
Molienda	✗	✗		✗		
Flotación (concentración)			✗	✗	✗	✗
<b>Transformación de Sulfuros de Cobre</b>						
Secado de concentrado	✗	✗				
Fundición	✗	✗				✗
Electrorrefinación			✗	✗		✗
<b>Transformación de Óxidos y Algunos Sulfuros de Cobre</b>						
Lixiviación			✗	✗	✗	
Extracción por solvente			✗	✗	✗	
Electroobtención			✗	✗		
Biolixiviación			✗	✗		

Fuente: ATG Ltda., (2022).

Los principales componentes afectados, hidrológico, atmosférico y suelo, se relacionan de manera directa con la implementación de los ODS 6. Agua Limpia y



Saneamiento, ODS 7. Energía asequible y no contaminante, ODS 12. Producción y consumo responsable y ODS 13. Acción por el clima.

## 6.1 Buenas prácticas transversales a los procesos de beneficio y transformación de cobre, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son la agenda global de desarrollo aprobada el 25 de septiembre de 2015 en el marco de la Asamblea General de las Naciones Unidas, con el objetivo de promover la sostenibilidad ambiental, la erradicación de la pobreza y la inclusión social, la prosperidad económica y la paz. Son 17 objetivos asociados a 169 metas que fueron adoptados por las partes firmantes. Cada país ha definido compromisos concretos alrededor de los ODS para alcanzar las metas propuestas a 2030. (Naciones Unidas, 2015)

En el atlas de la “**Cartografía de la minería en relación con los objetivos de desarrollo sostenible**” del Centro de Inversión Sostenible de la Universidad de Columbia [CCSI], elaborado en el 2016, se exponen las relaciones entre la minería y los ODS mediante el uso de ejemplos de buenas prácticas del sector y el aprovechamiento de los conocimientos y recursos existentes.

En los procesos de beneficio y transformación del cobre se pueden desarrollar buenas prácticas que contribuyan al logro de los ODS principalmente enfocadas a los siguientes objetivos:

### Sostenibilidad ambiental

- **ODS 6 (agua limpia y saneamiento):** los procesos de beneficio y transformación del cobre requieren volúmenes considerables de agua, se tiene la oportunidad de desarrollar acciones enfocadas al uso eficiente del recurso, mediante estrategias de reúso, optimización e implementación tecnológica en el tratamiento del agua residual generada.
- **ODS 7 (energía asequible y no contaminante):** para el funcionamiento de los equipos e instalaciones de la planta de beneficio y transformación del cobre se requiere suministro continuo de energía eléctrica y combustibles fósiles, por lo que es necesario aumentar la eficiencia de los procesos y buscar la implementación progresiva de alternativas energéticas que minimicen el impacto al medio ambiente.
- **ODS 13 (acción por el clima):** en las actividades desarrolladas en los procesos de beneficio y transformación del cobre y especialmente en la transformación pirometalúrgica del cobre se generan como subproductos, material particulado, gases tales como SO<sub>2</sub>, arsénico, entre otros, razón por la cual se deben implementar estrategias tales como reconversión tecnológica que permitan el tratamiento integral de los gases del proceso, reduciendo drásticamente las emisiones fugitivas y optimizando la captación y tratamiento de los gases generados, logrando la reducción de gases efecto invernadero. (CCSI, 2015, p.4)




## Desarrollo Económico

- **ODS 12 (producción y consumo responsables):** la trituración, molienda, flotación (concentración), lixiviación, biolixiviación, fundición, electrorrefinación y electroobtención para la obtención de cátodos de cobre, implican consumo de recursos (agua, energía) y generación de subproductos que pueden ser aprovechados o incorporados al proceso de beneficio y transformación de cobre. La implementación de buenas prácticas y de estrategias de innovación y desarrollo tecnológico permitirán que los procesos no solo se desarrollen de manera eficiente, reduciendo el consumo de recursos, sino que con subproductos tales como relaves deshidratados del proceso de concentración, escorias de los procesos de fundición, lodos anódicos del proceso de electro electrorrefinación y electroobtención puedan ser implementadas estrategias de economía circular, potenciando el aprovechamiento total de los subproductos y por ende una producción y consumo responsables. (CCSI, 2015, p.4)


En la **Tabla 4** se ejemplifican prácticas desde el beneficio y transformación del cobre que contribuyen a alcanzar los ODS.







**Tabla 4. Buenas prácticas procesos de beneficio del mineral de cobre.**

Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS				
<b>Buenas prácticas procesos de beneficio del mineral de cobre</b>				
<b>Trituración</b>	<b>X</b> Cuantificación de entradas y salidas de agua para determinar su potencial de reúso y/o reciclaje	<b>X</b> Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético Ej. Molino SAG	<b>X</b> Establecer indicadores que permitan determinar consumo de recursos para formular estrategias de mejora y uso eficiente	-
			<b>X</b> Manejo de material particulado generado en la conminución del material, para evitar impacto a la calidad del aire.	
<b>Buenas prácticas procesos de beneficio de sulfuros de cobre</b>				
<b>Molienda</b>	<b>X</b> Cuantificación de entradas y salidas de agua para determinar su potencial de reúso y/o reciclaje	<b>X</b> Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético Ej. Molino SAG	<b>X</b> Establecer indicadores que permitan determinar consumo de recursos para formular estrategias de mejora y uso eficiente	-
			<b>X</b> Manejo de material particulado generado en la conminución del material, para evitar impacto a la calidad del aire.	



Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS				
<b>Flotación (Concentración)</b>	<p><b>X</b>                      Implementar sistemas de tratamiento que permitan la recirculación y/o vertimiento de agua cumpliendo con la calidad requerida en cada actividad</p>	<p><b>X</b>                      Diseño de circuitos de flotación eficientes, que disminuyan el consumo energético</p>	<p><b>X</b>                      Realizar recirculación de agua para el funcionamiento de los procesos, o desarrollo de actividades secundarias de la operación</p>	<p>-</p>
	<p><b>X</b>                      Identificación de reactivos que puedan ser reutilizados, e impliquen facilidad en su manejo, tratamiento y disposición</p>		<p><b>X</b>                      Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización, Ej. Relaves filtrados para procesos de retrolenado de la mina.</p>	
<b>Buenas prácticas procesos de transformación de sulfuros de cobre</b>				
<b>Secado de concentrado</b>	<p><b>X</b>                      Reúso de vapor de agua proveniente de los procesos de fundición</p>	<p><b>X</b>                      Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético</p>	<p><b>X</b>                      Recuperación de partículas de concentrado de cobre en suspensión</p>	<p>-</p>
	<p><b>X</b>                      Reúso de vapor de agua</p>	<p><b>X</b>                      Control del flujo eléctrico a los hornos de fundición para evitar ineficiencias</p>	<p><b>X</b>                      Recuperación de condensados- Vapor de agua condensado</p>	



Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS				
<b>Electrorrefinación</b>	X Reúso de soluciones	X Establecer indicadores de consumo de energía por tonelada de cátodo para realizar ajustes en la eficiencia del sistema de celdas, espaciamiento entre los electrodos.	X Reciclaje de ánodos	-
			X Recuperación de metales preciosos del lodo anódico	
<b>Buenas prácticas procesos de transformación de óxidos de cobre y algunos sulfuros de cobre</b>				
<b>Lixiviación</b>	X Recuperación de agua	X Se deben estimar los requerimientos eléctricos para el proceso debido al alto consumo de corriente para las celdas de electroobtención	X Recuperación y reúso de ácidos, solventes y soluciones	-
<b>Extracción por solvente</b>				
<b>Electroobtención</b>			X Recuperación de metales preciosos del lodo anódico	
<b>Buenas prácticas procesos de transformación de sulfuros secundarios y óxidos de cobre</b>				
<b>Biolixivación</b>	X Recuperación y tratamiento de aguas ácidas	-	-	X Disminución en las emisiones de gases como SO <sub>2</sub> y arsénico

Fuente: ATG Ltda., (2022).



## 6.2 Mejores técnicas y tecnologías disponibles

En la actualidad, la industria cuprífera está siendo impulsada por la transformación energética, toda vez que el cobre es la piedra angular de casi todas las tecnologías de energía limpia, lo que implica un aumento de la demanda de este mineral; sin embargo, este aumento de la demanda se da en un contexto de disminución de las leyes de cobre promedio, en consecuencia, las empresas mineras tienen un desafío grande de extraer el mineral de cobre en condiciones eficientes, rentables y sostenibles.

Los avances tecnológicos han ido aumentando con la comprensión metalúrgica, química y física de cada proceso de beneficio y transformación, por lo que se han incorporado nuevas tecnologías, aumentando el grado de recuperación de cobre.

En lo que concierne al diseño de las plantas mineras se ha desarrollado software como METSIM o BASF intelligent mine, que son cada vez más robustos y mejoran la planeación, instalación, comisionamiento, seguimiento y optimización del proceso, dando resultados fiables y efectivos que aseguran la escogencia de tecnologías y equipos ayudando en la planeación y optimización de los proyectos de cobre.

Las tecnologías de monitoreo y medición para automatizar procesos permiten implementar sistemas expertos de control que ayudan al operador en la toma de decisiones con una cantidad de información actualizada cada segundo, dando como resultado la optimización de los procesos y recursos usados. Hay varios sistemas que ya se han implementado en la industria minera en Colombia como el sistema SCADA que recoge todos los datos de sensores, equipos de vigilancia y medición, lo centraliza en una computadora y asegura que los procesos y equipos se ejecuten en los rangos y especificaciones diseñadas. Con respecto a los sensores y equipos de monitoreo, hay una amplia gama que se encuentra en el mercado que permite realizar mediciones en todos los procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos sin excepción, ayudando a tener un conocimiento pormenorizado de lo que sucede en cada proceso, en tiempo real.

En los procesos pirometalúrgicos se han realizado destacadas mejoras técnicas en la transformación del cobre, con el objetivo de cumplir los altos estándares de calidad y ambientales. Entre otras a destacar, se están reemplazando los hornos reverberos con hornos de fusión continua flash que reducen el consumo de combustible, lo que aprovecha el calor producido y reduce los niveles de emisión de gases. En los últimos años, varias fundiciones chinas han implementado destacados avances como la tecnología de fundición ciclónica, que mejora el horno flash con un desarrollo en los quemadores que reduce la generación de polvo y disminuye las pérdidas de cobre. También destaca la tecnología de fundición de



cobre por soplado de fondo (BBS<sup>3</sup>), que inyecta aire enriquecido a alta presión en el baño, lo que permite producir mata de cobre de alta ley con un contenido de cobre relativamente bajo. También la fundición y conversión continua de cobre dirigido a fundiciones de tamaño pequeño a mediano mediante la transferencia continua de mata de cobre al reactor de conversión, (Mark E, 2022).

En los procesos de beneficio, una mejora técnica en la operación de conminución es la irrupción de los molinos SAG, lo que ha traído múltiples beneficios, pues con un bajo porcentaje de bolas y con el mismo material, realizan la reducción de tamaño por fuerzas de impacto, ayudando a minimizar el uso de otros equipos de trituración y molienda, tienen menor consumo energético, logran un mejor control ambiental por disminución de emisión de polvo, ya que se puede trabajar en húmedo y disminución de ruido en la operación.

En los procesos hidrometalúrgicos del cobre, una mejora técnica fue la implementación de extracción por solvente, permitiendo reducir los costos de extracción y un menor impacto en el medio ambiente comparado con los procesos de fundición.

En el campo de la lixiviación se está logrando avances en las tecnologías perfeccionando los procesos, realizando mejoras en los agentes lixiviantes, haciendo selección óptima de equipos de lixiviación y alternando los métodos de extracción para realizar el beneficio no solo de óxidos de cobre, sino sulfuros primarios y secundarios de cobre. La tecnología que más ha evolucionado en esta línea ha sido la biolixiviación. Esta tecnología en desarrollo ha avanzado en la identificación y mejoramiento de las cepas bacterianas para optimizar las cinéticas de reacción y las condiciones de operación. La tecnología de agitación tiene distintas mejoras en el control de la operación, el aumento de las escalas de tratamiento y la reducción de inversión del capital, llegando a ser competitivo con respecto a otras tecnologías de lixiviación y la pirometalúrgica.

---

<sup>3</sup> BBS: Bottom blowing smelting es Tecnología de fundición de cobre por soplado de fondo



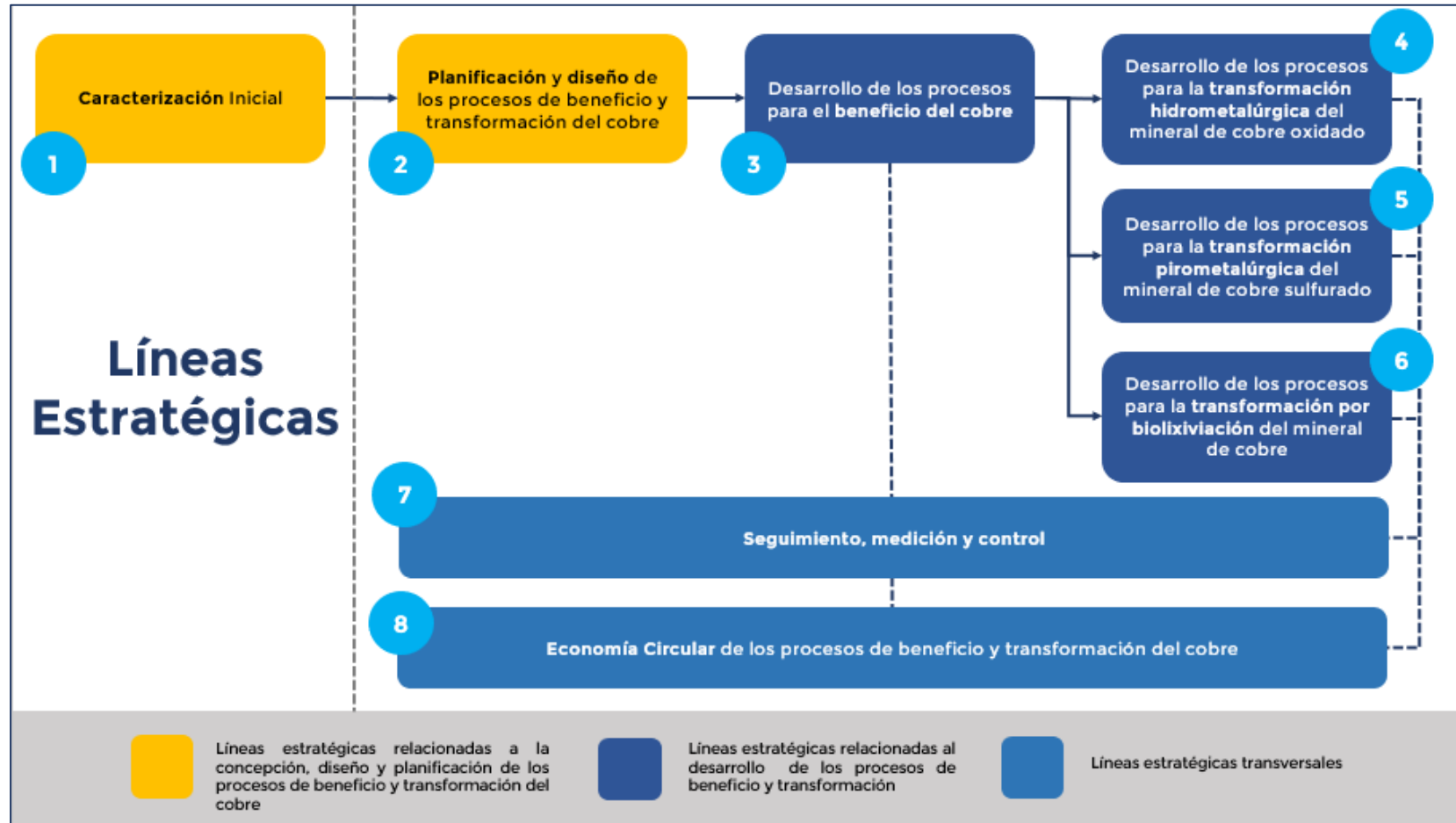
## 7 LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS PRÁCTICAS

Los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para la estandarización de los procesos asociados a la minería de cobre, comprenden etapas o líneas estratégicas principales como lo son la caracterización inicial, la planificación, el desarrollo de procesos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, de transformación por biolixiviación, diseño, operación, seguimiento y control, y economía circular. Estas líneas estratégicas permiten medir a futuro el estado de implementación y avance en la aplicación de dichos lineamientos, con miras al desarrollo de una minería del cobre con responsabilidad social y más competitiva, que aporte al mejoramiento en el desarrollo del sector minero a nivel nacional, tomando como ejemplo las prácticas internacionales, (ver **Figura 7**).

Las buenas prácticas que se pueden identificar en los procesos pirometalúrgicos y de electrorrefinación para la obtención del mineral de cobre se reflejan en el reciclaje de los productos que se desprenden de la fusión, conversión, refinación y electrólisis, como son: recuperación de calor para el proceso de secado, recuperación de los gases de SO<sub>2</sub> para utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), recuperación del mineral de cobre remanente en las escorias producidas en la fundición, reciclaje de material chatarra del proceso de fundición y de materiales de cobre reciclados, uso industrial de la escoria como insumo de productos para la construcción y uso de otras fuentes de energía, por ejemplo, utilizar los propios sulfuros como combustible.

La información operacional para el desarrollo del proceso de transformación del cobre se fundamenta en identificar parámetros minero metalúrgicos que permitan tener información básica para el diseño de la planta de fundición.

Resultan de fundamental importancia las líneas estratégicas transversales tenidas en cuenta, como es el caso de la economía circular y el seguimiento y control, debido a que estas intervienen de manera eficiente en cada uno de los lineamientos que conforman todo el proceso de beneficio y la transformación del mineral, logrando medir, analizar, probar y gestionar las leyes del cobre y las densidades de reactivos, evitando generar impactos negativos al proyecto.



**Figura 7. Líneas estratégicas para el beneficio y la transformación del cobre**  
 Fuente: ATG Ltda., (2022).





- **Líneas estratégicas de diseño y planificación de los procesos de beneficio y transformación**

El *Beneficio* y la *Transformación* constituyen la base desde donde se trabaja para la obtención del cobre con 99,99% de pureza, su diseño y planificación garantizan la sostenibilidad y eficiencia para los procesos que los constituyen, desde la caracterización del mineral hasta la hidrometalurgia y la pirometalurgia deben ser pensadas y realizadas de acuerdo a estándares ambientales, de economía circular y de control, con la finalidad de obtener mineral de cobre por medios húmedos (hidrometalurgia) o secos (pirometalurgia), como la fundición.

- **Líneas estratégicas para el desarrollo de los procesos de beneficio y transformación**

Los progresos tecnológicos en la minería han aparecido cada vez que se ha planteado un problema de abastecimiento, frente a las necesidades de la demanda que desde principios del siglo pasado está creciendo a un ritmo exponencial. Nada diferente ha ocurrido con los procesos de beneficio y transformación posteriores a la explotación de minerales como el cobre. El progreso en la tecnología ha beneficiado los procesos de obtención de éste y se ha constituido también en un instrumento para prevenir los impactos al medio ambiente de los procesos de producción. Primero fue explotado el cobre nativo por el hombre prehistórico, luego los yacimientos oxidados (Naciones Unidas, 1999), que son más cercanos a la superficie, luego los yacimientos sulfurados que se encuentran debajo de la capa oxidada y después se fueron descubriendo y perfeccionando técnicas de explotación de yacimientos de baja ley, incluso de ripios y botaderos o relaves.

- **Líneas estratégicas transversales**

Las líneas estratégicas transversales como la economía circular, el seguimiento, medición y control, y el componente ambiental, juegan un rol fundamental en el proceso de beneficio y transformación del cobre en busca de la eficiencia y el uso racional de materiales y recursos tales como agua y energía, así como en la prevención, control y/ o mitigación de impactos ambientales y socioeconómicos garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. Un adecuado seguimiento y control de los procesos, permite la prevención en la generación de residuos a partir de estrategias de reducción, reutilización y el reciclaje haciendo posible la reincorporación de materiales a cadenas productivas. Toda transversalidad se afirma con la importancia del componente ambiental, el cual finalmente determina, entre otras, las buenas prácticas para el proceso de beneficio y transformación logrando así que el proyecto pueda alinearse al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).



## 7.1 LÍNEA ESTRATÉGICA - CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL MINERAL

*El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los minerales, resulta de vital importancia para determinar su génesis, y sus aplicaciones tecnológicas, describiendo el tipo de mineral encontrado y como beneficiarlo.*

### 7.1.1 Lineamiento No. 1: Caracterización mineralógica, química y física

#### 7.1.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

Una adecuada caracterización en fases iniciales del proyecto será fundamental para determinar la concentración de sulfuros y minerales, así como el potencial de acidez y neutralización, detallando los elementos traza presentes y los elementos contaminantes, como As, Cd, Hg, Zn, entre otros.

En términos de relevancia para la economía circular, la caracterización permitirá determinar minerales de uso posterior (reúso) y modelar aquellos elementos químicos que son de interés ambiental para su efecto futuro.



#### 7.1.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X						
--	---	--	--	--	--	--	--

La caracterización mineralógica, química y física inicial permitirá la predicción del Drenaje Ácido de Mina (DAM), garantizando que en la fase de diseño del proyecto se considere o no el manejo de los drenajes ácidos que podrían generarse en la fase de explotación, beneficio y transformación del mineral de cobre. La predicción del DAM permite que el proyecto esté alineado al ODS 6. Agua limpia y Saneamiento.

#### 7.1.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
	N. A	N. A

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	N. A	N. A

La caracterización inicial no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo, debido a que esta caracterización se realiza previo al inicio de actividades en las plantas de beneficio y transformación del cobre y no demandan recursos aparte de las muestras que se tomen para análisis, cuya disposición será responsabilidad de los laboratorios contratados para tal fin.

#### 7.1.1.4 Componente 1. Tipo de minerales y concentración del material a beneficiar y transformar

##### a. Alcance

Identificar las especies minerales presentes en la mena y la ganga.

##### I. Información requerida

- Composición de los minerales
- Concentraciones del material mineralizado
- Propiedades físicas del mineral
  - Gravedad
  - Sedimentación
  - Color
  - Dureza
  - Brillo
  - Fractura
  - Clivaje
  - Rozamiento
- Propiedades químicas del mineral
  - Densidad
  - Peso específico
  - Solubilidad
  - Maleabilidad
  - Tenacidad



- Ductilidad
- pH

## II. Actividades a desarrollar

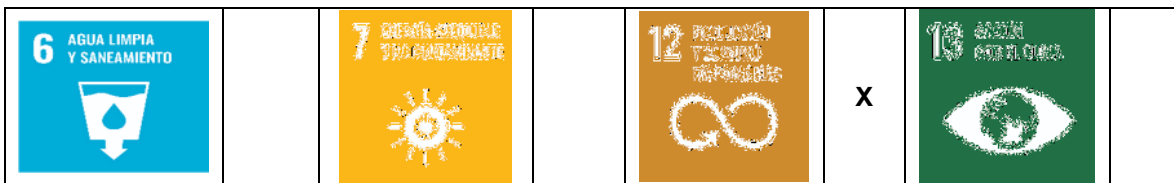
- Análisis mineralógico para identificar las especies de mineral y ganga que se encuentran presentes en el material.
- Preparación de la muestra pulverizada para análisis químico con el difractor de rayos X (XRD), para conocer la composición química.
- Utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM)
- Empleo del difractor de rayos X (XRD), para analizar qué minerales hay presentes en la muestra.
- Analizar los minerales por medio de QEMSCAN *Bulk Modal Analysis* (BMA)
- Analizar los minerales por medio de QEMSCAN *Particle Map Analysis* (PMA)
- Microanálisis de sonda electrónica (EPMA), que proporciona composiciones elementales para las fases que contengan Cu.
- Identificar la composición físico-química de los minerales presentes en el material, para saber cómo realizar el beneficio y la transformación.

### 7.1.2 Lineamiento No. 2: Identificar la ley de cobre y los minerales asociados del material explotado

#### 7.1.2.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre




La identificación de la ley de cobre permitirá controlar que el material en las distintas operaciones unitarias cumpla con los requerimientos de suministro de la planta de beneficio, optimizando el rendimiento de ésta y por ende generando una producción y consumo responsables.

#### 7.1.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS



La identificación de la ley de cobre permite determinar desde la fase de diseño del proyecto la concentración del cobre y por ende definir las condiciones operativas más eficientes para el beneficio y la transformación de éste, alineándose con el ODS 12. Producción y consumo responsable.

### 7.1.2.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	N. A	N. A
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	N. A	N. A

La identificación de la ley de cobre y los minerales asociados del material explotado no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo, debido a que esta caracterización se realiza antes del inicio de actividades en las plantas de beneficio y transformación del cobre y no demandan recursos aparte de las muestras que se tomen para análisis, cuya disposición será responsabilidad de los laboratorios contratados para tal fin.

### 7.1.2.4 Componente 1. Establecer la concentración de cobre y minerales asociados

#### a. Alcance

Realizar el análisis químico del material mineralizado que permita establecer la concentración de cobre y minerales asociados.

#### I. Información requerida

- Identificar las especies minerales presentes en la mena
- Análisis químico para cada una de las especies minerales
- Tipo de mineralización de los compuestos a analizar.
- Cuantificar y diferenciar óxidos y sulfuros

#### II. Actividades a desarrollar

- Realizar mezclas para mejorar la concentración del mineral de interés
- Preparar las muestras para ser evaluadas con el difractómetro de rayos X (XRD).



- Preparar las muestras para ser evaluadas con la fluorescencia de rayos X.
- Llevar el mineral objeto de estudio a una granulometría acorde con la Espectroscopia de absorción atómica
- Utilización del microscopio electrónico de barrido (SEM)



## 7.2 LÍNEA ESTRATÉGICA - PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

*Separar y extraer las sustancias valiosas de un material sólido es un trabajo delicado que requiere mucha destreza. Se hace en la actualidad en fundiciones e implica o puede implicar el Beneficio y la Transformación, siendo el primero el proceso o conjunto de procesos que permite separar la mena y la ganga, y la segunda, es la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado a través de un proceso industrial.*

### 7.2.1 Lineamiento No. 1: Realizar estudio metalúrgico

#### 7.2.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

Un adecuado estudio metalúrgico es la herramienta principal para la planeación óptima del tipo de proceso de beneficio y transformación del cobre y de las operaciones unitarias que serán desarrolladas, garantizando así la eficiencia y el uso racional del recurso hídrico y de la energía y previniendo impactos al componente atmosférico y al suelo.

#### 7.2.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

					X		
--	--	--	--	--	---	--	--


Un diseño de procesos óptimo garantiza el rendimiento de la planta y un uso racional y eficiente del recurso hídrico y de la energía, alineándose con el ODS 12. Producción y consumo responsable.

#### 7.2.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	N. A	N. A
	N. A	N. A





Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
Atmosférico		
 Suelo	N. A	N. A

El desarrollo del estudio metalúrgico no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo, debido a que el estudio se realiza con anterioridad al inicio de actividades en las plantas de beneficio y transformación del cobre y no demanda recursos aparte de las muestras que se tomen para análisis, cuya disposición será responsabilidad de los laboratorios contratados para tal fin.

#### 7.2.1.4 Componente 1. Procesos hidrometalúrgicos para el beneficio y transformación de óxidos de cobre

##### a. Alcance

Identificar las variables hidrometalúrgicas que se integrarán al beneficio y transformación de los óxidos de cobre.

#### I. Información requerida

- Las variables involucradas más analizadas en el proceso de lixiviación son: tamaño de partícula del componente sólido, tiempo de lixiviación, concentración del producto de interés en el mineral, concentración del agente lixivante, velocidad de agitación y temperatura de lixiviación.
- Las variables que afectan la extracción por solventes (líquido-líquido) son: pH, concentración del extractante y relación entre lo orgánico y lo acuoso.
- Identificar las siguientes variables de la electroobtención: concentración de cobre, concentración de cobalto, temperatura del electrolito para la alimentación de la celda, densidad de corriente, peso de los cátodos, dosificación y flujo de alimentación de la celda.
- Las reservas y la calidad del cobre que puede ser extraído del yacimiento.

#### II. Actividades a desarrollar

- Determinar la ubicación de la planta de beneficio y transformación de acuerdo con la dimensión de los equipos, la circulación del personal, las salas de control, cercanía con la operación minera y el método de transformación, poniendo énfasis en la seguridad de los trabajadores y los riesgos ambientales de cada operación unitaria.



- Análisis químico de las concentraciones de mineral para establecer si se cumple con los requerimientos de suministro adecuados para la planta de beneficio y transformación. Esto se logra a través de pruebas como la difracción de rayos X, fluorescencia por rayos X y espectroscopia de absorción atómica.
- En caso de contar con diferentes concentraciones, realizar la mezcla del material para garantizar que la ley del mineral de cobre cumpla con especificaciones técnicas.
- Realizar simulación del proceso hidrometalúrgico mediante la modelización matemática para ratificar el planeamiento operacional y el control de las variables en planta.
- Hacer banco de pruebas para corroborar los parámetros metalúrgicos claves que afectan la lixiviación del cobre.

### **7.2.1.5 Componente 2. Procesos pirometalúrgicos para el beneficio y transformación de sulfuros de cobre**

#### **a. Alcance**

Identificar las variables pirometalúrgicas que se integrarán al beneficio y transformación de los sulfuros de cobre.

#### **I. Información requerida**

- Tamaño de partícula de mineral.
- Porcentaje de humedad del concentrado al entrar en la fase de tostación.
- Identificar el concentrado de sulfuros para la oxidación por tostación, disminuyendo el contenido de azufre hasta un valor óptimo para la “fusión de mata” de cobre.
- Variables de diseño, de temperatura y porcentaje de recuperación.

#### **II. Actividades a desarrollar**

- Realizar pruebas físico químicas de laboratorio como flotabilidad, consumo de reactivos, mezcla de agentes, concentraciones y densidades.
- Efectuar pruebas pirometalúrgicas de variables de diseño, pruebas de temperatura.
- Fusionar los concentrados de sulfuro, tostados parcialmente o sin tostar, con la adición de fundentes, produce dos fases fundidas inmiscibles: una más pesada que contiene la mayoría de sulfuros conocida como mata, producto de concentración de cobre, y otra fase oxidada y ferrosa conocida como escoria.



- Pruebas en la fundición y en el porcentaje de recuperación, con el fin de determinar la respuesta metalúrgica del concentrado.
- Simular los procesos pirometalúrgicos mediante programas que ayuden a diseñar las condiciones de operación, seleccionar los equipos adecuados y definir parámetros operativos.
- Crear una planta piloto o un banco de pruebas para realizar validaciones de datos operacionales por medio de ensayos en las variables críticas con el fin de optimizar y perfilar el escalamiento de los procesos de beneficio y transformación.

### **7.2.1.6 Componente 3. Procesos hidrometalúrgicos a través de la biolixiviación para el beneficio y transformación de óxidos y sulfuros de cobre**

#### **a. Alcance**

Identificar las variables hidrometalúrgicas que se integrarán al beneficio y transformación de algunos de los óxidos y sulfuros de cobre.

#### **I. Información requerida**

- Identificar los factores físicos y químicos necesarios para el proceso: temperatura, pH, presión, disponibilidad de nutrientes y oxígeno, concentración de Fe y presencia de inhibidores.
- Conocer los factores biológicos como diversidad microbiana, densidad de población, actividades microbianas, distribución espacial de los microorganismos, adaptación de los microorganismos y concentración del inóculo.
- Composición y granulometría del mineral a biolixiviar.
- Determinar el área de superficie a utilizar y el consumo de ácido
- Identificar interacciones hidrófobas galvánicas, porosidad y formación de minerales secundarios.
- Definir la densidad de pulpa debido básicamente a que al aumentar la concentración de sólidos aumenta la fricción entre las partículas en el interior de la suspensión, lo que puede causar un daño celular.
- Velocidad de aireación, encargada del suministro tanto de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> al sistema de lixiviación, ya que las bacterias de lixiviación son aeróbicas.
- Tiempo de residencia.

#### **II. Actividades a desarrollar**

- Pruebas físicas de granulometría del mineral.



- Pruebas químicas de laboratorio de análisis de nutrientes para conservar en el tiempo los microorganismos.
- Controlar la diseminación de minerales mediante pruebas de análisis de liberación del mineral.
- Suministrar O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> al sistema de lixiviación, ya que las bacterias de lixiviación son aeróbicas.
- Pruebas hidrometalúrgicas de columnas bacterianas variando la temperatura.

## 7.2.2 Lineamiento No. 2: Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre

### 7.2.2.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

La definición del tipo de trituración y molienda de acuerdo con la calidad de la granulometría final requerida es un parámetro que incide de manera directa en el consumo energético del proyecto, razón por la cual se deben seleccionar bajo criterios de eficiencia, con el mayor rendimiento posible. Así mismo, se deben considerar que los equipos seleccionados permitan cumplir, como mínimo, con los estándares de calidad ambiental establecidos en la normatividad ambiental vigente en términos principalmente de calidad de aire y ruido. En términos del recurso agua, en el proceso de molienda se debe garantizar el consumo mínimo logrando la mayor eficiencia del proceso sin afectar la calidad de la pulpa para el proceso de flotación.




Las operaciones de trituración y molienda generan el mayor consumo energético del proceso de beneficio.

### 7.2.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

<p>6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p>	X	<p>7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE</p>	X	<p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES</p>	X	<p>13 ACCIÓN CLIMÁTICA</p>	
------------------------------------	---	--	---	---	---	----------------------------	--

Un equipo de trituración y molienda con uso eficiente y racional del recurso hídrico y de la energía y que garantice la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.2.2.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	N. A	N. A
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	N. A	N. A

La definición de las variables operacionales, al ser una actividad de planificación y diseño, no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo.

### 7.2.2.4 Componente 1. Establecer la composición del material a triturar

#### a. Alcance

Definir la composición del material en cuanto al contenido de minerales y propiedades físicas.

#### I. Información requerida

- Análisis granulométrico y mineralógico.
- Estudios metalúrgicos.
- Características físico-mecánicas del material.

#### II. Actividades a desarrollar

- Realizar prueba metalúrgica para obtener el tamaño óptimo de conminución.
- Establecer las características físicas y químicas del mineral para determinar el efecto del mineral en el equipo de trituración.
- Elaborar la gráfica de granulometría y calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura.
- Estudiar las propiedades mecánicas de la roca mineralizada para determinar su resistencia a compresión, tensión, flexión e impacto y penetración por otro cuerpo.



- Determinar el porcentaje de finos y el contenido de humedad del material.

### **7.2.2.5 Componente 2. Selección del tipo y tamaño de los equipos de trituración**

#### **a. Alcance**

Estudiar las diferentes alternativas de equipos, para establecer el esquema eficiente de trituración de la planta concentradora.

#### **I. Información requerida**

- Volumen de material o tonelaje a triturar.
- Tamaño de alimentación.
- Tamaño del producto de salida.
- Dureza de la roca matriz.
- Tenacidad de la roca a triturar.
- Abrasividad.

#### **II. Actividades a desarrollar**

- Identificar el porcentaje de minerales y condiciones físicas y químicas del material a triturar, con base en la información de la composición del material obtenida en su caracterización.
- Definir los criterios operativos, técnicos, costos de inversión y ambientales como son: costo de capital estimado por cada equipo, costo de operación (incluyendo el mantenimiento), riesgos de operación, seguridad, salud y los impactos que el equipo elegido puede generar sobre el ambiente.
- Analizar la operatividad del equipo dentro del circuito (horas de operación, tonelaje tratado, etc.) y evaluar el medio triturante.
- Analizar las variables operacionales de entrada y salida en el proceso de trituración, como son tipo de mineral, flujo de mineral, potencia, nivel de tolvas y la granulometría requerida para las etapas de trituración y subsiguientes.
- Conocer tablas de selección sobre las aplicaciones de las trituradoras para obtener información indicativa de las dimensiones, capacidades, producción, abertura de alimentación, anchura de descarga, consumo de energía, costos de mantenimiento y eficiencia.



### **7.2.2.6 Componente 3. Definir tipo de molienda (convencional / no convencional)**

#### **a. Alcance**

Seleccionar el molino acorde a la etapa de molienda implementada, buscando la eficiencia del proceso.

#### **I. Información requerida**

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipo de Molienda.

#### **II. Actividades a desarrollar**

- Definir el tipo de molienda de acuerdo a la producción requerida, con la calidad granulométrica final deseada, en forma eficiente, con el mínimo costo de capital, consumo mínimo de energía, reducción de costos de mantenimiento y mano de obra.
- Determinar a través de molienda en seco y húmeda, la composición de la pulpa mineral para establecer que método es el más eficiente, según el efecto de la carga de medios de molienda y tipo de molino, (Rodríguez, 2010).
- Realizar un análisis de costos que incorpore la molienda no convencional (SAG o AG), teniendo en cuenta que, en general, los molinos no convencionales requieren un menor costo de capital que la línea de molinos convencionales.
- Para definir el tipo de molienda (convencional / no convencional), es necesario comparar el consumo de energía global en kWh/ton de producto para ambos sistemas, teniendo en cuenta que los sistemas SAG consumen mayor energía, pero el costo de acero por reemplazo de bolas gastadas es menor.
- Tener en cuenta en la selección del equipo, que el costo de mantenimiento de una línea de molienda no convencional (SAG o AG), es menor que el de un circuito de molienda tradicional, debido a que el molino SAG no requiere de etapas de trituración secundaria y terciaria.
- En términos de producción, los molinos de bolas de gran diámetro son menos eficientes y su diseño y montaje es más complejo.





- Para obtener un volteo de carga más eficaz, es importante establecer la razón entre diámetro/largo de un molino SAG típico, para alcanzar mayor capacidad y altos rendimientos de potencia instalada por molino.
- Para el óptimo funcionamiento de un sistema de molienda, se requiere obtener el mayor rendimiento posible, definido por la máxima capacidad específica y el menor consumo de energía, sujeto a parámetros de eficiencia y restricciones de desgaste, costos de mantenimiento y mínima contaminación del producto final.
- Considerar en términos de capacidad y eficiencia la instalación de equipos no convencionales para acortar el proceso de trituración y molienda mediante el uso de molinos autógenos y semiautógenos, lo que constituye una alternativa de innovación reciente en algunas plantas de concentración de cobre.

#### **7.2.2.7 Componente 4. Localización de los equipos de trituración en la planta de beneficio y transformación**

##### **a. Alcance**

Identificar los espacios existentes o disponibles en el área del proyecto, para aprovechar la gravedad en la transferencia de los materiales.

##### **I. Información requerida**

- Planos topográficos actualizados del área del proyecto
- Planos de labores, equipos e infraestructura en superficie

##### **II. Actividades a desarrollar**

- Establecer las condiciones morfológicas y topográficas de los espacios disponibles, para instalar los equipos de conminución en pendientes que faciliten aprovechar la gravedad para la transferencia de los materiales a las etapas subsiguientes del beneficio.
- Evaluar las diferentes alternativas de ubicación de las trituradoras, pudiendo ubicar trituradoras del mismo tipo y de diferentes dimensiones.
- Identificar la menor distancia posible entre la planta de trituración y los frentes mineros activos de explotación, para reducir los costos de transporte del material a la planta.
- Considerar la ubicación de la planta de trituración en el interior de la mina subterránea, teniendo en cuenta criterios operativos, técnicos y ambientales.

### 7.2.3 Lineamiento No. 3: Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre

#### 7.2.3.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre





La definición de las variables que pueden influir en el proceso físico químico para la concentración óptima de los sulfuros de cobre es la principal información para establecer los reactivos y equipos necesarios en el proceso, que permitan bajo criterios de eficiencia y con el mayor rendimiento posible, recuperar los valores del mineral en un concentrado limpio.

La concentración es el proceso que genera el mayor consumo de agua dentro del beneficio del cobre, razón por la cual, la adecuada selección de reactivos y sus dosificaciones permitirá que se realice el uso racional de este recurso. El producto resultante de este proceso es un concentrado de cobre que debe cumplir con los porcentajes de humedad requeridos para su comercialización o para su transformación en las siguientes etapas, por lo cual se requieren procesos de espesamiento y filtración. En términos energéticos, la adecuada selección de equipos para el circuito de flotación será un factor determinante en el uso eficiente de este recurso.

El sobrante más importante del proceso corresponde a los relaves, los que constituyen la principal fuente de agua para reuso dentro del proceso productivo, ya que durante las operaciones de espesamiento y filtrado de concentrado y del espesamiento y filtrado de relaves se recupera la mayor cantidad de agua contenida en estos, así como otros reactivos asociados.

Dentro de las variables operacionales se deben considerar aquellos que permitan la deshidratación de relaves facilitando la optimización y reuso no solo de agua sino de relaves dentro de proyecto.



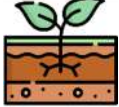
#### 7.2.3.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS

	X		X		X		
---	---	---	---	--	---	---	--

La adecuada definición de las variables del proceso de concentración garantiza el uso eficiente del recurso hídrico y la energía, así como la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, alineado el proyecto principalmente

a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.2.3.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	N. A	N. A
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	N. A	N. A

La definición de las variables operacionales, al ser una actividad de planificación y diseño, no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo.

### 7.2.3.4 Componente 1. Caracterización del mineral a concentrar

#### a. Alcance 1

Determinar el tipo de reactivos (colectores, espumantes, depresores, modificadores).

#### I. Información requerida

- Propiedades de la mena (mineralogía, caracterización química, naturaleza de la especie).
- Tamaño de partícula óptimo para la flotación del cobre.
- Efecto que tiene el pH en los reactivos.
- Potencial zeta (con el objetivo de analizar el comportamiento superficial del coloide).
- Propiedades hidrofílicas y aerofóbicas de cada especie mineral.

#### II. Actividades a desarrollar

¿Cómo caracterizar el material a concentrar?



Dado que todos los minerales en su composición son diferentes y los reactivos de flotación varían dependiendo de factores como textura, variabilidad del mineral, abundancia y asociaciones de sulfuros de hierro, interacciones de la ganga (por ejemplo, arcillas o carbonatos) y elementos mineralógicos penalizables (por ejemplo, arsénico, bismuto, etc.), entonces el objetivo principal de seleccionar los reactivos es recobrar los valores del mineral en un concentrado limpio y a bajo costo, para ello es necesario tener en cuenta los siguientes análisis:

- Análisis químico: espectroscopia por emisión de plasma con el fin de detectar tanto cualitativamente como cuantitativamente los elementos presentes en la roca.
- Microscopia óptica o electrónica: permite establecer la composición mineralógica, el grado de liberación y la textura.
- Microelectroforesis: análisis potencial zeta para comprender el comportamiento superficial de los coloides
- Pruebas de molienda: es importante realizar las pruebas a diferentes tipos de granulometría, ya que un tamaño muy grueso no flotaría, así como el mineral de interés y uno muy pequeño no se adherirían a las burbujas producidas.
- Pruebas de flotación: con estas pruebas se busca encontrar los reactivos óptimos y las dosificaciones adecuadas, dependiendo del pH. Debido a que en este paso hay muchas correlaciones empíricas, se busca una mezcla de colectores (cada uno tiene características de selectividad y afinidad), mezcla de espumantes (para darle estabilidad a la espuma), depresantes (para evitar algunos minerales no deseados en el concentrado) y modificadores (para estabilizar el pH de la solución)

## **b. Alcance 2**

Establecer el dimensionamiento de equipos.

## **I. Información requerida**

- Flujo de aire de entrada (efecto sobre el tamaño de burbuja y velocidad de desalojo).
- Caudal de entrada.
- Porcentaje de sólidos en la celda
- Tiempo de residencia
- Calidad del agua permitida
- Cantidad estimada de mineral tratado
- Índices metalúrgicos de calidad y cantidad



## II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo establezco las dimensiones?

Teniendo en cuenta las condiciones cinéticas del proceso para establecer la adecuada adhesión del mineral (superficie hidrofóbica) a la burbuja de aire. Adicionalmente se deben contemplar los flujos de entrada del aire y pulpa que resultan de las condiciones hidrodinámicas pertinentes para la estabilización del proceso en la celda.

- Seleccionar el sistema de aire (forzado o inducido).
- Simulación de procesos: con el uso de simuladores, como Modsim, se determinan los balances de masa, el rendimiento, la ley y la recuperación por bloque
- Pruebas de flotación: el análisis de celdas de columna busca encontrar la cinética de flotación.
- Volumen de las celdas (hay celdas desde 0.8 - 350 m<sup>3</sup>). Es muy importante la escala y su disposición en serie o en paralelo debido a que este diseño está relacionado directamente con la reducción de energía por unidad de volumen, menos área de construcción, reducción de costo de equipo por unidad de volumen y menor control en la automatización por menos número de instrumentos y controles requeridos.
- Realizar cálculos donde se determine la información correspondiente a la calidad del cobre en cada etapa de concentración y en la etapa global, también con la información de la cantidad proyectada a concentrar, donde se establece el escalamiento, dimensionamiento y selección de los equipos.
- Establecer el diseño de la celda (su geometría y partes)

### 7.2.3.5 Componente 2. Definir tipo de flotación y sus circuitos

#### a. Alcance 1

Seleccionar los elementos valiosos del mineral con una recuperación óptima.

#### I. Información requerida

- Características físicas de las celdas de flotación
- Determinar la composición química de la ganga, para conocer la concentración en la mezcla del mineral a recuperar
- Definir qué tipo de celdas utilizar de acuerdo al tipo de flotación seleccionada.

Dada la complejidad del proceso de flotación, éste no es posible desarrollarlo en una sola etapa, por lo que se debe implementar en múltiples etapas



interconectadas que forman un circuito, por lo que la eficiencia de separación dependerá de la configuración del circuito. En el circuito se debe analizar cada celda teniendo la información del porcentaje de recuperación y la ley. Generalmente las primeras celdas son las celdas primarias (Rougher), las que poseen la característica de fuerte flotabilidad, es decir alta recuperación, pero débil selectividad, esto es, baja ley. Les sigue las celdas de limpieza, donde hay baja recuperación, pero mayor selectividad, es decir alta ley (Schlesinger et. al.,2021)

- Porcentaje de recuperación.
- Ley del mineral.
- Razón de enriquecimiento del mineral.
- Porcentaje de rendimiento de concentración.
- Carga circundante.
- Diagrama de flujo del proceso.
- Alimentación del circuito de flotación.
- Evaluación económica de la operación unitaria.

## II. Actividades a desarrollar

- Modelación del proceso de flotación: se realiza una modelación rigurosa que contenga modelos micro (interacciones entre los parámetros físicos y químicos) y macroescala (proceso global relacionado con los parámetros operacionales). para describir la cinética de la reacción (Bustamante, 2020)
- Ajuste de reactivos dependiendo el tipo de flotación seleccionada en cada etapa de concentración.
- Calcular el índice de selectividad.
- Realizar la valoración de Instrumentación requerida en los bancos de celdas.
- Evaluar costos de inversión (CAPEX).

### b. Alcance 2

Definir el porcentaje de humedad requerido.

### I. Información requerida

Para entregar el concentrado, ya sea a la venta o para la siguiente etapa, se requiere que esté entre un 8 y un 10% de humedad, según (Codelco Educa, 2019b), por lo que se necesitan dos equipos, uno de espesamiento donde el porcentaje de sólido logrado en la descarga debe ser el máximo posible, y otro de filtración, donde disminuye la humedad residual

- Cantidad de alimentación al proceso.
- Porcentaje de sólidos.



- Densidad y viscosidad de la pulpa
- PH de entrada
- Espejo de agua clarificada
- Selección del floculante, coagulante y dosificaciones (seleccionando las cargas aniónicas o catiónica y su reología).
- Tiempos de retención y velocidad de agitación.
- Velocidad ascendente y sedimentación del líquido.
- Volumen de pulpa estimado programado.

## II. Actividades a desarrollar

- Seleccionar espesadores convencionales o de alta velocidad, basados en su área y requerimientos de producción de la planta.
- Seleccionar los filtros al vacío o presión, complementando los espesadores teniendo en cuenta la densidad de la torta. Las nuevas plantas utilizan generalmente las de presión con placas verticales y horizontales, (Sole et al., 2021).
- Definir por medio de pruebas de jarras el floculante, el coagulante, las dosificaciones, los tiempos de sedimentación y los rangos de pH de funcionamiento. En la industria, los floculantes más usados son los floculantes aniónicos de carga media con un pH de trabajo entre 6-8.
- Calcular el volumen del espesado, teniendo en cuenta el caudal de alimentación, la descarga del fondo, las velocidades de sedimentación y la densidad.
- Calcular el volumen de filtrado y caídas de presión teniendo en cuenta el área, la viscosidad, la concentración de sólidos en la pulpa y la resistencia del filtro.

### 7.2.4 Lineamiento No. 4: Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación del cobre

#### 7.2.4.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

##### a. Pirometalurgia

La definición de las variables operacionales para la selección de los procesos y los equipos requeridos en la fusión, conversión, refinación y electrorrefinación del cobre, son un factor determinante que permitirá que se haga un uso racional de la energía requerida para el funcionamiento de los hornos que serán empleados en la planta de transformación de los concentrados de mineral de cobre.





Los principales factores de funcionamiento en los hornos de fusión y los reactores de conversión relacionados con la gestión ambiental, corresponden al consumo de energía y el control de emisiones de partículas y gases. El proceso final de electrorrefinación en celdas electrolíticas requiere para su desarrollo energía eléctrica, ánodos y cátodos, solución de sulfato de cobre ácida, ácido sulfúrico y agua. La operación del circuito y los controles en cada uno de los factores técnicos hacen que el proceso no solo sea eficaz y eficiente para la recuperación del cobre, sino también para el uso eficiente de la energía y del recurso hídrico y la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo.

### b. Hidrometalurgia

En la hidrometalurgia, los principales procesos para la transformación del cobre son la lixiviación (la cual puede ser química o bacteriana), seguida de la extracción por solvente y por último la electroobtención. La definición de las variables operacionales para la selección de los procesos y los equipos requeridos permitirá que se use racionalmente el recurso hídrico.




Dentro de los requerimientos de recursos en el proceso, se cuentan: agua para diluir los agentes lixiviantes, soluciones ácidas, que favorecen el desarrollo de microorganismos, entre otros. La ubicación de las pilas lixiviantes debe considerar las condiciones del terreno y tener en cuenta todas las restricciones operacionales y/o ambientales. Se deben estimar los requerimientos eléctricos para el proceso, debido al alto consumo de energía (corriente) para las celdas. La lixiviación es el proceso que genera el mayor consumo de agua dentro del proceso de hidrometalurgia del cobre.

#### 7.2.4.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		
--	---	--	---	--	---	--	--

La adecuada definición de las variables de los procesos para la transformación de cobre repercute en el uso eficiente del recurso hídrico y de la energía y garantiza la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.2.4.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	N. A	N. A
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	N. A	N. A

La definición de información operacional al ser una actividad de planificación y diseño no genera impactos en los recursos agua, aire y/o suelo.

### 7.2.4.4 Componente 1. Identificar parámetros minero metalúrgicos para la fundición

#### a. Alcance

Determinar las variables operacionales para la selección de los procesos y equipos requeridos para la fusión, conversión, refinación y electrorrefinación.

#### I. Información requerida

Para el diseño de una planta de fundición de cobre se hace necesario determinar las características del mineral concentrado a procesar, dicha caracterización permite identificar los equipos a tener en cuenta en los procesos de fusión, conversión, refinación y electrorrefinación. Las variables operacionales para la identificación de procesos y equipos de fundición se fundamentan en la tecnología utilizada para el proceso de fundición, tradicionalmente se pueden usar dos tipos de hornos: el horno de reverbero y el convertidor modificado teniente (CMT).

#### II. Actividades a desarrollar

Las características del mineral concentrado a procesar se establecen mediante análisis químicos en laboratorio, determinando la cantidad de cobre, hierro, azufre, sílice y otros elementos que puedan afectar el proceso de fundición, así mismo se reconoce el porcentaje de humedad presente en el concentrado.



Dichos análisis se fundamentan en ensayos y pruebas de muestreo y preparación de muestras, análisis volumétrico, análisis instrumental y ensayos al fuego.

#### **7.2.4.5 Componente 2. Establecer las características de los equipos pirometalúrgicos**

##### **a. Alcance 1**

Selección de equipos para la fundición.

##### **I. Información requerida**

- Rendimiento del equipo de fundición
- Capacidad instalada para su eficiente funcionamiento
- Volumen máximo que puede contener el horno de fundición
- Tipos de hornos y capacidades para la refinación posterior del cobre blister
- Definir e implementar las etapas de conversión y refinación del cobre

##### **II. Actividades a desarrollar**

La selección de los equipos se fundamenta en identificar el tipo de hornos que se emplearán en la planta de transformación de los concentrados de mineral de cobre. Los hornos están diseñados para alcanzar las fases de fusión y conversión del metal hasta alcanzar purezas de 96%.

Los hornos de fusión y los reactores de conversión están determinados por factores de funcionamiento en aspectos tales como consumo de energía, capacidad de procesamiento, control de emisiones de partículas y gases, temperatura de transformación, conformación de los equipos, selección de la cubierta refractaria dentro de los hornos y otros factores de eficiencia en la operación relacionados con el sistema de alimentación y evacuación, la temperatura requerida para el proceso, la inyección de aire enriquecido, el tiempo mínimo de residencia del mineral en el horno, la disposición y ubicación de los equipos y la destreza de los operadores en la operación y control de los mismos.

En términos de desarrollo tecnológico, los hornos de fusión en baño mediante tecnología de soplado inferior y lateral se han convertido en los equipos más destacables de los últimos años, así mismo, las nuevas tecnologías de conversión se han enfocado en lograr procesos continuos, como lo muestran los hornos chinos y de lecho empacado. La tendencia en las tecnologías es a permitir procesos continuos, mayores tasas de reacción, menores pérdidas de cobre y un adecuado control de los gases producidos.



Para el caso de la fusión, la Comisión Chilena del Cobre (2015a) manifiesta que las distintas tecnologías que se ponen en práctica en Chile, se clasificaron según la ocurrencia del proceso, que puede ser por: 1. Calentamiento directo; 2. Suspensión en torre de reacción (Flash), o 3. Inyección en baño líquido.

**Fusión por calentamiento directo:** el representante de los hornos de fusión por calentamiento directo corresponde al horno de reverbero, en el que el calor necesario para el proceso de fusión se da por la combustión de hidrocarburos. Esta tecnología presenta deficiencias por su ineficiencia térmica y el bajo contenido de dióxido de azufre en los gases, siendo una tecnología en decrecimiento de implementación. (Cochilco, 2015a, p.5)

**Fusión en baño:** las tecnologías basadas en el principio de fusión en baño aprovechan la energía producto de las reacciones de oxidación que ocurren dentro del reactor, el origen de este tipo de procesos se da en la década de los 60 por la empresa Noranda en Canadá. Los reactores de fusión en baño de mayor relevancia por su uso a nivel mundial corresponden a la tecnología Teniente, Noranda, Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi.” (Cochilco, 2015a, p.5)

**Fusión por inyección en baño líquido (Flash):** en este caso, “las tecnologías desarrolladas se basan en la combustión de las partículas de concentrado en suspensión en altas torres de reacción, por sobre la zona de baño. Las principales tecnologías se dan en las versiones de Outotec (ex – Outokumpu) e INCO.” (Cochilco, 2015a, p.5)

De igual forma, la citada Comisión se refiere a los dos tipos de tecnologías para la conversión presentes en las fundiciones chilenas del cobre, clasificándolas en conversión discontinua y conversión continua.

**Conversión discontinua:** se basa en el hecho de que la conversión de la mata de cobre debe realizarse en distintas cargas, las cuáles deben esperar el término de una para seguir con la otra. En este caso se destaca principalmente el convertidor Peirce – Smith (CPS) y en menor magnitud la tecnología Hoboken. Otra tecnología denominada Top Blown rotatory converter (TBRC), que se basa en la inyección de aire y gases por medio de una lanza refrigerada, se encuentra limitada en su uso en la operación de Ronsskar (Suecia), para la fusión de concentrado de plomo y chatarra de cobre.

El convertidor Peirce – Smith se basa en la rotación del horno y una boca central que permite descargar la escoria y el cobre blíster producido. Por otro lado, el convertidor Hoboken corresponde a una variación del Peirce – Smith (Moskalyk y Alfantazi 2003), el cual minimiza las emisiones fugitivas por su estructura de sifón, no obstante, se ve limitado en su capacidad de incorporar carga fría. (Cochilco, 2015a, pp.5-6)

**Conversión continua:** La conversión continua se basa en el ingreso constante de mata de cobre y un sangrado continuo del cobre blíster, sin necesidad de realizar interrupciones en la operación, aparte de las labores de mantenimiento. En este



aspecto, se destacan las tecnologías de conversión flash y Mitsubishi, junto a los nuevos desarrollos de tecnología de conversión continua china (desarrollos en la fundición Jinfeng), los hornos Ausmelt C3 y de lecho empacado. (Cochilco, 2015a, p. 6)

## **b. Alcance 2**

Selección de equipos para la electrorrefinación.

### **I. Información requerida**

El paso final de la fundición del mineral de cobre sulfurado es la electrorrefinación, la que tiene por objetivo extraer los restos de oxígeno presentes en el cobre blíster, incrementando la pureza del mineral. El cobre blíster pasa por los hornos anódicos en los que también se inyecta gas natural con vapor de aire. Esta combinación reduce el nivel de oxígeno presente en el material fundido, logrando cátodos de 99,97% de pureza, (Codelco Educa, 2019).

Los equipos que se requieren para este proceso se enuncian a continuación: casa de celdas, ánodos, cátodos y componentes eléctricos. Las celdas de refinación electrolítica están hechas de concreto reforzado (en forma de bloques o de monolito), revestidas con plomo antimonial (de 3 a 6 % de Sb) o láminas de PVC blando. Las celdas están conectadas en serie para formar secciones. Cada serie, de 26 a 42 celdas, constituye una parte independiente que puede ser aislada eléctrica y químicamente para las operaciones de colocación y retiro de electrodos, limpieza de residuos y mantenimiento. Las secciones están conectadas eléctricamente para que la tensión total sea del orden de 100 a 250 V, dependiendo del equipo de rectificación CA/CD de la planta.

La electrorrefinación se lleva a cabo mediante el sistema múltiple (paralelo), en el que ánodos y cátodos están intercalados en un acomodo eléctrico en paralelo al interior de la celda electrolítica. Con este sistema, todos los ánodos están a un solo potencial eléctrico y todos los cátodos están en otro potencial más bajo. Cada ánodo está colocado entre dos cátodos, de manera que se disuelven electroquímicamente a velocidad similar. Las celdas están conectadas en serie para formar secciones.

El proceso electrolítico consiste en la disposición de un ánodo (plancha de cobre obtenido de la fundición) y un cátodo (placa muy delgada de metal) en las denominadas celdas electrolíticas, las cuales son enormes piscinas con una solución de ácido sulfúrico y agua, por las que se hace pasar corriente eléctrica. Esta acción hace que el cobre del ánodo se disuelva, produciendo cationes y electrones, los que se dirigen al cátodo y se adhieren a él. La operación de los hornos de refinación es cíclica (batch).



## II. Actividades a desarrollar

Para determinar los equipos en el proceso de electrorrefinación se debe realizar el diseño de las celdas electrolíticas, teniendo en cuenta factores técnicos como pureza del cátodo, producción, consumo de energía por toneladas de cátodo. Las variables más importantes que determinan estos parámetros son la calidad del ánodo (uniformidad en la forma y el peso), condiciones del electrolito (pureza, temperatura, velocidad de circulación), densidad de corriente del cátodo, el control del espaciamiento entre los electrodos y la prevención de cortos circuitos.

En el diseño del circuito de celdas electrolíticas se tiene en cuenta la cantidad de celdas a instalar en un sistema múltiple (paralelo), el potencial de energía eléctrica requerida para mantener la tensión total del orden de 100 a 250 V, el equipo de rectificación CA/CD de la planta, tipo de ánodos y cátodos, solución de sulfato de cobre acida. La operación del circuito y los controles en cada uno de los factores técnicos hacen que el proceso sea eficaz y eficiente para la recuperación del cobre blíster 99,99%.

### 7.2.4.6 Componente 3. Especificar la técnica de lixiviación o biolixiviación a usar

#### a. Alcance 1

Definir tipo de equipo.

#### I. Información requerida

Para efectuar la escogencia del equipo se debe determinar ¿qué tan rápido se necesita realizar la lixiviación?, es decir, el tiempo que debe permanecer el mineral para realizar el proceso y la cantidad de consumo de los agentes oxidantes. Estos datos se obtienen conociendo la cinética de la reacción y los análisis metalúrgicos, con el objetivo de definir el tamaño de partícula, concentrado, tiempo de tratamiento y el % de recuperación.

#### II. Actividades a desarrollar

¿Cómo definir el tipo de equipos?

- Caracterización del mineral (composición mineralógica y sus asociados).
- Geología (tipos de mineral, impurezas y morfología).
- Índices metalúrgicos (recuperación de cobre, consumo de reactivos, tiempo de lixiviación y tamaños óptimos).



- Costos de operación.
- Escala de operación.
- Duración del proyecto.
- Disponibilidad de áreas para el proceso.

La **Figura 8** muestra las tecnologías que se pueden aplicar para el cobre según el tipo y ley del mineral.

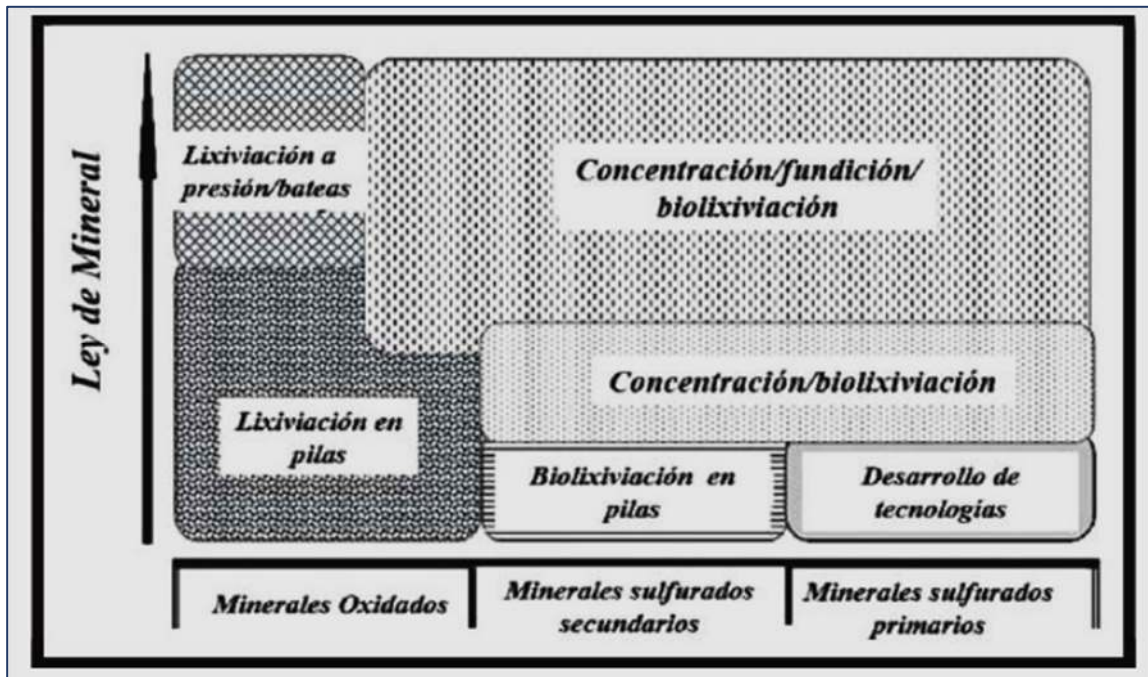


Figura 8. Tecnologías de lixiviación según el tipo y ley del mineral.  
Fuente: (Uceda Herrera, 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, el método de lixiviación más acogido en el mundo por sus características de bajo costo de capital y operacionales, además de una adecuada recuperación del cobre, es la lixiviación de pilas. En 2006, el 18% de la producción mundial de cobre fue a partir de lixiviación por pilas según datos de International (Copper study group, 2015).

## b. Alcance 2

Establecer las variables y parámetros operacionales del proceso.

### I. Información requerida

Las condiciones que se fijan para que se disuelva el cobre en el proceso de lixiviación son acidez, temperatura, presión, potencial oxidativo y composición de las soluciones.





## II. Actividades a desarrollar

¿Cómo establecer las variables y los parámetros?

- Calculando las leyes de cobre y leyes de las impurezas
- Pruebas de permeabilidad (calcular la porosidad y conductividad hidráulica saturada bajo carga)
- Determinando el potencial oxidativo del cobre: con los diagramas de Pourbaix se determina la actividad de los electrones en una reacción y se establecen las condiciones ideales de pH, temperatura y presión para que el cobre se pueda disolver. Para los óxidos el diagrama es una relación Cu-S-O-H<sub>2</sub>O. Este indica que el cobre se puede disolver en Cu<sup>2+</sup> mediante condiciones ácidas (pH menores a 5), mientras que en los sulfuros el diagrama es una relación Cu-Fe-S-O-H<sub>2</sub>O. Este indica que requiere ácido y un agente oxidante para romper la red mineral y liberar el Cu<sup>2+</sup> en la solución. Para los minerales refractarios como la calcopirita, se requieren altas temperaturas y presiones para que la lixiviación tenga lugar.

### 7.2.4.7 Componente 4. Establecer los agentes oxidantes y reductores para el proceso

#### a. Alcance 1

Obtener datos del porcentaje de extracción, consumo de reactivo, tiempos de lixiviación.

#### I. Información requerida

Para la producción específica de cobre se usan los siguientes agentes de lixiviación:

- Agua para diluir los agentes lixiviantes.
- Soluciones ácidas que favorecen la acidez en la dilución del mineral como el ácido sulfúrico.
- Soluciones difíciles de disolver, tales como agentes reductores (sulfato férrico), agentes oxidantes como el oxígeno y agentes biológicos como son los acidófilos mesófilos (bacterias Gram-negativas), los termoacidófilos moderados (Gram-positivos) y finalmente los termoacidófilos extremos (*Archaea*).
- Las características del mineral, las reservas y el valor potencial del yacimiento.
- La reacción de los agentes con los con los minerales de la ganga.
- Los costos del reactivo, tasa de recuperación y ciclo de lixiviación.



- El Contenido de azufre, carbonato, cloruro y otros contribuyentes

## II. Actividades a desarrollar

¿Cómo establecer los agentes lixiviantes?

Estos agentes se establecen teniendo en cuenta su solubilidad, costo, selectividad y corrosividad en el proceso, por lo que se realizan las siguientes pruebas de laboratorio para corroborar su funcionamiento:

- Pruebas metalúrgicas (pruebas de laboratorio de columnas de lixiviación unitaria).
- Pruebas biometalúrgicas (pruebas de laboratorio de columnas de biolixiviación).
- Determinar concentraciones de agente por tonelada tratada.

En la industria del cobre estos son los agentes más usados dependiendo el mineral:

**Tabla 5. Agente usado en la operación de lixiviación.**

Alimentación	Equipo	Condiciones (presión y temperatura) (°C/bar)	Lixivante	Oxidante
Óxidos de cobre	Pilas	25 °C/ 1,013 Bar	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	Ninguno
Sulfuros de cobre	Pilas	25 °C/ 1,013 Bar	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	Férrico o bacteriano
Concentrado de cobre	Tanques autoclaves	≥100°C/1-10 bar	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	Férrico o bacteriano y oxígeno

Fuente: ATG Ltda., (2022); adaptado de (Uceda Herrera, 2016, pág. 50).

### 7.2.4.8 Componente 5. Determinar variables críticas del proceso de biolixiviación

#### a. Alcance

Establecer los factores y condiciones limitantes que pueden afectar el proceso.

#### I. Información requerida

Como el proceso involucra la presencia de seres vivos, tiene una serie de componentes que afectan el rendimiento en la extracción del cobre, por lo que se necesita conocer los factores ambientales, biológicos y fisicoquímicos que afectan el desarrollo y crecimiento de las bacterias lixiviantes y poder tomar medidas para controlarlos.



## II. Actividades a desarrollar

¿Cómo se establecen los factores y condiciones limitantes?

**Tabla 6. Factores y condiciones limitantes.**

Parámetro	Descripción
Tipo de material	La eficiencia del proceso depende de la naturaleza del material mineral. Cuando el medio es alcalino es factible que formen precipitados que dificultan la percolación natural. La porosidad del material es fundamental para que este penetre en el mineral.
Aireación	Las bacterias de lixiviación de metales son aeróbicas y quimiolitotrófica en la naturaleza, la aireación se encarga del suministro tanto de O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> al sistema de lixiviación.
Irrigación	Sobre si el tipo de riego ha de ser continuo o discontinuo, hay diferentes tendencias, aunque se piensa generalmente que la irrigación discontinua favorece la disolución del metal.
Potencial Redox	El potencial redox de la solución es un indicador del metabolismo energético o la actividad de la bacteria en el proceso de biooxidación, debido a que es una medida de la tendencia de la solución a ser oxidada o reducida.
pH	El ajuste del valor de pH correcto es una condición necesaria para el crecimiento de las bacterias de lixiviación y es decisiva para la solubilización de los metales.
Temperatura	Los microorganismos se clasifican en términos de la gama de temperaturas en el que pueden sobrevivir: dentro de las temperaturas óptimas de 30-40 °C para mesófilos, en torno a 50°C para termófilos moderados y por encima de 65°C para termófilos extremos.
Densidad de pulpa	La biooxidación de sulfuros con densidades de pulpa mayores de 20%, en reactores de tanque agitado, no ha tenido buenos resultados (Rossi, 2001; Deveci, 2004). Esto se debe básicamente a que al aumentar la concentración de sólidos aumenta la fricción entre las partículas en el interior de la suspensión, lo que causa el daño celular
Sustrato de mineral	La composición mineralógica del sustrato es de importancia primordial en la biolixiviación. Un alto contenido de carbonato del material o de ganga, incrementará el pH en el líquido de lixiviación y la inhibición o supresión completa de la actividad bacteriana.
Otros factores	La oxidación del metal mediante microorganismos acidófilos puede ser inhibida por una variedad de factores tales como compuestos orgánicos, agentes de superficie activa, disolventes, o metales específicos. Algunos iones que se liberan a ciertas concentraciones son tóxicos para los microorganismos hierro-oxidantes, afectando su crecimiento y actividad. Las sales de potasio producen una fuerte inhibición en la oxidación de iones ferrosos a muy baja concentración.

Fuente: Adaptado de Ramírez Oscco, 2015, pp. 20-24



## 7.2.4.9 Componente 6. Definir la ubicación y área del proceso

### a. Alcance

Condiciones del terreno, teniendo en cuenta todas las restricciones operacionales y ambientales.

#### I. Información requerida

- Cartografía detallada de donde se ubique el sistema teniendo en cuenta todas las variables pertinentes como curvas de nivel, efluentes cercanos y vías para el traslado de masas.
- Cantidad estimada de mineral a lixiviar.
- Hidrogeología y dinámica de los suelos.
- Características del suelo.
- Geomorfología del terreno.
- Nivel freático.

#### II. Actividades a desarrollar

Para disponer de la información necesaria para seleccionar el área se debe tener en cuenta:

- La información de línea base obtenida en la construcción del documento para la licencia ambiental y el PTO.
- Levantamiento topográfico del terreno cada vez que se realice el procedimiento.
- Profundizar en los aspectos que no se encuentren específicos en los documentos citados.

## 7.2.4.10 Componente 7. Identificar variables y equipos en el proceso de separación sólido - líquido (SX)

### a. Alcance 1

Definir los reactivos y su dosificación para la extracción por solvente.

#### I. Información requerida

- Pruebas hidrometalúrgicas
- Fichas técnicas de los reactivos



## II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo definir los reactivos y su dosificación para la extracción por solvente?

1. Realizar pruebas hidrometalúrgicas con los reactivos (extractantes, diluyentes, modificadores y aceleradores) que serán utilizados en la solución orgánica para la extracción por solvente.

a) **Extractante:** especie que forma un orgánico complejo soluble con el ion. En las pruebas hidrometalúrgicas se puede determinar su rendimiento a través de indicadores como la constante de extracción, el coeficiente de distribución y separación o factor de selectividad.

b) **Diluyente:** disolvente orgánico que se utiliza para diluir el agente de extracción a un nivel adecuado para la extracción de metales y de la reextracción. Condicionado por factores como densidad, viscosidad y capacidad. Debe tener algunas características básicas como: capacidad de disolver el extractante y de mantenerlo en solución, tener baja viscosidad, densidad (0,75 g/ml a 0,85 g/ml) y buena estabilidad química, baja solubilidad en la fase acuosa, tener un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

c) **Modificador:** compuesto que se añade a fin de mejorar el rendimiento del sistema de extracción por solventes. En las pruebas hidrometalúrgicas se puede determinar su eficiencia evaluando la solubilidad del complejo de metal-extractante, separación de fases y estabilidad química de la solución.

d) **Aceleradores:** compuesto que se añade para aumentar la cinética de extracción. En las pruebas hidrometalúrgicas se puede determinar su eficiencia evaluando la velocidad de aceleración de la reacción.

2. A partir de las fichas técnicas del reactivo se debe establecer que estos no absorban el ácido sulfúrico, tengan selectividad por el cobre y no por otros metales como hierro (Fe) y manganeso (Mn), elementos perjudiciales en la etapa de electroobtención. También deben ser no inflamables, tóxicos o cancerígenos, ser insolubles en la fase acuosa y cumplir con los requerimientos de concentración mínima.

#### b. Alcance 2

Conocer el número de etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado.



## I. Información requerida

- Curvas de equilibrio para la extracción y reextracción.

## II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo conocer el número de etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado?

Realizar simulaciones con datos experimentales para construir las curvas de distribución o isotermas que se obtienen al agitar la fase acuosa en contacto con la fase orgánica a diferentes razones O/A, hasta que se establezca el equilibrio químico.

Una vez realizado el análisis químico de ambas fases, se grafican las concentraciones de cobre, fase orgánica vs las concentraciones en la fase acuosa, para la etapa de extracción y concentración de cobre; o la fase acuosa vs concentración de cobre de la fase orgánica, para la etapa de reextracción.

- Las **isotermas de extracción** permiten establecer condiciones de equilibrio según el grado de mezclado y predicen la mejor extracción o reextracción según sea el caso (curvas de equilibrio para la extracción y reextracción).
- La **razón O/A externa** indica la razón de flujos de alimentación orgánico/acuoso al equipo mezclador-decantador.
- La **razón O/A interna** indica la razón de flujos existentes dentro del equipo mezclador-decantador, considerando los reciclos en el sistema. Esta razón gobierna la continuidad de fase necesaria en la operación.

## c. Alcance 3

Definir los equipos para la operación de extracción por solvente

## I. Información requerida

- Diseños de la cámara primaria y secundaria
- Etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado.

## II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo definir los equipos para la operación de extracción por solvente?



A partir de los diseños de las cámaras primaria y secundaria, basado en los tiempos de contacto, caudales de entrada del PLS y etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado, se pueden definir la configuración y criterios de diseño de los mezcladores sedimentadores del sistema de extracción por solvente.

**a) Criterios de diseño del mezclador:** se debe conocer la transferencia entre la fase orgánica y la fase acuosa, tiempos de residencia y cinética teórica del proceso, para seleccionar la forma del mezclador (cilíndrico, paralelepípedo) y sus dimensiones, buscando la mayor eficiencia posible

**b) Criterios de diseño del sedimentador:** se debe conocer la gravedad específica de la fase orgánica y la fase acuosa, datos de flujo/razón de alimentación, velocidad de solución y la banda de dispersión que indica la fase dispersa del sistema.

#### **d. Alcance 4**

Definir el equilibrio de la concentración del cobre.

##### **I. Información requerida**

- Equilibrio del electrolito de cobre

##### **II. Actividades a desarrollar**

A través de análisis químicos de laboratorio determinar el equilibrio del electrolito de Cu e identificar las curvas de equilibrio de la concentración del cobre.

#### **e. Alcance 5**

Definir el equilibrio de la concentración del cobre.

##### **I. Información requerida**

- Equilibrio del electrolito de cobre

##### **II. Actividades a desarrollar**

A través de análisis químicos de laboratorio determinar el equilibrio del electrolito de Cu e identificar las curvas de equilibrio de la concentración del cobre.





## 7.2.4.11 Componente 8. Definir variables necesarias para la remoción de impurezas y recuperación mediante electroobtención

### a. Alcance 1

Determinar las condiciones y características eléctricas del proceso.

#### I. Información requerida

- Estimar los requerimientos eléctricos para el proceso, debido al alto consumo de corriente para las celdas.
- Establecer la calidad de la corriente continua para optimizar el proceso.
- Definir las características de las conexiones eléctricas para disminuir trayectos

#### II. Actividades a desarrollar

- Calcular la cantidad de voltaje en el sistema, teniendo en cuenta las pérdidas de corriente.
- Usar equipos rectificadores de corriente para mantener constante el flujo eléctrico como los transfo-rectificadores tristorizados.
- Disminuir los trayectos de corriente continua y alta tensión de los rectificadores a los bancos de celdas electrolíticas, minimizando las posibles interferencias en la distribución de la corriente.
- Definir el tipo de conexiones entre las celdas, que permitan asegurar la misma corriente en cada electrodo y por ende la misma densidad de corriente. La más usada en la mayoría de las instalaciones es la barra conductora de cobre de sección rectangular.

### b. Alcance 2

Diseñar y definir materiales de las celdas electrolíticas.

#### I. Información requerida

- Tipo de ánodo.
- Tipo de cátodos.
- Materiales para la construcción de la celda en medio acuoso.
- Características de las celdas, ánodos y cátodos.



## II. Actividades a desarrollar

- Seleccionar el ánodo que tenga resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas y cantidad mínima de impurezas de metales pesados en el lodo de la celda. Los ánodos más usados por la industria son las aleaciones de plomo, calcio y estaño con material aislante en los bordes. La desventaja de esta lámina es que al desgastarse con el paso del tiempo (6-9 años), se contamina la solución con óxidos de plomo. Otro ánodo usado en la industria es el de titanio con un revestimiento de iridio y rutenio, cuyas ventajas son la disminución del operador con metales pesados, menos consumo de energía, el tamaño de burbuja generado por el ánodo es más pequeño y reduce los requisitos de la nube ácida, pero el costo es alto por el contenido de minerales preciosos.
- Seleccionar el cátodo que tenga conductividad alta, soldabilidad a las capas de cobre y alta resistencia a la corrosión. Los cátodos más usados en la industria son los cátodos en blanco de acero inoxidable.
- El material de construcción de las celdas debe tener resistencia química, térmica y eléctrica. Los materiales para la construcción más comunes usados son los cloruros de polivinilo, hormigones de polímero y aceros inoxidables especiales.
- Definir los espacios entre los cátodos y el ánodo para generar la optimización entre el número de platos y el adecuado recubrimiento del cátodo. La separación típica está entre 45-50 mm.



### 7.3 LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA EL BENEFICIO DEL MINERAL DE COBRE

*El proceso de beneficio y transformación del cobre está relacionado con el yacimiento en que se encuentre el mineral, ya sea de predominancia de (sulfuros y/o óxidos. Para los primeros se implementan procesos en medio pirometalúrgico para alcanzar el producto final requerido, cobre Blíster y para los segundos se requiere utilizar el medio hidrometalúrgico, donde se obtiene una solución diluida de cobre entre 3-10g/l Cu mediante procesos de lixiviación y electrodeposición en ánodos y cátodos.*

#### 7.3.1 Lineamiento No. 1. Trituración del mineral

##### 7.3.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

Para desarrollar los procesos de trituración se debe tener en cuenta que el tamaño del material alimentado permita mantener la eficiencia de la trituradora, garantizando el uso racional de la energía.

La generación de material particulado en el proceso de trituración, así como el incremento en los niveles de presión sonora, son impactos que deben ser controlados por medio de medidas de manejo tales como humectación del material y aspersion en los equipos de trituración, para de esa manera controlar la emisión de material particulado, así como aislamiento de los equipos o encauchetado de las partes que generen mayor incremento del ruido, para garantizar la calidad ambiental y el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.




##### 7.3.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

			X		X		
--	--	--	---	--	---	--	--

Un equipo de trituración con uso eficiente y racional del recurso hídrico y de la energía y que garantice la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.



### 7.3.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 <b>Hídrico</b>	Agua residual del proceso de humectación del material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>• De no ser posible su reuso, debe realizarse el vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> </ul>
 <b>Atmosférico</b>	Material particulado y polvo por la trituración del material	Control de material particulado con humectación del material y/o aspersión garantizando que los niveles de material particulado cumplan con la normatividad ambiental vigente.
 <b>Suelo</b>	Residuos metálicos (varillas, residuos de voladura, entre otros) asociados al proceso de explotación que se encuentran en el material proveniente de la mina y que generan su contaminación.  Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos metálicos.</li> <li>• Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje, se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>

### 7.3.1.4 Componente 1. Trituración primaria o gruesa

#### a. Alcance

Lograr establecer la tasa de reducción requerida.

#### I. Información requerida

- Tamaño del material de alimentación correspondiente a roca volada.
- Tamaño del producto de descarga.
- Tasa de reducción en la etapa de trituración primaria.



## II. Actividades a desarrollar

a) Establecer la granulometría del producto de salida, calculando la tasa de reducción del equipo de trituración, acorde a los procesos subsiguientes de beneficio, ya sea para producir material grueso para lixiviar óxidos o material fino para concentrar minerales de sulfuros en celdas de flotación.

b) El contenido de sobre-tamaños y finos resta eficiencia a la trituradora, por tal razón es necesario tamizarlos o clasificarlos antes de alimentar la tolva, para aumentar la capacidad de las máquinas.

c) Ajustar la abertura de alimentación del equipo de trituración, de acuerdo con el tamaño del material recibido de la roca volada de la mina, con el objeto de establecer la reducción del producto de salida requerido en esta etapa.

d) Determinar la abertura de alimentación para optimizar mejor retorno sobre la inversión cuando la trituradora primaria es una trituradora de mandíbulas, ya que las necesidades de perforación y voladura son menores porque la trituradora puede aceptar bloques de rocas más grandes (1.5 metros max.).

### 7.3.1.5 Componente 2. Trituración fina

#### a. Alcance

Determinar el número de etapas de trituración del material.

#### I. Información requerida

- Volumen de carga.
- Abrasividad del material a triturar.
- Triturabilidad del material.
- Curva de granulometría deseada.
- Grado de reducción de la trituradora.

#### II. Actividades a desarrollar

a) Seleccionar el equipo de trituración que permita mayor reducción del mineral a procesar. Por ejemplo, trituradoras de cono y de impactos.

b) Tener en cuenta los criterios de costo-beneficio relacionados entre las trituradoras de cono que constituyen generalmente una inversión más alta, que las trituradoras de impactos. Sin embargo, cuando se usa de forma correcta, la trituradora de cono ofrece costos de operación más bajos que una trituradora convencional de impactos, por lo tanto, si se tritura roca dura y abrasiva, es recomendable instalar trituradoras de cono en la etapa final de trituración fina.

c) Todas las trituradoras tienen una tasa de reducción limitada, lo que significa que la reducción de tamaño se hace por etapas. El número de etapas de trituración fina depende del tamaño de alimentación y del producto requerido y de la eficiencia del equipo para reducir el material a la granulometría deseada.

### 7.3.2 Lineamiento No. 2. Molienda del mineral





#### 7.3.2.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

Para desarrollar el proceso de molienda se debe tener en cuenta que el tonelaje del mineral recibido por el molino, proveniente de la sección de trituración, cumpla con la reducción adecuada para lograr el tiempo óptimo de permanencia del mineral dentro del molino, garantizando la eficiencia del proceso y el uso racional de la energía.

En términos del recurso agua en el proceso de molienda, se debe garantizar el consumo mínimo, logrando la mayor eficiencia del proceso sin afectar la calidad de la pulpa requerida para la flotación. Se debe tanto evitar el exceso de agua, porque genera que la carga salga rápidamente, como la deficiencia en su volumen, ya que la carga avanzaría lentamente, propiciando que el barro se vuelva muy espeso y no se produzca una buena molienda.




La generación de material particulado en el proceso, así como el incremento en los niveles de presión sonora, son impactos que deben ser controlados por medio de medidas de manejo tales como aspersion para controlar la emisión en los equipos de molienda, así como controlar correctamente el sonido de las barras o bolas del molino para que no generen mayor incremento del ruido, garantizando la calidad ambiental y el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

#### 7.3.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		
---	---	---	---	--	---	---	--

Un equipo de molienda con uso eficiente y racional del recurso hídrico y de la energía y que garantice la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.3.2.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 <b>Hídrico</b>	Agua residual del proceso para generar la pulpa homogénea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>• De no ser posible su reúso, debe realizarse el vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> </ul>
 <b>Atmosférico</b>	Material particulado y polvo por la molienda del material	Control de material particulado con humectación del material y/o aspersión, garantizando que los niveles de material particulado cumplan con la normatividad ambiental vigente.
 <b>Suelo</b>	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos</li> <li>• Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje, se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>

### 7.3.2.4 Componente 1. Ajuste de variables operacionales para la molienda

#### a. Alcance

Reducir el material al tamaño óptimo, para dar paso a la siguiente etapa de beneficio del mineral.

#### I. Información requerida

- Velocidad y tamaño del molino
- Tamaño del cuerpo moledor
- Diseño de los revestimientos del molino
- Cambios en las características del mineral
- Distribución de tamaños del producto del molino
- Volumen de carga moledora y su distribución de tamaño
- Eficiencia de la clasificación





## II. Actividades a desarrollar

Tener presente que en la siguiente etapa de flotación por espumas, es muy importante que todo el mineral a ser flotado tiene que ser reducido en su tamaño hasta tal punto que cada partícula represente una sola especie mineralógica (liberado) y su tamaño tiene que ser apropiado para que las burbujas de aire las puedan llevar hasta la superficie de las celdas.

- Establecer la carga del mineral, el suministro de agua, la carga de bolas o barras, las condiciones de blindaje, los tiempos de molienda y reducir y controlar correctamente el sonido de las barras o bolas, la densidad de la pulpa y el consumo de energía
- Garantizar que el tonelaje de mineral recibido por el molino de la sección de trituración, cumpla con la reducción de tamaño óptima requerida del mineral, para que el molino optimice su operación.
- Asegurar que la carga del molino sea constante, reciba los volúmenes máximos permisibles y el peso sea uniforme, con el fin de conservar la capacidad de molienda y evitar sobrecargas o desgaste inútiles de bolas y chaquetas del equipo.
- Instalar una tolva de finos de diseño apropiado para reducir las variaciones en el tamaño de alimentación del molino y reducir la segregación de partículas finas y gruesas, ayudando a fluir el mineral de las tolvas.
- Verificar la densidad de la pulpa hasta que se regularice y evitar el exceso de agua, pues disminuye el tiempo de permanencia del mineral en el interior del molino, haciendo que la carga salga rápidamente y con granulometría gruesa. Cuando la cantidad de agua es deficiente, la carga avanza lentamente y el barro se vuelve muy espeso y amortigua el golpe entre las bolas, impidiendo que se produzca una buena molienda.
- Verificar que el molino siempre mantenga su carga normal de medios moledores. Cuando el molino tiene exceso de bolas, disminuye su capacidad, ya que estas ocupan el espacio para la carga. Cuando la carga está por debajo del límite normal, se pierde capacidad moledora y se dificulta llevar el mineral a la granulometría deseada.
- Determinar el tiempo óptimo de permanencia del mineral dentro del molino para establecer el grado de finura de las partículas liberadas.
- Controlar el tamaño de partícula por medio de las baterías de los hidrociclones que garanticen la homogenización del mineral de salida.

### 7.3.3 Lineamiento No. 3. Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado

#### 7.3.3.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.





La concentración es el proceso que genera el mayor consumo de agua dentro del beneficio del cobre, razón por la cual se debe garantizar que se realice un uso racional de este recurso. Asimismo, el proceso de concentración representa la principal fuente de agua para reúso dentro del proceso productivo, ya que durante las operaciones de espesamiento y filtrado de concentrado y del espesamiento y filtrado de relaves, se recupera la mayor cantidad de agua contenida en estos, la cual puede ser reincorporada al proceso, cumpliendo con la calidad requerida.

Los relaves de proceso, es decir minerales sin valores, pueden contener componentes sulfurados tales como pirita, razón por la cual deben tener un manejo especial debido a que es un componente que tiene potencial de generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM). Se pueden contemplar procesos de tratamiento tales como flotación de pirita, garantizando la reducción de humedad. El agua separada de la pirita debe ser tratada antes de su descarga a un cuerpo de agua superficial. Los relaves filtrados se disponen en depósitos de pirita, con las respectivas medidas de manejo, tales como encapsulado de los depósitos con polietileno de alta densidad, para evitar la generación de DAM.

Los relaves de proceso considerados inertes, es decir sin potencial de generación de DAM, pueden ser enviados a las etapas de espesamiento y posterior filtrado para su disposición en depósitos de relaves filtrados y/o su reúso como relleno detrítico cementado en el retrolleado de la mina.

Se deben garantizar las concentraciones de reactivos dosificados, controlando la preparación y calidad del reactivo, verificando las fechas de vencimiento, concentraciones estipuladas y demás aspectos que permitan el desarrollo eficiente de la flotación y por ende un consumo eficiente de la energía requerida en las celdas de flotación y demás procesos de la concentración. De ser posible y siempre y cuando la calidad sea la necesaria, se debe evaluar la posibilidad de reúso de reactivos.




#### 7.3.3.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		
---	---	---	---	--	---	---	--



Un proceso de concentración con uso eficiente y racional del recurso hídrico y de la energía, que garantice la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.3.3.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Agua residual del espesamiento y filtrado del concentrado y de relaves deshidratados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>• De no ser posible su reúso, debe realizarse el vertimiento, garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> </ul>
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje, se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul> </li> </ul>
	Relaves filtrados	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización, por ejemplo relaves filtrados para procesos de retrolleado de la mina.</li> <li>▪ Identificar materiales dispuestos en depósitos de relaves con potencial de recuperación y/o aprovechamiento (biolixiviación de relaves).</li> </ul>

### 7.3.3.4 Componente 1. Acondicionamiento del material a partir de las características minero-metalúrgicas del mineral

#### a. Alcance

Obtener mayor eficiencia y rendimiento del proceso de flotación.

#### I. Información requerida

- Caudal másico de la entrada a la flotación
- Perfil granulométrico



- Cantidad de dosificación del colector y el espumante
- pH de la solución
- Medición de la ley de cobre

## II. Actividades a desarrollar

Determinar la cantidad de reactivos que se incorporan en esta etapa, entre la molienda y la flotación, con el propósito de darle el tiempo necesario de contacto con el mineral y que se modifiquen las partículas superficiales del cobre, además asegurarse que la mezcla sea homogénea antes de entrar en las celdas de flotación.

- Caudal: se debe tener en cuenta la cantidad de toneladas por hora que entran para realizar la dosificación adecuada y tengan una separación eficiente.
- Perfil granulométrico: control que el tamaño de partícula esté en promedio en el rango establecido de liberación, que generalmente es menor de 100  $\mu\text{m}$ .

### 7.3.3.5 Componente 2. Funcionamiento de los reactivos en el proceso de concentración

#### a. Alcance

Verificar la condición de flotabilidad con la adecuada dosificación de los reactivos en el proceso de recuperación del mineral.

## I. Información requerida

- Ley de cobre en la entrada y la salida del proceso
- Porcentaje de sólidos
- pH
- Preparación de los reactivos
- Condiciones del agua (dureza)
- Altura de la columna de espuma

## II. Actividades a desarrollar

- Con los datos de concentración y sólidos obtenidos, verificar que esté dentro del rango de concentración esperado del cobre. Si las concentraciones son menores, verificar los caudales de entrada y valores de ley para evaluar la modificación de dosificaciones de los reactivos y lograr la mayor cantidad de recuperación de cobre.
- pH: se debe controlar el pH antes de entrar a las celdas, debido a que es una variable que influye en el proceso de selección. Dependiendo de la mezcla de colectores seleccionados, el PH debe estar en un rango entre 8.5 - 10.



- Verificar la concentración de preparación de los reactivos.
- Controlar la calidad de los reactivos, realizar un adecuado almacenamiento y verificar su fecha de vencimiento.
- Asegurarse que no hay ninguna interferencia con los reactivos, preparándolos con agua potable y con un sistema de agitación mecánica. No es recomendable por agitación con aire porque puede afectar el funcionamiento de los colectores.
- Medir la altura de la espuma y el tamaño de la burbuja para que estén dentro de los rangos estimados de funcionamiento, por medio de los sistemas instrumentales de visualización de la espuma que evalúan el tamaño y altura óptima para realizar el proceso de selección.



## 7.4 LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

*Reúne las acciones a desarrollar durante el proceso pirometalúrgico para la transformación del cobre, considerando las fases consecutivas de fusión, conversión y pirorrefinación. También se incluye el proceso de electrorrefinación, permitiendo obtener cobre de una pureza del 99,99%.*

### 7.4.1 Lineamiento No. 1. Desarrollo del proceso de fundición

#### 7.4.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

Como lo indica la Comisión Chilena del Cobre, la pirometalurgia tiene asociada una serie de dificultades en la generación de gases como SO<sub>2</sub> y arsénico, alto consumo de energía y difícil manejo de sub-productos, tales como:

- a) **Generación de SO<sub>2</sub>:** se puede producir ácido cuando las concentraciones de cobre son altas, además, su transporte es caro y tiene altas restricciones de carácter ambiental.
- b) **Generación de Arsénico:** presente en algunos minerales de cobre, altamente tóxico y liberado al aire en el proceso de pirometalurgia. Sus emisiones también están restringidas.
- c) **Generación de otros gases:** al igual que el SO<sub>2</sub> y el arsénico, en el proceso pirometalúrgico se generan otros gases tóxicos para el ambiente, los cuales deben ser captados y tratados posteriormente.
- d) **Manejo de productos:** se requiere transferir productos como eje y escoria entre los diversos hornos, lo que puede resultar complejo, ya que es difícil controlar las emisiones de gases como SO<sub>2</sub> durante el trayecto.
- e) **Consumo de energía:** dadas las altas temperaturas de los procesos, alrededor de los 1250°C, la demanda de energía es bastante alta (el proceso de fundición utiliza 2.523 MJ por tonelada de mineral procesado, versus el proceso de lixiviación que utiliza 39 MJ por tonelada de mineral procesado).
- f) **Control de emisión de polvo del proceso:** la emisión de polvo complica el manejo de los gases en los hornos, lo que implica equipos recuperadores de mayor costo y volumen. (COCHILCO, 2017, P. 8)

En el proceso de secado de materiales y debido a que la temperatura de operación del secador es de aproximadamente 180 °C, no se generará emisión de SO<sub>2</sub> al ambiente, ya que el azufre solo reacciona con el oxígeno a una temperatura superior a los 300 °C. En algunos casos puntuales, el grado de humedad del concentrado a tratar se convierte en un parámetro importante, como en la alimentación de los procesos de fusión flash, en los que el concentrado es transportado suspendido en aire enriquecido o en oxígeno. (Codelco Educa, 2019)

El proceso de fusión de concentrados tiene un importante consumo energético asociado al uso de combustibles. El nivel de consumo varía en función



de cada línea tecnológica, pudiendo ir de un valor cercano a los 400 kWh por tonelada de cátodo de cobre, a sobrepasar los 7.000 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Asimismo, el consumo asociado al uso de electricidad, cuyo nivel de consumo es menor, varía entre los 60 kWh y 150 kWh por tonelada de cátodo de cobre. (Ministerio de Energía, s.f.)

En el proceso de fusión se generan escorias como subproductos y en términos de calidad de aire, en el proceso de fusión, las canaletas que conducen tanto la escoria como el metal blanco se encuentran totalmente confinadas, de tal forma que los gases y vapores emanados por la extracción o sangrado de los productos (metal blanco y escoria), sean captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al horno de fusión). Luego, los gases y vapores son neutralizados y emitidos a la atmósfera.

En el proceso de conversión, el cual se lleva a cabo mediante hornos que trabajan a temperaturas que oscilan entre los 1.150°C y los 1.250°C, el consumo energético atribuible al uso de combustible varía entre 70 y 160 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Por otra parte, en este proceso también se emplea la energía eléctrica, cuyo nivel de consumo varía dentro del rango de los 60 y 155 kWh. (Ministerio de Energía, s.f.)

En el proceso de conversión, la limpieza de la escoria que se encuentra en el cobre se realiza por medio de un Horno Eléctrico de Limpieza de Escoria (en adelante HELE). Los gases generados en el HELE son captados y conducidos a un incinerador que permite asegurar la quema total del carbón remanente no utilizado. Posteriormente, son mezclados con aire del sistema de ventilación del horno y con los gases secundarios de proceso. Esta mezcla es enfriada y conducida a un sistema de limpieza que permite la recuperación de material particulado. Los gases además de limpiados son neutralizados previo a su emisión a la atmósfera. (Codelco Educa, 2019)

El proceso de pirorrefinación, el cual se lleva a cabo en hornos anódicos del tipo basculantes o del tipo lecho empacado, se caracteriza por tener un consumo energético atribuible fundamentalmente al uso de combustible, cuyo nivel de consumo puede acercarse a los 300 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Asimismo, para este proceso se emplea energía eléctrica, cuyo nivel de consumo puede ser del orden de los 30 kWh por tonelada de cátodo de cobre. Cabe señalar que estos niveles de consumo son de carácter orientativo y no corresponden necesariamente a valores representativos. (Ministerio de Energía, s.f.)

El proceso cuenta con plantas de limpieza de gases, cuyo objetivo es acondicionar los gases metalúrgicos primarios para su utilización como insumo en





la producción de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Los gases emitidos por el horno de fusión están compuestos principalmente por SO<sub>2</sub>, humo, vapores metálicos y partículas de cobre arrastradas. Los gases provenientes del horno de conversión están compuestos fundamentalmente de SO<sub>2</sub> y material particulado. Ambos gases primarios, luego de pasar por los respectivos precipitadores electrostáticos, se juntan en una cámara de mezcla común desde donde son conducidos a las plantas de limpieza de gases (Codelco Educa, 2019, p.).

El proceso de producción de ácido sulfúrico se lleva a cabo en tres fases: purificación de gases, oxidación catalítica de SO<sub>2</sub>/SO<sub>3</sub> y absorción. La etapa de purificación o limpieza de gases tiene por objetivo acondicionar el gas, retirando todos aquellos compuestos cuya presencia pueda significar una merma en la eficiencia de producción de ácido sulfúrico o un daño al catalizador. Para ello, se contará con una torre de lavado que permitirá el enfriamiento y limpieza de sólidos y humos metálicos arrastrados; una sección de precipitadores de neblina húmeda y una torre de secado, donde son mezclados con aire de dilución hasta alcanzar un contenido medio de 14% de SO<sub>2</sub>, apto para ser enviado a la sección de contacto u oxidación. (Codelco Educa, 2019)



El proceso de limpieza de gases genera un residuo líquido, que contendrá la totalidad del arsénico y trazas de otros elementos metálicos volatilizados en la fundición y presentes en los gases sometidos a tratamiento. Este residuo líquido será conducido a la Planta de Tratamiento Integral de Efluentes Industriales (Codelco Educa, 2019, p.)

#### 7.4.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		X
--	---	--	---	--	---	--	---

Un proceso de fundición con uso eficiente y racional del recurso hídrico y de la energía y que garantice la prevención de impactos al componente atmosférico y al suelo, permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante, al ODS 12. Producción y consumo responsables y al ODS 13. Acción por el clima.

### 7.4.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Vapor de agua	Reúso de vapor saturado proveniente de las calderas de recuperación de calor de los gases generados en los respectivos hornos de fusión y conversión
 Atmosférico	Partículas de cobre arrastradas en suspensión	Los gases generados por la extracción (metal blanco y escoria), son captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al horno de fusión)
	Gases metalúrgicos primarios (SO <sub>2</sub> , humo, vapores metálicos y material particulado)	Recuperación de gases primarios en plantas de limpieza de gases para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
	Gases de combustión/ Polvos de fundición	Emisión de gases cumpliendo con la normatividad ambiental de calidad de aire vigente y a los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire.
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos</li> <li>• Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje, se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>
	Mata de cobre	Reúso dentro del proceso
	Escoria	<p>Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización. Ejemplo, fusión secundaria de escoria</p> <p>Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante reciclaje. Ejemplo, como sustituto parcial del cemento hidráulico, en gravilla para líneas de ferrocarriles, como árido en mezclas asfálticas de obras civiles, entre otros.</p>

### 7.4.1.4 Componente 1. Minerales presentes en el concentrado

#### a. Alcance

Identificar y clasificar los minerales que afectan el proceso pirometalúrgico.



## **I. Información requerida**

Para el correcto funcionamiento de la planta de beneficio y transformación, es indispensable conocer el tipo de material que se procesará, permitiendo identificar los minerales presentes en cada uno de los procesos que la componen. En el proceso de fundición es posible determinar el potencial de formaciones químicas que ocurrirán y el tipo de proceso subsiguiente a implementar.

## **II. Actividades a desarrollar**

El mineral procedente de la etapa de concentración es llevado a depósitos o patios de almacenamiento, donde llega con características propias de la concentración realizada, con una variedad de minerales de compuestos de cobre, hierro, azufre, sílice, arsénico y otros minerales susceptibles de ser beneficiados y transformados en favor de la rentabilidad del proyecto, desde allí se realizan muestreos que determinan las cantidades presentes de estos, así como la humedad del mineral concentrado.

El muestreo debe ser representativo para el mineral a procesar, lo cual se logra mezclando y homogenizando las procedencias con características definidas para alcanzar las condiciones mínimas requeridas por la planta. Las muestras son llevadas a laboratorio para determinar las cantidades y tipo de minerales, al igual que la humedad presente.

### **7.4.1.5 Componente 2. Contenido de humedad del concentrado**

#### **a. Alcance**

Reducir la humedad del mineral a menos del 1%.

## **I. Información requerida**

La humedad original de los concentrados, que oscila entre 6% y 8%, se reduce a niveles que van entre 0,2% y 0,3%. En algunos casos de procesos de fusión, el grado de humedad del concentrado a tratar se convierte en un parámetro importante, como sucede en la alimentación de los procesos de fusión flash, así mismo en los procedimientos Outokumpu e INCO consideran una etapa de secado de concentrado en un secador rotatorio previo a su tratamiento. Outokumpu y el Convertidor Teniente en particular, necesitan grados de humedad inferiores al 0,2%.

## **II. Actividades a desarrollar**

Después de la homogenización del material concentrado de minerales de cobre, el cual viene con un contenido de humedad que varía entre 6% a 8%,



proveniente de distintas fuentes de abastecimiento (propias del proceso de beneficio y concentración y/o suministradas por otras plantas de concentración), el secado se logra aplicando al concentrado húmedo proveniente de la zona de mezcla, temperaturas desde 180°C hasta 300°C, para ello es almacenado en tolvas desde donde ingresa a las líneas de secado de cada equipo de fusión que cuenta con secadores calefaccionados con vapor de agua.

El concentrado va reduciendo sus niveles de humedad a medida que avanza dentro un tambor metálico. En el interior circula vapor a temperatura de 180°C, por un serpentín que permite la transferencia de calor por radiación y convección (Codelco Educa, 2019, p.).

#### 7.4.1.6 Componente 3. Fusión mediante el uso de hornos

##### a. Alcance

Separación de los óxidos (escoria) de los sulfuros de cobre - **cobre blanco (74-76%)**.

##### I. Información requerida

Esta etapa de la fundición corresponde a la fusión del mineral seco proveniente de la etapa de concentración, se realiza en hornos a temperatura de 1200°C cuyo fin es la separación de los sulfuros mediante la formación de una fase de sulfuros líquidos compuesta principalmente por calcosina ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelina ( $\text{CuS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), donde se concentra la mayor cantidad del cobre alimentado, y de otra fase oxidada líquida adherida a la anterior, llamada escoria, compuesta principalmente de silicatos de hierro y fundentes.

Según Codelco Educa. (s.f) c., la reacción de producción de mata y escoria podemos representarla por:

Concentrado + Fundentes + Energía -----> Mata + Escoria + Gas (5)

Donde:

Mata:  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{FeS}$ , fundamentalmente.

Escoria:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ , otros

Gas:  $\text{O}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , otros.

1. Flujo de alimentación de sólidos y aire al sistema
2. Tasas de extracción de gas  $\text{SO}_2$
3. Tiempo de extracción de Mata y escoria
4. Grado de Cu en la entrada y salida.



5. Contenido de Sílice en la escoria
6. Temperatura del horno

## II. Actividades a desarrollar

La mata de cobre constituida contiene sulfuros de cobre y hierro, algunos metales preciosos y otros elementos a nivel de trazas. Por su parte, la escoria está conformada por una fase oxidada adherida a la mata compuesta principalmente de silicatos de hierro y fundentes, pobre en metal de cobre, es caracterizada y descartada directamente o sometida a una etapa adicional de recuperación del metal, si su contenido es alto. La mata, en cambio, pasa a una etapa posterior de conversión por oxidación Codelco Educa. (s.f)c.

En el proceso de fusión (HF) suceden reacciones entre los concentrados y los fundentes que corresponden principalmente a la reducción de los óxidos de cobre por el sulfuro cuproso y a la sulfuración de los óxidos de cobre por el sulfuro ferroso.

1. Controlar y ajustar la velocidad de entrada del concentrado y el oxígeno permitirá tener una entrada constante de material, con el objetivo de garantizar eficiencia en el proceso de fundición, obtener un porcentaje de cobre en la mata en los rangos de diseño, minimizando las pérdidas de gas y energía.
2. Programar la extracción del horno de la escoria y la mata para garantizar tanto los niveles de prescritos de concentrado en el horno, como la alimentación constante, según necesidad los convertidores.
3. Regular la temperatura para que esté dentro de los rangos establecidos y obtener una producción mínima de escoria.
4. Medir el concentrado de cobre especificado en la mata, permite controlar y ajustar las velocidades de entrada para optimizar el proceso.

### 7.4.1.7 Componente 4. Conversión mediante el uso de hornos de conversión o de fusión

#### a. Alcance

Obtener cobre blíster con concentración aproximada de **98,5%**.

#### I. Información requerida

Esta etapa de la fundición corresponde a la conversión de la mata de cobre proveniente de la fusión, la cual se realiza en hornos a temperatura de 1200°C, cuyo fin es la separación del remanente de hierro y azufre de los sulfuros de cobre



mediante la adición de aire enriquecido (70% de oxígeno), eliminando las impurezas hasta obtener cobre blíster con concentraciones aproximadas del 98,5%.

La tecnología de conversión considerada en esta descripción corresponde a una fundición moderna, de hornos flash u hornos de conversión inmediata Outokumpu / Kennecott (FCF). Los principales insumos requeridos en el proceso de conversión son: cal fina (95% CaO promedio), oxígeno técnico (95% O<sub>2</sub>, en promedio) y aire de distribución. El enriquecimiento del aire en proceso es 70% de oxígeno promedio. En la torre de reacción se encuentra el quemador donde se alimenta la carga. Una lanza central, con aire enriquecido, facilita su distribución con la consecuente reacción del sulfuro contenido, lo que genera el calor de fusión requerido para el correcto funcionamiento del proceso (Codelco Educa, 2019, p.).

1. Porcentaje de Cu en la mata
2. Contenido de la escoria
3. Cantidad mínima de alimentación de concentrado
4. Cantidad de insumos en el proceso
5. Consumo de energía para mantener temperaturas

## II. Actividades a desarrollar

Tradicionalmente pueden usarse dos tipos de equipos, el horno de reverbero y el Convertidor Modificado Teniente (CMT). Este último es el modelo que utiliza Codelco, ya que posee una tecnología más avanzada y realiza, al mismo tiempo, fusión y conversión (además fue desarrollado por la misma entidad). Cuando el concentrado pasa a estado líquido, los elementos que lo componen se separan naturalmente según su peso. De esta forma, los minerales más livianos se quedan en la parte superior del fundido, mientras que el cobre, que es más pesado, se va al fondo del mismo Codelco Educa. (s.f)c.

En la etapa de conversión, el sulfuro ferroso se oxida formando dióxido de azufre, mientras que el óxido ferroso se une con la sílice y la cal para formar escoria, esencialmente ferrítica. El calor de formación de esta escoria, junto con el producido en la oxidación del azufre y el hierro, es suficiente para mantener los diferentes materiales en estado fundido. Cuando se ha oxidado todo el azufre asociado con el hierro, el eje de alta ley (sulfuro cuproso), también se oxida y, tan pronto como se ha formado una cantidad apreciable de óxido cuproso, éste reacciona con el sulfuro cuproso para formar cobre blíster y dióxido de azufre, según las siguientes reacciones que ocurren hasta que se consume prácticamente todo el azufre Codelco Educa. (s.f)c.

Los principales insumos requeridos en el proceso de conversión son: cal fina (95% CaO promedio), oxígeno técnico (95% O<sub>2</sub>, en promedio) y aire de distribución. El enriquecimiento del aire en proceso es 70% de oxígeno promedio. En la torre de



reacción se encuentra el quemador donde se alimenta la carga. Una lanza central, con aire enriquecido, facilita su distribución con la consecuente reacción del sulfuro contenido, lo que genera el calor de fusión requerido para el correcto funcionamiento del proceso (Codelco Educa, 2019, p.).

La tecnología HF corresponde a un proceso de fusión-conversión continua de concentrados, desarrollado por Outokumpu, que aprovecha el calor generado en las reacciones del oxígeno presente en el aire del proceso, con los sulfuros de hierro contenidos en el concentrado alimentado al reactor. Dependiendo principalmente de las características mineralógicas o químicas del concentrado, de los flujos y los enriquecimientos en oxígeno del aire soplado, se generarán importantes cantidades de calor en el reactor, suficientes para tener un proceso totalmente autógeno, donde se funden, además, materiales fríos de recirculación con cobre o carga fría, generada en el proceso productivo y utilizada para regular la temperatura en el horno (Codelco Educa, 2019, p.).

1. Medir las concentraciones de Cu tanto en la entrada como en la salida, con el objetivo de controlar que las condiciones de temperatura y adición de los insumos estén en las dosificaciones óptimas del proceso,
2. Controlar las entradas de concentrado en la operación ayuda a mantener un flujo constante y con las proporciones adecuadas de oxígeno y cal fina.
3. Ajustar la temperatura permite controlar la relación de entrada de oxígeno y el gasto de combustible.

#### 7.4.1.8 Componente 5. Pirorrefinación mediante el uso de hornos

##### a. Alcance

Obtener cobre anódico con pureza de **99,5%**.

##### I. Información requerida

El cobre blíster obtenido de la etapa de conversión aún contiene impurezas y materiales valiosos tales como plata, oro, arsénico, antimonio, bismuto y hierro, por lo que debe ser refinado en los hornos anódicos, alcanzando un cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,5%.

1. Características del cobre blíster
2. Características de las impurezas
3. Cantidad de agente reductor en el horno
4. Volumen de aire enriquecido con oxígeno y gas natural fraccionado con vapor de aire
5. Temperatura de proceso
6. Cantidad de azufre en el cobre





## II. Actividades a desarrollar

La implementación de la etapa de pirorrefinación se realiza mediante el uso de hornos, donde se remueve el azufre del cobre blíster y se reduce el oxígeno disuelto por medio de un agente reductor evitando la oxidación del cobre. La operación de los hornos de refinación es cíclica (batch), cada horno opera de forma secuencial: completada la carga del horno, se inicia la etapa de oxidación, que permite remover el sulfuro contenido en el blíster hasta un nivel de 50 ppm, para tal efecto se inyecta al baño fundido aire enriquecido con oxígeno.

Adicionalmente, se remueven otras impurezas contenidas en el cobre blíster, inyectándose vía toberas, si es necesario, pequeñas cantidades de cal que permiten la formación de una escoria que se descarta por sangrado y posteriormente es recirculado. Una vez limpio el cobre, se inicia la etapa de reducción del nivel de oxígeno presente en el baño fundido, mediante la inyección de gas natural fraccionado con vapor de aire. Así se obtiene cobre anódico con un contenido de cobre de un 99,6%. (Codelco Educa, 2019, p.).

1. Controlar relación de flujo de oxígeno para realizar la quema óptima del azufre.
2. Ajustar las dosificaciones de cal realizando mediciones de concentrado de la escoria para controlar la remoción de las impurezas
3. Identificar el flujo mínimo de gas natural para la reducción de oxígeno.





### 7.4.2 Lineamiento No. 2. Desarrollo del proceso de electrorrefinación

- ✓ **Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre**

En el proceso de electrorrefinación, el agua es usada para preparar las soluciones de las celdas electrolíticas, lo que genera el mayor consumo de agua dentro del proceso de obtención pirometalúrgica del cobre, razón por la cual se debe garantizar que se haga un uso racional de este recurso.



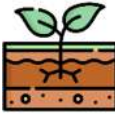
Para el funcionamiento de las celdas electrolíticas se requiere energía eléctrica, ánodos y cátodos, solución de sulfato de cobre ácida, ácido sulfúrico y agua. Para la gestión ambiental adecuada en el proceso, se plantea el reúso de soluciones mediante la recalibración de éstas, el reciclaje de los ánodos que al final del ciclo no se han disuelto electroquímicamente. Asimismo, es importante evaluar la posibilidad de recuperar metales preciosos del lodo anódico resultante del proceso.

✓ **Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS**

	X		X		X		
---	---	---	---	--	---	---	--

El adecuado desarrollo del proceso de electrorrefinación repercute en el uso eficiente del recurso hídrico y de la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

✓ **Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento**

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Soluciones de celdas electrolíticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recalibración de soluciones con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>De no ser posible su reúso, debe realizarse la disposición así:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Mediante el tratamiento de las aguas residuales previo vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> <li>Realizando la disposición de las soluciones como residuos peligrosos con gestores autorizados para tal fin</li> </ol> </li> </ul>
 Atmosférico	Niebla ácida	Recolección por medio de sopladores, ventiladores de extracción o campanas en las celdas, y posterior tratamiento mediante filtros para su emisión cumpliendo con la normatividad ambiental de calidad de aire vigente y a los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire.
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reciclaje de residuos</li> <li>Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>
	Ánodos de cobre	<b>Reciclaje de ánodos:</b> al final de un ciclo, cada ánodo ha sido disuelto electroquímicamente en casi el 85%. Los restos de los ánodos sin disolver



Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
		(desperdicio o chatarra) se retiran de las celdas y después de lavados, se funden y se vuelven a vaciar como ánodos nuevos.
	Lodo anódico	<b>Recuperación de metales preciosos del lodo anódico:</b> los lodos anódicos contienen cantidades significativas de oro y plata, así como cantidades variables de Ni, Pb, As, Sb, Bi, Se y Te. En todas las operaciones los lodos anódicos son procesados para recuperar los metales valiosos.

#### 7.4.2.1 Componente 1. Concentración en celdas electrolíticas

##### a. Alcance

Obtener un cátodo de cobre con pureza de **99.99%**.

##### I. Información requerida

El cobre anódico obtenido de la etapa de pirorrefinación requiere de la electroobtención, debido a que todo el cobre de uso industrial a nivel mundial, requiere de una pureza del 99,99%, eliminando las impurezas que dañan las propiedades eléctricas del cobre y recuperar otros subproductos valiosos como cobre, oro y plata, a partir de recursos lixiviables que de otra forma serían inviables.

1. Conocer las concentraciones del cobre anódico.
2. Características de la solución lixiviante.
3. Cantidad de minerales recuperables contenidos en la solución lixiviante.
4. Corriente eléctrica y densidad necesaria en el proceso.

##### II. Actividades a desarrollar

Se implementa el proceso de electrorrefinación (Electrólisis), recuperando el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito) para depositarlo en un cátodo, utilizando un proceso de electrólisis. Para ello se hace circular a través de la solución electrolito una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución misma) y un cátodo. De esta manera, los iones del metal de interés (cationes), son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa), depositándose en él. Las impurezas quedan disueltas en el electrolito y también precipitan en residuos o barros anódicos. (Codelco Educa, 2019, p.).



La aplicación de un potencial eléctrico entre un ánodo de cobre (electrodo positivo) y un cátodo de cobre (electrodo negativo), sumergidos en una celda que contenga una solución de sulfato de cobre ácida, origina que tengan lugar las siguientes reacciones y procesos:

- El cobre del ánodo se disuelve electroquímicamente dentro de la solución, con lo que se producen cationes de cobre, más electrones.
- Los electrones producidos por la reacción son conducidos hacia el cátodo a través del circuito y suministro de energía externo.
- Los cationes  $Cu_{2+}$  en la solución, emigran por difusión y convección hacia el electrodo negativo (cátodo).
- Los electrones y los iones  $Cu_{2+}$  se recombinan en la superficie del cátodo para producir el cobre metálico que se deposita sobre el cátodo.
- En síntesis, se produce la disolución electroquímica del cobre del ánodo, la emigración de electrones y iones de cobre hacia el cátodo y el depósito de cobre sobre la superficie del cátodo.



## 7.5 LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

*La hidrometalurgia de los minerales oxidados de cobre se desarrolla a partir de distintas reacciones físicas y químicas, por las cuales se extrae el cobre del resto del mineral que ha sido sometido a la etapa de trituración y que se disuelve en una solución ácida, pasando así a la llamada etapa de lixiviación. A continuación, el material lixiviado ingresa a una etapa de extracción por solventes y posteriormente a la etapa de electroobtención, produciendo cátodos de cobre de alta pureza. Con cada etapa de la transformación hidrometalúrgica, el cobre primero se separa de la ganga y luego se le van eliminando las impurezas, hasta obtener un cátodo de cobre.*

### 7.5.1 Lineamiento No. 1. Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre.

#### 7.5.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.

La lixiviación es el proceso que genera el mayor consumo de agua dentro del proceso de hidrometalurgia del cobre, como insumo fundamental para el sistema de riego y goteo de la mezcla de  $H_2SO_4 + H_2O$ , razón por la cual se deben adoptar todas las medidas necesarias para lograr el uso eficiente del recurso, implementando prácticas de ser posible de reúso de agua, cumpliendo con la calidad requerida para el proceso sin afectar el óptimo desarrollo de éste.

Dentro de los principales impactos ambientales asociados a este proceso se encuentra el cambio en las características fisicoquímicas del suelo, afectando su calidad, así como cambios en las características fisicoquímicas y/o microbiológicas de las aguas subterráneas o su zona de recarga, como consecuencia de posibles filtraciones o derrames de los agentes lixiviantes o los residuos asociados a este proceso.

Las principales medidas de tipo preventivo que se deben implementar, están asociadas a la impermeabilización del suelo en donde serán ubicadas las pilas de lixiviación, esto con una membrana de plástico que puede ser de tipo polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 mm a 1,5 mm de espesor, según las exigencias de cada aplicación y que permitan interceptar las soluciones que escurren desde lo alto de la pila y conducir las a las canaletas de recolección. Sobre las membranas se instalan cañerías perforadas de drenaje y una cubierta de grava drenante. Tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los



líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal). (Codelco Educa, 2019, p.).

Los reactivos normales en el proceso de lixiviación suelen ser ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados, los cuales se pueden recolectar por medio de un sistema de canaletas en las pilas de lixiviación y reusar previa recalibración de concentraciones.

Como medidas de tipo preventivo en el proceso de lixiviación, se debe contar con membranas que permitan recubrir las pilas en caso de elevados niveles de precipitación, evitando así el exceso de agua en las pilas y disminuyendo la probabilidad de fugas de agentes lixiviantes. Así mismo se deben diseñar sistemas de contención de posibles fugas o derrames de agentes lixiviantes, tales como diques o piscinas de soporte para prevenir la contaminación de fuentes de agua superficiales y/o subterráneas y/o impactos en el suelo.

### 7.5.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS



	X				X		
--	---	--	--	--	---	--	--

El adecuado desarrollo del proceso de lixiviación repercute en el uso eficiente del recurso hídrico y la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.5.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
<p>Hídrico</p>	Ácidos, solventes y soluciones de lixiviación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recolección por medio de sistema de canaletas en las pilas de lixiviación para recalibrarlas y reusarlas con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>De no ser posible su reúso, debe realizarse la disposición así:                     <ol style="list-style-type: none"> <li>Mediante el tratamiento de las aguas residuales previo vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> </ol> </li> </ul>



Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
		b) Realizando la disposición de las soluciones como residuos peligrosos con gestores autorizados para tal fin
	Agua residual del proceso de lixiviación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>• De no ser posible su reúso, debe realizarse el vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> </ul>
 <b>Atmosférico</b>	Evaporación de agentes lixiviantes	<p><b>Lixiviación en pilas:</b> control de la emisión por medios físicos tales como ubicación de una capa de material encima del sistema de riego para mitigar la evaporación. Los agentes lixiviantes que se recuperan, se pueden reusar en el proceso.</p> <p><b>Lixiviación en tanques:</b> procesos de depuración en la salida de los tanques. Los agentes lixiviantes que se recuperan, se pueden reusar en el proceso.</p>
 <b>Suelo</b>	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos</li> <li>• Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>
	Ripios de lixiviación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El material no diluido en el proceso de lixiviación o ripio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal.</li> <li>• Usos alternativos. Por ejemplo, uso en hormigones de cemento de estructuras secundarias de corta vida útil y en ambientes de desempeño de baja humedad.</li> </ul>

#### 7.5.1.4 Componente 1. Preparación del sitio

##### a. Alcance 1

Impermeabilización del área de disposición del material a lixiviar.

##### I. Información requerida

En la base de las pilas se instala un material impermeable que reciba toda la solución lixivante y la conduzca a las canaletas, para luego dirigirla a unas piscinas





de almacenamiento donde llegan las soluciones del electrolito fuertes (PLS) y soluciones del electrolito débiles (ILS). La instalación y montaje del material debe tener todo el control y cuidado, debido a todas las implicaciones ambientales y económicas inherentes.

Se contemplan los siguientes elementos de selección:

- Tipo de material (espesor, resistencia y duración).
- Método de colocación y unión.
- Material de cobertura.
- Calidad de la compactación del terreno.
- Rendimiento de la geomembrana.
- Drenaje de la solución.

## II. Actividades a desarrollar

En la instalación de este recubrimiento se debe tener en cuenta el material de cobertura para proteger la geomembrana. En la parte superior (overliner) de la geomembrana va roca triturada y filtrada a tamaños menores de 2 cm de diámetro y un espesor de 0.5m. En la parte inferior (underliner), se sugiere una superficie homogénea y evitar picadura o rotura de la geomembrana, por lo que debe tener una capa de material fino (menor a 200 micras), como arcilla y arena o tierra laminada con un espesor entre 0.1 m y 0.5 m, (Mark E, 2022).

Realizar un ensayo Proctor para evaluar el grado de compactación del suelo con el propósito de tener una compresión adecuada del sitio y con una conductividad hidráulica saturada mínimo de  $1 \times 10^{-8}$  m/s.

Asegurar que la soldadura de las uniones de la geomembrana quede totalmente aislada del suelo mediante pruebas hidráulicas.

Escoger el material de la geomembrana, teniendo en cuenta como criterio los aspectos económico, ambiental, grado de permeabilidad, durabilidad, picado y resistencia a la corrosión. La elección de estos materiales impermeables generalmente recae en los geosintéticos como el polietileno de alta densidad, polietileno clorosulfurado y cloruro de polivinilo (PVC), con un espesor – dependiendo las exigencias de la operación– entre 0.1 mm y 1.5 mm.

### b. Alcance 2

Conformación de las pilas a lixiviar.



## I. Información requerida

- Tamaño de partícula del material a lixiviar
- Definición sobre si se van a construir pilas dinámicas, permanentes o modulares.
- Inclinación de la cama.
- Estudio geomecánico del material para alcanzar la altura y la base diseñada con la cantidad de material a tratar.
- Tiempo del ciclo de lixiviación.

## II. Actividades a desarrollar

### *¿Cómo se conforman las pilas?*

La base inclinada debe ser mínimo del 3%, Codelco Educa, (2019d).

Dependiendo de la escogencia de las pilas, se selecciona una configuración de construcción de ellas. Cuando el terreno no presenta restricciones topográficas, la configuración de la pila dinámica es rectangular. Para las pilas permanentes es de forma trapezoidal.

Con base en el estudio geomecánico se determina el ángulo de reposo del material y las pendientes para el drenaje y la evacuación de la solución lixiviada

Se decide la altura y la base de construcción de la pila que está en promedio entre 4-7 metros, dependiendo del tamaño de partícula y su porosidad

En el proceso de construcción se recomienda realizar un estudio topográfico para asegurar la altura y la posición diseñada.

### 7.5.1.5 Componente 2. Transporte del mineral y apilado

#### a. Alcance 1

Escoger el tipo de transporte y apilado dependiendo el tamaño de operación y el flujo del mineral.

## I. Información requerida

- Flujos y movimiento del material desde la mina hasta la planta de procesamiento.
- Tamaño de la operación extractiva.
- Asignación de equipos y tecnologías para el proceso.



- Datos de las medidas de las pilas.
- Humedad del material.

## II. Actividades a desarrollar

Sobre la base de la información indicada, se escoge el tipo de transporte a usar y el sistema de pilas.

**Tabla 7. Tipo de transporte a usar y el sistema de pilas.**

Tamaño (ton/día)	Equipo	Sistema de pilas
300-10.000	Sistema de camiones y apiladores de correa autopropulsado	Pilas dinámicas y permanentes con restricción
10.000-50.000	Correas modulares articuladas (grasshopper) que termina en un apilador de correa o stracker	Pilas dinámicas y permanentes sin restricción
75.000-150.000	Complejos sistemas de apiladores sobre orugas con correas transportadoras estacionarias o móviles. Con el movimiento de las pilas se usa recolectores tipo pala de rueda conocidos como rotopala o bucketwheel	Pilas dinámicas (excesivo tonelaje)
≥150.000	Complejos sistemas de apiladores sobre orugas con correas transportadoras estacionarias o móviles. Con el movimiento de las pilas se usa recolectores tipo pala de rueda conocidos como rotopala o bucketwheel	Pilas dinámicas (excesivo tonelaje)

*Fuente: Codelco Educa, (2019d).*

- Con la ayuda de un topógrafo y una unidad de apilamiento radial (stacker) se realiza el apilado dentro de los límites y dimensiones establecidos (base y altura).
- Control de proceso de aglomeración teniendo en cuenta la humedad.

### 7.5.1.6 Componente 3. Tratamiento de disolución

#### a. Alcance 1

Realizar el tratamiento *en pilas para óxidos*.

#### I. Información requerida

- Pretratamiento químico o curado del material.
- Control fugas de los sistemas de impermeabilización y drenaje.
- Sistema de riego y recolección de soluciones.
- Diseño de piscinas con las dimensiones, material de construcción y sistema de aislamiento.
- Densidad aparente del material mineralizado.



## II. Actividades a desarrollar

- Análisis granulométrico para establecer si el curado<sup>4</sup> se realiza directamente en la banda transportadora o en tambores. Como criterio principal, si el mineral contiene menos del 15% de finos menores a 104 micras, el curado se realiza en bandas transportadoras (Young, 2019). Esto con el objetivo de iniciar el proceso químico de dilución y disminuir la ganga consumidora de reactivo.
- Implementar un control de fugas en la instalación del sistema hidráulico de riego revisando que todo el sistema de tubería esté correctamente conectado.
- Realizar control de aguas lluvia, escorrentía superficial e instalar un sistema de manejo de derrames.
- Construir las piscinas desarenadoras, piscinas de soluciones ricas en el lixiviado (PLS), piscinas de solución intermedia (ILS), piscinas de emergencia para la recolección de las soluciones lixiviantes, tomando como base la configuración del manejo de soluciones, las cuales están diseñadas para tener una concentración rica en el lixiviado con las características de concentración para pasar al siguiente proceso.
- Para la red de riego se debe tener en cuenta:
  - Temperatura del medio ambiente.
  - Altura de la operación minera.
  - Concentración de sales (magnesio y calcio) en el agua, lo que determina la dureza.
  - Verificar la planeación del diseño (las dimensiones, puntos importantes y materiales necesarios para la red de riego).

---

<sup>4</sup> Curado: Procedimiento de rocío de una solución de ácido y agua a la roca mineralizada, a fin de sulfatar los minerales y empezar el proceso de lixiviación (Codelco, 2019).



**Tabla 8. Puntos que se deben tener en cuenta sobre la red de riego.**

Tipo de riego	Condiciones ambientales	Disponibilidad de agua
Riego por goteo	Viento fuerte y permanente, riesgo de congelamiento de la solución a alturas entre 3.000 a 4000 metros, por lo que pueden ser instalados bajo la superficie.	Escasa
Riego por aspersión	Condiciones de temperatura favorable, aguas duras (peligro de precipitación del carbonato), vientos moderados, evaporación de la zona o cuando se necesite agregar oxígeno o calentar la solución de lixiviado	Abundante

Fuente: ATG Ltda., (2022). *Tabla adaptada de información de Codelco Educa, (2019d).*

## b. Alcance 2

Realizar el tratamiento de disolución agitada.

### I. Información requerida

- Recuperación metalúrgica (porcentaje de Cu en la entrada y salida, tiempo de lixiviación).
- Parámetros establecidos de granulometría para la operación.
- Gasto de energía.
- Velocidad de agitación.
- Velocidad de disolución.
- Condiciones de la temperatura y presión.
- Porcentaje de sólidos.
- Adicionar agentes oxidantes.

### II. Actividades a desarrollar

¿Cómo se realiza el tratamiento de diluciones agitadas?

- La granulometría del proceso debe tener una variación que oscile entre los 0.075 mm y 2 mm, con el objeto de exponer con un grado óptimo de liberación del mineral a la solución de lixiviación y mejorar la etapa de separación sólido-líquido en las siguientes operaciones.
- Al realizar la mezcla del mineral con el agente lixivante se recomienda aumentar la velocidad de agitación hasta encontrar el equilibrio entre el tiempo de lixiviación y consumo de energía.
- Verificar la velocidad de disolución de la extracción del porcentaje de Cu en el tiempo diseñado
- Considerar el control de la temperatura y la presión cuando se trate de minerales complejos y se deba por tanto manejar en el proceso temperaturas y/o presiones altas.



- Efectuar la medición de la arcilla presente en el mineral de entrada, con el objetivo de evaluar las posibles interferencias en el proceso de disolución.
- Instalación de instrumentalización, entre otros, equipos de pH, % se sólido, potencial redox, presión y temperatura en los tanques, para controlar las variables críticas del proceso y maximizar la producción del mineral, por ejemplo, es importante controlar el porcentaje de sólidos, debido a que debe tener niveles altos para aumentar el contacto y la liberación de cobre.
- Para el tratamiento de cobres primarios, como la calcopirita, es necesario adicionar agentes oxidantes para poder tratar estos minerales complejos.
- En caso de requerir temperatura, se deben controlar los gases generados y determinar el tipo de ellos para su tratamiento.

## 7.5.2 Lineamiento No. 2. Consideraciones operacionales de la extracción por solventes

### 7.5.2.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

La extracción por solvente requiere para su desarrollo una solución orgánica en la cual se disuelve una solución acuosa de lixiviación para extraer selectivamente los iones metálicos. Los líquidos resultantes se limpian para remover los restos sólidos que aún pueden contener. Para el proceso se requiere agua, razón por la cual se deben implementar todas las medidas necesarias para lograr el uso eficiente del recurso, implementando prácticas de ser posible de reúso de agua, cumpliendo con la calidad requerida para el proceso sin afectar el óptimo desarrollo de éste.

El proceso demanda consumo energético para el funcionamiento de los equipos involucrados en la extracción por solvente. De igual manera, es preciso implementar medidas que permitan mejorar la eficiencia del proceso productivo, disminuyendo su consumo energético.

En síntesis, después de la etapa final de agotamiento se puede obtener una solución orgánica descargada sin cobre, misma que puede ser recirculada en la propia etapa de extracción.


### 7.5.2.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		
--	---	--	---	--	---	--	--



El adecuado desarrollo del proceso de extracción por solvente repercute en el uso eficiente del recurso hídrico y la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.5.2.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Soluciones orgánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recolección de soluciones para recalibrarlas y reusarlas con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>• De no ser posible su reúso, debe realizarse la disposición así:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Mediante el tratamiento de las aguas residuales previo vertimiento, garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> <li>b) Realizando la disposición de las soluciones como residuos peligrosos con gestores autorizados para tal fin</li> </ol> </li> </ul>
	Agua residual del proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> </ul> De no ser posible su reúso, debe realizarse el vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.
 Atmosférico	N. A	N. A
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul> </li> </ul>

### 7.5.2.4 Componente 1. Desarrollo de las etapas de extracción

#### a. Alcance 1

Proceso de extracción o carga del solvente.





## I. Información requerida

- Datos de variables operacionales correspondientes a: pH, flujo de entrada de la solución rica de lixiviación (PLS, por sus siglas en inglés), relación de flujo orgánico/acuoso, flujo de descarga, velocidad y potencia de bombeo.

## II. Actividades a desarrollar

Para el proceso de extracción por solvente es necesario obtener una carga orgánica de aproximadamente 4g/l de cobre, realizando el control operacional de variables críticas, por ejemplo:

- pH:** se debe tener control del pH en las distintas fases, siendo óptimo alrededor de 3 para la extracción por solvente.
- Control de flujo de entrada de solución rica de lixiviación PLS:** se debe tener control del flujo de la solución de lixiviación cargada para permitir que se realice una extracción eficiente respecto a las características de los reactivos utilizados, tiempos de mezcla y sedimentación.
- Control de parámetros de solución rica de lixiviación PLS:** acidez libre, potencial de óxido-reducción, concentración de aniones que forman complejos como cloruro, sulfato y cianuro, temperatura, la que influye directamente en el equilibrio de la extracción.
- Graduar el impulsor del bombeo:** esto se realiza para tener una buena transferencia de masa.
- Relación de flujo orgánico/acuoso:** esto se realiza para lograr equilibrio químico durante el proceso.
- Recircular el electrolito:** lo que permite purificar al máximo el cobre en la solución y aprovecharla al máximo.
- Temperatura:** controlar la temperatura en la emulsión mejora la rapidez de la reacción y permite una mejor la separación de fases.

### b. Alcance 2

Para el proceso de reextracción o descarga.

## I. Información requerida

- Características de la solución orgánica cargada

## II. Actividades a desarrollar

La etapa de reextracción del reactivo consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las



capacidades extractivas en la misma fase, lo que le permite ser reutilizada en otra extracción.

En síntesis, de la etapa de reextracción se obtiene una solución de orgánico descargado sin cobre, que es recirculada a la etapa de extracción, y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, la que es enviada a la siguiente etapa, la electroobtención. Codelco Educa, (2019a)

### c. Alcance 3

Determinar la eficiencia de la extracción por solvente

#### I. Información requerida

- Datos de variables operacionales

#### II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo determinar la eficiencia de la extracción por solvente?

- a. Realizar el análisis de los datos históricos operacionales, identificando variables críticas que influyan en la eficiencia del proceso para realizar ajustes y recalibración del proceso.
- b. Determinar las relaciones de flujo orgánico / flujo acuoso, O/A, medidas en las etapas de extracción y de descarga, a fin de recircular el electrolito necesario, buscando alcanzar la razón de O/A requerida en el mezclador.
- c. Determinar el tiempo de residencia en los mezcladores.
- d. Establecer el flujo total en cada equipo ( $m^3/\text{min.}$ ) y la equivalencia de ( $m^3/\text{h}$ ) de flujo acuoso tratado.





### 7.5.3 Lineamiento No. 3. Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención.

#### 7.5.3.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre.

En el proceso de electroobtención, el agua es usada para preparar las soluciones de las celdas electrolíticas ( $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ ), razón por la que se debe garantizar el uso racional de este recurso. Los ánodos impuros de cobre se disuelven electrolíticamente en un electrolito de  $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$  y el cobre puro se deposita a partir de la solución como cátodos. El circuito de purificación de electrolito trata una pequeña fracción del electrolito, el resto se recircula directamente a la refinación (después de las adiciones de reactivos y el calentamiento).



Se deben estimar claramente los requerimientos eléctricos para el desarrollo eficiente del proceso debido al alto consumo de energía (corriente eléctrica) para las celdas. Para la gestión ambiental adecuada en el proceso, se plantea el reúso de soluciones mediante la recalibración de éstas y el reciclaje de los ánodos que al final del ciclo no se han disuelto electroquímicamente. Asimismo, es importante evaluar la posibilidad de recuperar metales preciosos del lodo anódico resultante del proceso.

### 7.5.3.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS

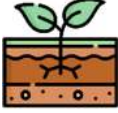
	X		X		X		
---	---	---	---	--	---	---	--

El adecuado desarrollo del proceso de electroobtención repercute en el uso eficiente del recurso hídrico y de la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante y al ODS 12. Producción y consumo responsables.

### 7.5.3.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Soluciones de celdas electrolíticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recalibración de soluciones con la calidad requerida en el proceso.</li> <li>De no ser posible su reúso, debe realizarse la disposición así:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>Mediante el tratamiento de las aguas residuales, previo vertimiento, garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.</li> <li>Realizando la disposición de las soluciones como residuos peligrosos con gestores autorizados para tal fin</li> </ol> </li> </ul>
 Atmosférico	Niebla ácida	Recolección por medio de sopladores, ventiladores de extracción o campanas en las celdas, y posterior tratamiento mediante filtros para su emisión, cumpliendo con la normatividad ambiental de calidad de aire vigente y los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos en el aire.



Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos</li> <li>• Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul>
	Lodo anódico	<b>Recuperación de metales preciosos del lodo anódico:</b> los lodos anódicos contienen cantidades significativas de oro y plata, así como cantidades variables de Ni, Pb, As, Sb, Bi, Se y Te. En todas las operaciones los lodos anódicos son procesados para recuperar los metales valiosos.

#### 7.5.3.4 Componente 1. Condiciones del sistema eléctrico

##### a. Alcance 1

Definir y controlar el rango de operación de la densidad de corriente.

##### I. Información requerida

- Tasa de recubrimiento esperada del cátodo esta entre 0.4 y 1 kg/h (Robinson, 2013)
- Rango de operación de variación de la densidad de la corriente 200 a 400 A/m<sup>2</sup> Codelco Educa, (2019a).

##### II. Actividades a desarrollar

Para tener la seguridad de estar trabajando en el citado rango óptimo de densidad y tasa de recubrimiento, hay que tener en cuenta las siguientes acciones:

- Pérdidas de corriente por cortocircuitos que afecten el proceso de electrólisis.
- Fugas de corriente a través de la estructura (falsos contactos).
- Monitorear el espaciamiento entre los electrodos.
- Identificar la calidad del ánodo (Deformidad y daños mecánicos).
- Medir la densidad de corriente (densidad más alta genera cátodos rugosos y disminuye la pureza del cobre y una baja densidad aumenta el tiempo de recubrimiento y no es homogéneo el recubrimiento en el cátodo).

##### b. Alcance 2

Mantener la conductividad óptima del sistema.



## I. Información requerida

- *Consumo de energía.*
- *Rango de temperatura (45-55°C) para maximizar la conductividad eléctrica.*
- *Rango de voltaje está en aprox. 2 V.*

## II. Actividades a desarrollar

- Medir la corriente en distintas celdas para asegurar que el voltaje sea el mismo en todas las áreas.
- Determinar la eficiencia de corriente: esta medición es muy importante porque refleja la relación entre el metal depositado y el que debería depositarse.
- Controlar la temperatura del electrolito gastado y de avance para evitar degradación de la fase orgánica o aumentar los efectos de la neblina ácida.
- Controlar el pH ácido del electrolito.

### 7.5.3.5 Componente 2. Condiciones en el medio acuoso

#### a. Alcance 1

Establecer y regular la composición del electrolito en la celda.

## I. Información requerida

*Composición del electrolito en g/l.*

*Composición del agente lixivante g/l.*

## II. Actividades a desarrollar

- La composición del electrolito de avance debe estar en valores aproximados de 45g/L de  $\text{Cu}^{2+}$  y 170 g/L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Mark E, 2022, pág. 445). Cuando las condiciones del electrolito son de baja concentración, aumenta el tiempo para generar el cátodo y se reduce la eficiencia de la corriente.
- Asegurar la circulación eficiente del electrolito en todos los cátodos de la celda para garantizar la calidad del cátodo.
- Introducir el electrolito en varios lugares de la celda para asegurar la circulación homogénea por todo el volumen de las celdas.
- Para medir la composición del cobre en electrolito se emplea la técnica analítica de absorción atómica, para determinar en tiempo real las concentraciones.



## **b. Alcance 2**

Determinar la contaminación en la solución.

### **I. Información requerida**

Caracterizar los metales y solventes presentes en el electrolito de avance.

### **II. Actividades a desarrollar**

Realizar la medición del contenido orgánico por cromatografía de gases. Este valor debe ser nulo o menor de 5 ppm, dado que afecta el depósito de los cristales de cobre decolorando el material, aumenta impurezas penalizables, se adhiere al cátodo de acero inoxidable y es un componente peligroso por combustión.

Determinar las concentraciones de los componentes metálicos por medio de un espectrofotómetro secuencial de plasma para identificar las concentraciones de los metales presentes en la solución. Estas concentraciones deben ser nulas o máximo 1.5 g/L (Mark E, 2022, p. 446), debido a que disminuye la eficiencia de corriente y afecta la calidad del cátodo.

Pasar los electrolitos de avance por tratamientos de líquido para remover estas impurezas de solventes y metales como las columnas de carbón activado o celdas de flotación, para eliminar estas impurezas.



## **7.6 LÍNEA ESTRATÉGICA - DESARROLLO DE PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE**

*La biolixiviación es una técnica que disuelve metales en un medio acuoso, mediante bacterias específicas (*thiobacillus ferrooxidans*) que liberan cobre en mayor cantidad que con métodos convencionales. Estas bacterias o microorganismos, a medida que cambian las condiciones en la pila de lixiviación, los tipos de microorganismos y su número, también varían, por lo que para procurar desarrollar los microorganismos en el proceso de lixiviación es necesario controlar variables como temperatura, aireación, y cantidad de hierro y azufre. Con base en estos parámetros y la cantidad de cepas, se busca un equilibrio que pueda estabilizar el proceso de extracción de cobre por esta tecnología.*

### **7.6.1 Lineamiento No. 1. Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación**

#### **7.6.1.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre**

Existen algunas técnicas para lixiviar sulfuros, como la biolixiviación o lixiviación bacteriana, en donde la reacción de lixiviación está catalizada por bacterias específicas. El mayor beneficio de esta nueva tecnología es que evita la producción de relaves, que son los residuos de minerales originados por el beneficio del mineral usando medios acuosos y con contenidos de sustancias químicas que deben ser tenidas en cuenta por su posible producción de drenaje ácido minero (DAM). Asimismo, evita la emisión de vapor de azufre y arsénico a la atmósfera desde los hornos de fundición, ya que la bacteria consume estas impurezas, utiliza menos agua que la flotación, requiere menor inversión de capital y libera mayor metal desde el concentrado mineralizado que los métodos convencionales Codelco Educa, (2018a)

Ventajas de la tecnología microbiana sobre los métodos no biológicos:





- Requiere poca inversión de capital, ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas.
- Presenta bajos costos en las operaciones hidrometalúrgicas, en comparación con los procesos convencionales.
- Ausencia de polución o contaminación ambiental durante el proceso. No se emiten gases ni polvo, lo que produce un impacto ambiental varias veces inferior a la tecnología clásica de pirometalurgia.
- Reduce el costo energético y operacional respecto a las operaciones convencionales, por ejemplo, reducir las temperaturas de operación de 1500°C a condiciones menores a 100°C.



- Permite el tratamiento de minerales de baja ley que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.
- Posibilidad de tratamiento de menas pobres o recursos de ley baja que económicamente no son viables por tecnologías convencionales.
- Durante el proceso se genera parte del ácido y el calor requeridos en la lixiviación. El ácido se genera como producto de las reacciones de oxidación y el calor se libera por la oxidación de la pirita, a veces presente en la matriz de mineral.



En términos de consumo, las pilas de biolixiviación usan una gran cantidad de agua, por lo que es importante el uso racional del recurso, considerando acciones para el reúso del agua en extracciones adicionales.

### 7.6.1.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS


	X		X		X		X
---	---	---	---	--	---	---	---

El desarrollo del proceso de biolixiviación de cobre es considerado una buena práctica, debido a la minimización de la afectación ambiental a los recursos hídrico, atmosférico y al suelo y al uso eficiente del agua y la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante, al ODS 12. Producción y consumo responsables y al ODS 13. Acción por el clima. Asimismo, permite el tratamiento de depósitos de minerales de baja ley que no pueden ser económicamente procesados por los métodos tradicionales.

### 7.6.1.3 Gestión ambiental por tipo de recurso para el lineamiento

Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Hídrico	Agua residual del proceso de biolixiviación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.</li> </ul> De no ser posible su reúso, debe realizarse el vertimiento garantizando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.
 Atmosférico	N. A	N. A



Recurso	Subproductos residuales del proceso	Gestión del subproducto
 Suelo	Residuos sólidos convencionales y/o peligrosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje de residuos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aquellos residuos que no son objeto de reciclaje se deben disponer con gestores autorizados para tal fin.</li> </ul> </li> </ul>
	Ripios de biolixiviación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El material no diluido en el proceso de biolixiviación o ripio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de biolixiviación para extraer más metal.</li> <li>▪ Usos alternativos. Por ejemplo, uso en hormigones de cemento de estructuras secundarias, de corta vida útil y en ambientes de desempeño de baja humedad.</li> </ul>

#### 7.6.1.4 Componente 1. Caracterización microbiológica

##### a. Alcance

Caracterización microbiológica.

##### I. Información requerida

Identificación de microorganismos presentes y su cantidad.

##### II. Actividades a desarrollar

Determinar las cantidades de microorganismos con técnicas de amplificación de ADN y métodos de conteo, con los cuales analizar el crecimiento de las diferentes cepas y determinar las condiciones necesarias para el desarrollo de estos microorganismos en las condiciones del proceso de lixivaciones. Conociendo el tipo de bacteria y su rango de trabajo se puede optar por realizar una mezcla de microorganismos mesófilos y termófilos que permitan tener un rango más amplio de trabajo y estabilidad en el proceso de extracción de cobre.

##### b. Alcance 2

Requisitos operacionales.

##### I. Información requerida

- ✓ Temperatura de los procesos.
- ✓ Tiempos de residencia.



- ✓ pH óptimos.
- ✓ Identificación de metales tóxicos.
- ✓ Concentración de oxígeno, hierro y azufre.
- ✓ Tasa de riego y aireación.
- ✓ Densidad de la pulpa.
- ✓ Potencial redox.

## II. Actividades a desarrollar

Medir diariamente la temperatura en las pilas para supervisar y controlar los valores que estén entre el rango de temperatura de funcionamiento de los microorganismos.

Se relacionan en la **Tabla 9** algunos microorganismos y sus temperaturas óptimas.

*Tabla 9. Algunos microorganismos y sus temperaturas óptimas.*

Microorganismos	Temperatura Rango °C
Mesófilos y moderados termófilos Bacteria.	
Acidimicrobium ferrooxidans	≤30-55, óptimo 45-50
Acidithiobacillus caldus	32-52, óptimo 45
Sulfobacillus acidophilus	≤30-55, óptimo 45-50
Mesófilo y moderados termófilos archae	
Ferroplasma cupricumulans	22-63, óptimo 54
Extremely termofilico Archea	
Acidianus infernus	65-95, óptimo 90
Metallosphaera sedula	50-80, óptimo 75

*Fuente: ATG Ltda., (2022). Tabla adaptada de Young, 2019, (pág. 1268).*

- Determinar los tiempos de permanencia de las colonias bacterianas teniendo en cuenta su ciclo de vida, con el objetivo de mantener las cantidades mínimas para su funcionamiento, por ejemplo, en una biolixiviación en pilas están en orden de  $10^{12}$  de bacterias por tonelada de mineral (Mark E, 2022).
- Encontrar el pH óptimo que debe ser compatible con la química de lixiviación, los rangos pueden variar entre pH de 1.5 a 3.
- Realizar la medición de los metales en la solución, puesto que dependiendo de la concentración pueden ser tóxicas, desestabilizar la reacción del microorganismo y bajar el número de colonias microbiológicas. Esta medición se realiza por medio de ICP (espectrofotómetro de emisión de plasma inductivo).
- Identificando las especies de azufre y carbono por medio del análisis de combustión, usando instrumentos analíticos de laboratorio de absorción infrarroja como la tecnología patentada por la empresa LECO<sup>5</sup>, que permite analizar la cantidad de nutrientes disponible en la solución.

<sup>5</sup> LECO: Laboratory equipment company. Empresa líder en soluciones analíticas de análisis térmico de alta calidad.



- Medir el potencial de Redox para determinar el grado de oxidación. En altos valores de potencial hay pasivación y una mala lixiviación.
- Calcular la densidad de pulpa por medio de la instrumentación. Esta es importante porque puede afectar la actividad microbiana y su crecimiento.

## 7.7 LÍNEA ESTRATÉGICA - SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL





*Reúne las acciones encaminadas al control y manejo eficiente de los procesos de beneficio y transformación, a través de la toma de decisiones sustentadas en el análisis y la evaluación de datos obtenidos en el seguimiento y la medición durante la operación.*

### ✓ Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre

El seguimiento y control de los procesos de beneficio y transformación del cobre mediante sistemas de indicadores, constituye un instrumento por medio del cual se obtienen datos e información que permiten verificar tanto el cumplimiento normativo como el monitoreo del desempeño de los procesos que permitan orientar la gestión del proyecto hacia prácticas mineras con responsabilidad ambiental, social y económica. Un adecuado sistema de monitoreo y seguimiento garantiza que los impactos ambientales puedan ser prevenidos, controlados y/o mitigados, logrando que el proyecto pueda alinearse al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

El seguimiento, medición y control deben garantizar una información legítima y transparente que le permita a las partes interesadas (accionistas, clientes, comunidades, autoridades, entre otros), estar informadas del estado del proyecto, del cumplimiento normativo y de las buenas prácticas que allí se desarrollan.

### ✓ Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados-ODS

	X		X		X		X
---	---	---	---	--	---	---	---

El desarrollo de un adecuado seguimiento, medición y control del proceso de transformación y beneficio de cobre repercute en el uso eficiente de los recursos hídrico, atmosférico, suelo y de la energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante, al ODS 12. Producción y consumo responsables y al ODS 13. Acción por el clima.



## 7.7.1 Lineamiento No. 1. Seguimiento y control a la ley de cobre del material explotado

### 7.7.1.1 Componente 1. Concentración del cobre y minerales asociados

#### a. Alcance 1

Controlar la concentración del cobre y minerales asociados en el material de suministro a la planta.

#### I. Información requerida

- Resultados de concentración de cobre y minerales asociados en el material explotado.
- Requerimientos de concentración de cobre y minerales asociados determinados para el suministro a la planta.

#### II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo controlar la concentración del cobre y minerales asociados para el suministro a la planta?

Desde el diseño y durante la operación se establecen valores de concentración del cobre y minerales asociados del material suministrado a la planta. Las concentraciones del cobre pueden variar dependiendo de las características geológicas del yacimiento. Si estos cambios no son contemplados, pueden ocasionar ineficiencia o afectación a los procesos. Por lo cual es necesario realizar muestreo y análisis químico continuo del material mineralizado.

- Procedimiento de muestreo:** toma de muestras del material mineralizado en el frente de explotación conforme al avance de la actividad.
- Análisis químico:** técnicas para determinar las concentraciones específicas del cobre y minerales asociados como: difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x y espectroscopia de absorción atómica.
- Clasificación y mezcla:** a partir de los resultados de concentración realizar clasificación y mezcla del material explotado para garantizar la concentración de cobre establecida en el suministro a la planta.
- Manejo del flujo de material:** controlar el volumen de material suministrado a la planta para mantener la concentración de cobre requerida en la operación.



## **7.7.2 Lineamiento No. 2. Realizar seguimiento y manejo de las variables operaciones de la planta**

### **7.7.2.1 Componente 1. Automatización de procesos**

#### **a. Alcance**

Realizar el seguimiento y medición de las variables operacionales para garantizar la eficiencia y la seguridad de la planta.

#### **I. Información requerida**

- Especificaciones de equipos e instalaciones.
- Diseños y requerimientos de los procesos.
- Variables específicas de los procesos.

#### **II. Actividades a desarrollar**

Las variables operacionales son particulares para cada proyecto minero, están asociadas por ejemplo a aspectos como el diseño de la planta, tecnología de las instalaciones y equipos utilizados. Para controlar el desempeño, la eficiencia y la seguridad de los procesos, es necesario conocer el funcionamiento de los equipos y disponer de los datos de las variables operacionales a través del seguimiento y la medición, lo que se realiza de manera eficiente mediante la instrumentalización y automatización de los procesos, disminuyendo la incertidumbre y el error en la obtención de información.

### **¿Cómo automatizar los procesos de beneficio y transformación del cobre para garantizar la eficiencia de la planta?**

**a.** Implementación de sistemas continuos de adquisición y análisis de datos, por ejemplo sistemas como, el de adquisición de datos y control de supervisión (SCADA, por sus siglas en inglés) y sistema de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés), los que permiten adelantar monitoreo y control de los procesos, mediante el seguimiento de las variables operacionales en tiempo real, en procura de mantener las condiciones de seguridad y eficiencia en el desarrollo de los procesos en la planta.

**b.** Instrumentalización de los procesos, implementando equipos de medición que suministran datos en tiempo real al sistema, para ser procesados y analizados minimizando la incertidumbre y facilitando la toma de decisiones. A continuación, se presentan algunos ejemplos de equipos e instrumentos de monitoreo y medición para los procesos de beneficio y transformación del cobre.



- Procesos de beneficio

**Tabla 10. Procesos de beneficio.**

Proceso	Variable	Instrumento o Equipo de Monitoreo
Trituración y molienda	Granulometría	Analizadores de tamaño de partículas mecánicos o de dispersión laser
	Transporte del material	Sensores de nivel de banda transportadora
	Flujo de material	Medidores de flujo
	Nivel de llenado	Transmisores de nivel
	Densidad de la pulpa	Trasmisores de densidad

Fuente: ATG Ltda., (2022).

- Procesos de transformación

**Tabla 11. Procesos de transformación.**

Proceso	Variable	Equipo
Flotación (Concentración)	Tamaño de la partícula	Analizadores de tamaño de partículas
	Densidad de la pulpa	Trasmisores de densidad
	Niveles de interfaz entre pulpa y espuma	Sensores y trasmisores de nivel, medidores ultrasónicos
	Tiempo de residencia y velocidad,	Transmisores
	Flujo de aire para agitación	Medidores de flujo
	pH y redox	Medidores y sensores de pH y potencial redox
	Dosificación de reactivos químicos	Medidores de flujo másico y volumétricos
	Flujo de alimentación al sistema	Transmisores de flujo magnético y transmisores de densidad para obtener flujo másico.
Fundición	Temperatura	Termómetros especiales con termopozos de cerámica o metal, así como termocuplas hechas de metales especiales. Trasmisores de temperatura
	Filtraciones en el circuito de enfriamiento en la fundición	Detectores de filtraciones
Lixiviación	Concentración de ácido sulfúrico	Sensores de Conductividad
Extracción por solvente	Profundidad de fase orgánica	Medidores de nivel e interfase
Biolixiviación	pH	Medidores y sensores de pH

Fuente: ATG Ltda., (2022).



## **7.7.2.2 Componente 2. Almacenamiento de datos operacionales**

### **a. Alcance**

Almacenar y organizar los datos obtenidos en la medición y el monitoreo de las variables operacionales.

#### **I. Información requerida**

- Datos de monitoreo de las variables operacionales.

#### **II. Actividades a desarrollar**

##### **¿Cómo realizar el almacenamiento de datos operacionales?**

A través del almacenamiento y la organización de datos masivos, técnica conocida como Big Data, que comprende manejo de grandes volúmenes de información y aplicación de ingeniería de redes a través de la cual se pretende la recopilación de datos históricos y en tiempo real de las variables monitoreadas y medidas en la operación.

## **7.7.2.3 Componente 3. Control y ajuste de la operación**

### **a. Alcance**

Realizar el control y ajuste de la operación.

#### **I. Información requerida**

Datos operacionales almacenados y organizados

#### **II. Actividades a desarrollar**

##### **¿Cómo realizar el control y ajustes de la operación?**

Para realizar el control y ajuste de la operación es necesario hacer el análisis y la evaluación de los datos obtenidos, esto a través del uso de software en el que se pueden identificar patrones, comportamientos, falencias, aspectos y variables indicativas del funcionamiento y eficiencia de los procesos de beneficio y transformación.

El control de los equipos e instalaciones puede realizarse utilizando sistemas que permiten el manejo de la instrumentalización, ajustando variables y aspectos



de funcionamiento de los equipos. A continuación, se presentan algunos ejemplos aplicables a los procesos de beneficio y transformación:

**Tabla 12. Ejemplos de los procesos de beneficio y transformación.**

Proceso	Variable	Equipo o sistema	Actividad
Trituración	Nivel de llenado	Trituradora	Modificar el flujo de material para tener el nivel de llenado óptimo, haciendo eficiente el funcionamiento del equipo según las necesidades de la operación.
Molienda	Granulometría	Molino SAG	Modificar el número de revoluciones por minuto y número de bolas utilizadas en el proceso para ajustar la granulometría del material.
Flotación	Flujo de Aire	Celdas de flotación	Modificar el flujo de aire para garantizar las características adecuadas de la burbuja.
	Nivel de espuma		Modificar el flujo de pulpa y dosificación de reactivos en las celdas de flotación para garantizar la eficiencia del proceso.
Fundición	Temperatura	Hornos	Modificar la temperatura en los hornos de fusión y conversión
Lixiviación	Concentración de ácido sulfúrico	Solución lixivante	Modificar la concentración de ácido sulfúrico utilizado en la solución aplicada en las pilas de lixiviación
Biolixiviación	Nutrientes	Solución biolixivante	Modificar las características de la solución biolixivante agregando nutrientes que permitan el desarrollo bacteriano

Fuente: ATG Ltda., (2022).

### 7.7.3 Lineamiento No. 4. Realizar el mantenimiento a los equipos e instalaciones de la planta

#### 7.7.3.1 Componente 1. Mantenimiento preventivo

##### a. Alcance

Mantener continuidad y eficiencia operacional.

##### I. Información requerida

- Fichas técnicas de los equipos y sistemas.
- Datos de inspecciones y funcionamiento de equipos.

##### II. Actividades a desarrollar

#### ¿Cómo definir el mantenimiento preventivo de los equipos e instalaciones de la planta de beneficio y transformación?

- a. Según las fichas técnicas de los equipos y sistemas, siendo comparadas con los datos de operación de los mismos. Ejemplo, mantenimiento a partir de *Horas de trabajo / año*.



**b.** Definir el mantenimiento a partir de la identificación de desgastes o ineficiencias de los equipos y sistemas a través de la inspección rutinaria. Ejemplo, desgaste de componentes o partes de los equipos.

**c.** Para garantizar la continuidad operacional se debe contar con equipos de respaldo que sean utilizados durante la ejecución del mantenimiento preventivo.

### 7.7.3.2 Componente 2. Mantenimiento predictivo

#### a. Alcance

Mantener continuidad y eficiencia operacional.

#### I. Información requerida

- Datos de funcionamiento y rendimiento de los equipos durante la operación de la planta.

#### II. Actividades a desarrollar

**¿Cómo definir el mantenimiento predictivo de los equipos e instalaciones de la planta de beneficio y transformación?**

- a. Análisis de datos para identificar el funcionamiento de los equipos y los sistemas aplicando software para predecir posibles fallas o ineficiencia que puedan ser corregidos desarrollando mantenimiento predictivo.
- b. Para garantizar la continuidad operacional se debe contar con equipos de respaldo que sean utilizados durante la ejecución del manteniendo predictivo.

### 7.7.4 Lineamiento No. 5. Seguimiento y control ambiental

#### 7.7.4.1 Componente 1. Calidad del medio ambiente

#### a. Alcance

Garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

#### I. Información requerida

- Normatividad ambiental vigente.
- Resultados de monitoreo de del recurso hídrico, suelo y aire.
- Identificación de los residuos generados en la operación.



## II. Actividades a desarrollar

### ¿Cómo garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente?

a) **Recurso hídrico:** el agua es un recurso que cumple un papel fundamental en los procesos de beneficio y transformación del cobre, siendo utilizado en volúmenes considerables para el desarrollo de la molienda, flotación y electrorrefinación de sulfuros primarios, biolixiviación y electroobtención de sulfuros secundarios, lixiviación, extracción por solvente y electroobtención de óxidos de cobre o para la biolixiviación desarrollada en los dos tipos de cobre. Aunque en los procesos se puede desarrollar reúso del recurso, implementando por ejemplo sistemas de recirculación o recuperación de vapor de agua, existirán volúmenes que tendrá que ser vertidos, siendo necesario el monitoreo constante de las características físico- químicas de los residuos líquidos generados en la actividad minera, según lo establecido y en cumplimiento del Decreto 631 de 2015, MADS o el que haga sus veces.

El monitoreo de los parámetros físico químicos del agua no solo garantiza el cumplimiento normativo, a su vez suministra datos para ajustar los procesos de tratamiento implementados, siendo una herramienta fundamental para identificar afectación a cuerpos de agua ubicados en el área de influencia directa e indirecta del proyecto, que en muchos casos son fuente de suministro para comunidades o partes fundamentales en la dinámica ambiental del territorio.

A continuación, se presentan algunas medidas y acciones enfocadas a tener control y cumplimiento normativo de la calidad del agua residual generada en la planta de beneficio y transformación del cobre:

- Caracterización del agua residual generada en cada uno de los procesos de beneficio y transformación para establecer tratamiento y potencialidad de reutilización.
- Monitoreo continuo en punto de vertimiento.
- Monitoreo continuo aguas arriba y abajo del cuerpo de agua superficial en donde se realiza el vertimiento.
- Para procesos de lixiviación, monitoreo de las propiedades físico químicas del agua de fuentes de agua subterráneas a través de pozos de monitoreo.
- En el desarrollo de la biolixiviación, es necesario realizar monitoreo continuo de la posible generación de Drenaje Ácido Minero que puede afectar el suelo o fuentes de agua superficiales y subterráneas (ver, Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas



para estandarizar los procesos relacionados con Drenajes Ácidos Mineros (DAM), Ministerio de Minas y Energía, 2021).

**b) Recurso suelo:** para garantizar la protección del recurso y el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente, es necesario identificar las posibles afectaciones derivadas de los procesos de beneficio y transformación del cobre, relacionadas a su calidad y estabilidad.

- En el desarrollo de la lixiviación de óxidos de cobre, es necesario realizar monitoreo continuo mediante la toma de muestras de suelo para identificar posible contaminación derivada de filtraciones por fallas en la impermeabilización del terreno.
- Los relaves generados en los procesos de beneficio y transformación del cobre son dispuestos a través de presas o depósitos de relaves, la calidad del suelo y la estabilidad del terreno deben ser monitoreadas de manera continua. (ver Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves, Ministerio de Minas y Energía, (2021)), ya que se puede ver afectada la operación y la comunidad habitante del área por eventos como fenómenos de remoción en masa.

**c) Calidad del aire:** la calidad del aire se puede ver afectada por la generación de emisiones de material particulado y gases provenientes de los procesos de beneficio y transformación del cobre, impactando a los colaboradores del proyecto minero y a la población el área de influencia del proyecto, por lo cual es necesario realizar el monitoreo de las variables establecidas y el cumplimiento de los niveles máximos permisibles definidos en la normatividad de calidad del aire vigente (Resolución 2254 de 2017, Decreto 1076 de 2015 Único Reglamentario del Sector Ambiente, MADS, o quien haga sus veces), llevando a cabo, por ejemplo, las siguientes actividades.

- Control de material particulado en los procesos de trituración y molienda.
- Monitoreo, manejo y tratamiento continuo de los gases generados en el proceso de fundición.

**d) Ruido:** Los niveles de ruido generados desde los procesos de beneficio y transformación del cobre pueden ser considerables, por lo que se debe tener monitoreo continuo de estos, en aras de establecer medidas de control que permitan minimizar el impacto generado al personal minero y a la comunidad presente en el área de influencia del proyecto. Evaluando los parámetros establecidos en los estándares máximos de emisión de ruido y ruido



ambiental (Resolución 627 de 2006, MADS o la entidad que haga sus veces). Entre las medidas que se encuentran para el manejo del ruido generado en la planta de beneficio y transformación, se encuentran las siguientes:

- Suministro de elementos de protección auditiva para el personal que se encuentre en la planta de beneficio y transformación.
- Instalación de barreras y/o paredes acústicas para disminuir la emisión de ruido ambiental.
- Mantenimiento de equipos en buen funcionamiento.

**e) Residuos sólidos:** en los procesos de beneficio y transformación del cobre se generan residuos sólidos que deben ser manejados buscando aplicar principios de economía circular para su reutilización, reciclaje y reúso. Por otro lado, los residuos peligrosos deben ser gestionados considerando su almacenamiento temporal, movilización y disposición final, según lo establecido en la normatividad vigente (Decreto 1076, 2015, Título 6)

#### 7.7.4.2 Componente 2. Uso eficiente de recursos

##### a. Alcance

Controlar el uso de recursos en el desarrollo del proceso productivo.

##### I. Información requerida

- Entradas y salidas de materia y energía de los procesos.
- Mediciones de consumo de recursos.

##### II. Actividades a desarrollar

#### ¿Cómo controlar el uso de recursos en el desarrollo del proceso productivo?

El recurso hídrico y la energía eléctrica son fundamentales para el funcionamiento de equipos e instalaciones propias de los procesos de beneficio y transformación, su gestión y uso eficiente tienen incidencia directa en aspectos técnicos, operacionales, ambientales y económicos. Por tal motivo es necesario implementar estrategias encaminadas a su optimización.

- a. Medición continua del volumen de agua utilizada y consumo eléctrico en los procesos unitarios de beneficio y transformación.
- b. Aplicar indicadores que permitan establecer el uso eficiente de recursos. Estos pueden ser aplicados al proceso y a rendimiento de equipos. Por ejemplo:





- **Indicadores de eficiencia de consumo de energía eléctrica**

- ✓ **Consumo de energía:** consumo por unidad de producto o cantidad de energía eléctrica necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de Energía} = \frac{\text{Consumo Total de Energía (mes)}}{\text{Toneladas de concentrado producidas (mes)}}$$

- ✓ **Rendimiento energético:** consumo de energía estimado por procesos vs consumo real de energía en el proceso

$$\text{Rendimiento Energico} = \frac{\text{Consumo energía estimado en la trituración (mes)}}{\text{Consumo real de la trituración (mes)}} \times 100$$

- **Indicadores de eficiencia del uso del agua**

- ✓ **Consumo de agua:** consumo por unidad de producto o cantidad de agua necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Volumen de agua (m3)}}{\text{Toneladas de concentrado (Ton)}}$$

- ✓ **Gestión del recurso:** permite estimar el consumo por unidad de producto o cantidad de agua necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Volumen de agua recirculada en el proceso(m3)}}{\text{Volumen de agua utilizada en el proceso(m3)}}$$

- **Indicadores de manejo de subproductos generados en el beneficio y transformación del cobre**

- ✓ **Gestión de relaves:** evidencia la gestión de los relaves generados a través de su aprovechamiento

$$\text{Gestión de relvades} = \frac{\text{Relaves generados (Ton)}}{\text{Relaves aprovechados (Ton)}}$$

a. Implementación de tecnologías que permitan reutilizar y minimizar el gasto de los recursos. Por ejemplo, filtros cerámicos para el filtrado de relaves, en los que se recupere un considerable porcentaje de agua contenido en estos para reutilizar en el proceso.



**b.** Identificación de pérdidas o ineficiencias en el uso de los recursos a partir del análisis de los datos operacionales para realizar ajustes y correcciones a los procesos.



## **7.8 LÍNEA ESTRATÉGICA - ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE**

*Esta línea estratégica reúne las acciones a desarrollar durante las labores asociadas a los procesos de beneficio y transformación del cobre, constituye una herramienta fundamental para identificar e implementar las medidas que permitan reducir, reusar y/o reciclar (modelo de Basura Cero- 3R) los materiales, agua y/o energía en los procesos.*

### **7.8.1 Aspectos relevantes para la gestión ambiental de los procesos de beneficio y transformación del cobre**

En la actualidad, los procesos desarrollados en el sector minero energético a nivel mundial están incorporando y se direccionan a la aplicación de la Economía Circular, ya que ésta permite eficiencia y mayor aprovechamiento de los recursos, generando beneficios económicos, técnicos, ambientales y sociales, a partir del conocimiento de los procesos particulares de cada proyecto, flujos de energía, recursos y oportunidades de aprovechamiento.

Como su nombre lo indica, la Economía Circular es un concepto económico sostenible, reparador y regenerativo, basado en tres pilares fundamentales: uso de energía renovable, eficiencia energética y uso eficiente de los recursos. El modelo circular plantea que la producción de bienes y servicios incluya el cierre del ciclo de vida de estos, reduciendo el consumo y el desecho de materias primas, agua y energía. Además, la Economía Circular procura extender el ciclo de vida de los productos ya que facilita la reutilización y el reciclaje de materiales y componentes, así como la remanufactura de productos y equipos.

El modelo de Economía Circular en el que se basan los lineamientos aquí descritos, corresponde a Basura Cero, el cual utiliza tres estrategias para su desarrollo, conocidas como las 3R (reducir, reusar y reciclar). En el marco de la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia se reconoce el modelo de Basura Cero como una herramienta para la medición de la Economía Circular en cuestión de materiales y residuos.

La implementación de modelos Basura Cero, con objetivos, metas e indicadores de medición en sus estrategias (reducción, reutilización y reciclaje), se convierten en una herramienta efectiva para verificar los avances en Economía Circular y el uso intensivo de materiales para el sector productivo y las organizaciones en general, adicionalmente para el ODS 12. Producción y consumo responsables.

Finalmente, la prevención en la generación de residuos se relaciona con estrategias de reducción, las estrategias de reutilización garantizan prolongar la vida



útil de los materiales y el reciclaje permite reincorporar materiales nuevamente a cadenas productivas.

### 7.8.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados- ODS

	X		X		X		X
--	---	--	---	--	---	--	---

El desarrollo de la Economía Circular en los procesos para la transformación y beneficio de cobre repercute en el uso eficiente de los recursos hídrico, atmosférico, suelo y de energía, lo que permite que el proyecto esté alineado principalmente a los ODS 6. Agua limpia y saneamiento, ODS 7. Energía Asequible y no contaminante, al ODS 12. Producción y consumo responsables y al ODS 13. Acción por el clima.

### 7.8.3 Lineamiento No. 1. Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre

#### 7.8.3.1 Componente 1. Circularidad en el proceso de trituración y molienda para el beneficio del cobre

##### a. Alcance

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

##### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de trituración y molienda las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

##### II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es usada en el proceso de trituración para humectar el material que se encuentre muy seco, así como para el control de emisiones de material particulado generado por la trituración y molienda del material. En el proceso de molienda es necesario el suministro de agua y la adición de los reactivos requeridos para formar un fluido o pulpa homogénea que permita continuar con el



siguiente proceso de flotación. A continuación, se listan las principales actividades que se pueden realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular:

- a) Realizar la caracterización fisicoquímica de los flujos de agua para conocer su calidad.
- b) Determinar volumen y/o caudal generado, variaciones en el tiempo y tipo de almacenamiento.

**Flujos de materiales/ residuos (metales):** corresponden principalmente a elementos metálicos (varillas, residuos de voladura, entre otros) asociados al proceso de explotación que se encuentran en el material proveniente de la mina y que generan su contaminación, razón por la cual deben ser retirados previo a los procesos de trituración y molienda. A continuación, se listan las principales actividades que se pueden realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular:

- a) Determinar las características, identificando sus contenidos y propiedades.
- b) Determinar volumen generado y tipo de almacenamiento.
- c) Identificar las fuentes, cantidades, variaciones en el tiempo y calidad.

**Flujos de energía:** corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos de trituración y molienda. Es el proceso que genera el mayor consumo energético dentro del beneficio del cobre. A continuación, se listan las principales actividades que se pueden realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular:

- a) Realizar la caracterización energética del proceso (cualitativa y cuantitativa).
- b) Elaboración de gráficos de consumo y producción en el tiempo para determinar la variación del consumo de energía en paralelo con la producción obtenida durante un periodo de tiempo.
- c) Identificar y establecer los índices de eficiencia y plantear metas de reducción de pérdidas en el consumo de energía.

A continuación, se realiza un listado general de las posibles medidas de reducción, reúso y reciclaje que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenecen.

**Tabla 13. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de trituración y molienda**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Reducción de pérdidas de mineral	Flujo de materiales -residuos
	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua



Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reúso	Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso	Flujo de agua
Reciclaje	Reciclaje de residuos metálicos	Flujo de materiales -residuos

Fuente: ATG Ltda., (2022).

## 7.8.3.2 Componente 2. Circularidad en el proceso de concentración del cobre

### a. Alcance 1

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

#### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de concentración del cobre las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

#### II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es el principal recurso del proceso, ya que se requiere para las operaciones de flotación. Asimismo, es objeto de reúso dentro del proceso productivo, ya que durante las operaciones de espesamiento y filtrado de concentrado y del espesamiento y filtrado de relaves se puede recuperar de forma significativa, según se halla contenida en estos. La concentración es el proceso que genera el mayor consumo de agua dentro del beneficio del cobre. A continuación, se listan las principales actividades que se pueden realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular, especialmente en los flujos de agua del espesamiento y filtrado del concentrado y de relaves deshidratados:

- a) Realizar la caracterización fisicoquímica de los flujos de agua para conocer su calidad.
- b) Determinar volumen y/o caudal generado, variaciones en el tiempo y tipo de almacenamiento.

**Flujos de materiales/ residuos (relaves deshidratados):** corresponden a los relaves filtrados resultantes del proceso de concentración, los cuales pueden ser usados en los procesos de retrolenado de la mina como rellenos detríticos cementados. A continuación, se listan las principales actividades que se pueden realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular:



- a) Determinar las características identificando sus contenidos y propiedades
- b) Determinar volumen producido y frecuencia de producción

**Flujos de energía:** corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos para la concentración del mineral de cobre. A continuación, se listan las principales actividades que se puedan realizar para determinar el posible desarrollo de Economía Circular:

- a. Realizar la caracterización energética del proceso (cualitativa y cuantitativa)
- b. Elaboración de gráficos de consumo y producción en el tiempo para determinar la variación del consumo de energía en paralelo con la producción obtenida durante un periodo de tiempo.
- c. Identificar y establecer los índices de eficiencia y plantear metas de reducción de pérdidas en el consumo de energía.

A continuación, se realiza un listado general de las posibles medidas de reducción y reúso que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenece.

**Tabla 14. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de concentración.**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
Reúso	Reúso- Recirculación de agua de procesos con la calidad requerida  (Agua del espesamiento y filtrado del concentrado y de relaves deshidratados).	Flujo de agua
	Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización, por ejemplo, relaves filtrados para procesos de retrolenado de la mina.	Flujo de materiales - residuos

*Fuente: ATG Ltda., (2022).*

## b. Alcance 2

Identificar materiales dispuestos en depósitos de relaves con potencial de recuperación y/o aprovechamiento (biolixiviación de relaves).

### I. Información requerida

- Ubicación y descripción detallada de las zonas de disposición de relaves.
- Tipo de material dispuesto (identificar la composición, teniendo así la posibilidad de determinar qué minerales tienen potencial de recuperación y/o aprovechamiento)





- Método de disposición del material, edad del depósito, volúmenes y secuencia de llenado, así como algunas observaciones que se consideren pertinentes para conocer las características del depósito y de los materiales.

## II. Actividades a desarrollar

### Caracterización del mineral recuperable y/o aprovechable en depósitos de relave para procesos de biolixiviación:

- a) Pruebas físicas (granulometría).
- b) Pruebas químicas de laboratorio (análisis de nutrientes presentes, tipos de microorganismos, diseminación de los minerales, análisis de liberación del mineral).
- c) Análisis químico para determinar la cantidad remanente de minerales de interés en los relaves.
- d) Pruebas hidrometalúrgicas (columnas bacterianas variando temperaturas, entre otras).
- e) Simulaciones tales como mCell, para identificar variables importantes en el funcionamiento de la microbiología.

El potencial de recuperación y aprovechamiento de minerales de interés remanentes en los relaves y debido a la baja de ley que éstos tienen, hace que la única opción económicamente viable sea el desarrollo de procesos de biolixiviación, ya que no sería rentable procesarlos por los métodos tradicionales. La biolixiviación requiere poca inversión de capital, ya que las bacterias pueden ser aisladas a partir de aguas ácidas de minas.

La posibilidad de aprovechar millones de toneladas de mineral cuprífero de descarte acumulado por decenas de años de operación minera fue lo que impulsó a los investigadores a buscar nuevos procesos más baratos y eficientes. Las bacterias lixiviantes permitieron separar el cobre de los minerales sólidos, con los que se encontraba mezclado, haciendo rentable su procesamiento.

#### 7.8.4 Lineamiento No. 2. Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación de cobre

##### 7.8.4.1 Componente 1. Circularidad en procesos pirometalúrgicos

###### a. Alcance 1

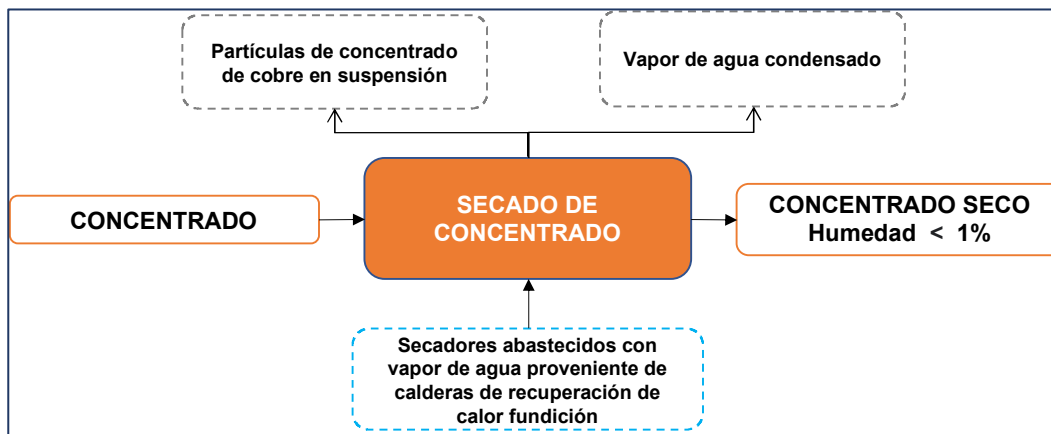
Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de secado de concentrados y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

## I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de secado de concentrados las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

A continuación, se listan las principales entradas y salidas de flujo de agua y materiales del proceso que permiten determinar el posible desarrollo de Economía Circular:



*Figura 9. Diagrama de circularidad en el secado de concentrados de cobre.  
Fuente: ATG Ltda., (2022).*

## II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es usada en el proceso de secado del concentrado en forma de vapor, cuya temperatura puede oscilar desde 180°C hasta 300°C. Asimismo, se produce vapor de agua condensado, el cual se puede dirigir a un estanque recuperador de condensados para su posterior reutilización.

**Flujos de materiales (concentrado de cobre):** corresponden principalmente a las partículas de concentrado de cobre que se encuentran en suspensión en el vapor generado en el secado.

**Flujos de energía:** corresponden a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos para el secado del concentrado. Los equipos requieren de electricidad y combustible y en general, la principal fuente energética corresponde a combustibles cuyo nivel de consumo por tonelada de cátodo de cobre cátodo varía entre 300 y 500 kWh. (Ministerio de Energía, s.f.)

A continuación, se realiza un listado general de las posibles medidas de reducción y reúso que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenece.

**Tabla 15. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de secado de concentrados**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
Reúso	<b>Reúso de vapor de agua:</b> Reúso de vapor de agua para el desarrollo del proceso, el cual proviene generalmente de la temperatura emitida por las calderas de recuperación de calor de los gases generados en la fundición	Flujo de agua
	<b>Recuperación de partículas en suspensión:</b> Recuperación de partículas de polvo del vapor producido durante el secado, las cuales pasan por un filtro de mangas en donde se recuperan las partículas sólidas, las que se dirigen y adicionan a la tolva de almacenamiento de concentrado seco que ya pasó por el proceso de secado.	Flujo de materiales
	<b>Recuperación de condensados:</b> El vapor de agua condensado (líquido) se dirige a un estanque recuperador de condensados para su posterior reutilización.	Flujo de agua

Fuente: ATG Ltda., (2022).

## b. Alcance 2

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de la Fundición de concentrados y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar y definir claramente las entradas y salidas en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso de fundición de cobre con las operaciones unitarias de fusión, conversión y pirorrefinación.



Figura 10. Esquema de insumos y productos del proceso de fusión de concentrados de cobre.

Fuente: (COCHILCO, 2015, p.).



**Figura 11. Esquema de insumos y productos del proceso de conversión de mata de cobre.**  
 Fuente: (COCHILCO, 2015, p.).



**Figura 12. Esquema de insumos y productos del proceso de refinación de cobre blíster.**  
 Fuente: (COCHILCO, 2015, p.).

## II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua usada en el proceso de fundición puede ser condensada y recirculada en su totalidad dentro del mismo proceso, lo que generaría una mínima emisión de vapor de agua.

**Flujos de materiales (metal blanco y escoria) / gases primarios:** corresponden principalmente a las partículas de metal blanco y escoria que se encuentran en suspensión en el vapor generado en la fusión y las de escoria que se generan en los procesos de conversión y refinación. Asimismo, se pueden recuperar gases primarios en planta de limpieza de gases para la producción de ácido sulfúrico requerido para procesos dentro del mismo proyecto.

**Flujos de energía:** corresponden a la energía requerida para el funcionamiento de los hornos de fusión, conversión y pirorrefinación.

A continuación, se realiza un listado general de las posibles medidas de reducción, reúso y reciclaje que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenece.



**Tabla 16. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de fundición.**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
Reúso	Recuperación de mata Fusión secundaria de escoria	Flujos de materiales/ residuos (escorias)
	<b>Recuperación de vapor:</b> Reúso de vapor saturado proveniente de las calderas de recuperación de calor de los gases generados en los respectivos hornos de fusión y conversión	Flujo de agua
	<b>Recuperación de partículas en suspensión:</b> Los gases generados por la extracción (metal blanco y escoria), son captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al Horno de Fusión)	Flujos de materiales
Reciclaje	<b>Recuperación de gases primarios para la producción de ácido sulfúrico:</b> La recuperación se realiza en plantas de limpieza de gases cuyo objetivo es acondicionar los gases metalúrgicos primarios (SO <sub>2</sub> , humo, vapores metálicos, partículas de cobre arrastradas y material particulado) para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Flujos de materiales
	<b>Escoria:</b> La escoria de cobre se emplea en diversos sectores productivos como sustituto parcial del cemento hidráulico, en gravilla para líneas de ferrocarriles, como árido en mezclas asfálticas de obras civiles, como árido constituyente de los morteros y hormigones de cemento, como abrasivos para la limpieza por chorros de arena en estructuras metálicas y en bloques moldeados de escoria para la albañilería.	Flujos de materiales

Fuente: ATG Ltda., (2022).

### c. Alcance 3

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de Electrorrefinación y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

#### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de Electrorrefinación las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

#### II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es usada en el proceso de Electrorrefinación para preparar las soluciones de las celdas electrolíticas.

**Flujos de materiales (soluciones de las celdas electrolíticas y ánodos de cobre):** corresponden principalmente a las soluciones usadas en las celdas



electrolíticas ( $H_2SO_4 + H_2O$ ). Asimismo, se usan los ánodos de cobre provenientes del proceso de fundición.

**Flujos de energía:** corresponden a la energía requerida para el funcionamiento de las celdas electrolíticas.

A continuación, se realiza un listado general de las posibles medidas de reducción, reúso y reciclaje que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenece.

**Tabla 17. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de Electrorrefinación.**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
Reúso	<b>Reúso de soluciones:</b> Recalibración de las concentraciones de las soluciones	Flujos de materiales
Reciclaje	<b>Reciclaje de ánodos:</b> Al final de un ciclo, cada ánodo ha sido disuelto electroquímicamente en casi el 85%. Los restos de los ánodos sin disolver (desperdicio o chatarra) se retiran de las celdas y después de lavados, se funden y se vuelven a vaciar como ánodos nuevos.	Flujos de materiales
	<b>Recuperación de metales preciosos del lodo anódico:</b> Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son transportados a la planta de recuperación de metales preciosos	Flujos de materiales

Fuente: ATG Ltda., (2022).

#### 7.8.4.2 Componente 2. Circularidad en procesos hidrometalúrgicos

##### a. Alcance

Identificar y cuantificar los sobrantes (salidas de agua y/o materiales) para determinar su potencial de reúso.

##### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de transformación hidrometalúrgica las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

##### II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es usada en el proceso de transformación hidrometalúrgica como insumo fundamental para el sistema de riego y goteo de la



mezcla de  $H_2SO_4 + H_2O$  para el desarrollo del proceso de lixiviación. El agua también es usada en las etapas de extracción por solvente y en el proceso de electroobtención.

**Flujos de materiales (ácidos, solventes, soluciones de lixiviación y rípios de lixiviación):** los reactivos normales en el proceso de lixiviación suelen ser ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados. Asimismo, son usadas resinas orgánicas para la captura de los iones de cobre en el proceso de extracción por solvente. El material no diluido en el proceso de lixiviación o rípio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal.

**Flujos de energía:** corresponden a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos para la extracción por solvente y de las celdas electrolíticas.

A continuación, se presenta un listado general de las posibles medidas de reducción, reúso y reciclaje que se pueden implementar en el proceso, indicando el tipo de flujo al cual pertenecen.

**Tabla 18. Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de hidrometalurgia.**

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso	Flujo de energía/ materiales -residuos /agua
Reúso	<b>Recolección y reúso de soluciones:</b> Recolección por medio de sistema de canaletas en las pilas de lixiviación.	Flujos de materiales
	Recalibración de las concentraciones de las soluciones para su posterior reúso.	
	Reúso- Recirculación de agua de procesos con la calidad requerida	Flujo de agua
Reciclaje	<b>Reúso de rípio de lixiviación:</b> El material no diluido en el proceso de lixiviación o rípio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal.	Flujos de materiales
	<b>Recuperación de metales preciosos del lodo anódico:</b> Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son transportados a la planta de recuperación de metales preciosos	Flujos de materiales
	<b>Rípios de lixiviación:</b> Usos alternativos. Por ejemplo, uso en hormigones de cemento de estructuras secundarias, de corta vida útil y en ambientes de desempeño de baja humedad.	Flujos de materiales

Fuente: ATG Ltda., (2022).





### 7.8.4.3 Componente 3. Circularidad en el proceso de biolixiviación

#### a. Alcance

Identificar y cuantificar los sobrantes (salidas de agua y/o materiales) para determinar su potencial de reúso

#### I. Información requerida

- **Diagrama de potencial desarrollo de circularidad del proceso**

Determinar para el proceso de biolixiviación las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de materiales, agua, energía y demás asociados al proceso.

#### II. Actividades a desarrollar

**Flujos de agua:** el agua es el recurso más usado en el proceso de biolixiviación.

En este proceso se identifica potencial desarrollo de circularidad en términos de recuperación y reúso de aguas ácidas generadas por la acción de las bacterias. Se puede considerar el reúso de aguas asociadas a Drenaje Ácido de Mina (DAM).

**Flujos de materiales (ripios de biolixiviación):** el material no diluido en el proceso de biolixiviación o ripio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de biolixiviación para extraer más metal.



## 8 RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

A continuación, se presentan algunas conclusiones relacionadas con la minería de cobre y en particular, las que inciden en los procesos de beneficio y transformación del mineral.

- Para controlar y evaluar un proceso industrial de beneficio y transformación, se debe conocer su sustento científico, el fundamento operativo y la experiencia operacional.
- Para la ejecución del proceso de molienda se recomienda que se lleve a cabo en húmedo, debido a que tiene las ventajas de generar menor polución, menor contaminación acústica y mayores facilidades de transporte (pulpa).
- Para el beneficio y la transformación de mineral de cobre se requiere identificar variables que correspondan con el tipo de mineral que se va a procesar, estableciendo el tipo de procesos y equipos que llevarán el mineral a un producto final de cobre blíster, mediante pruebas de laboratorio y de planta piloto que alcancen el máximo rendimiento en aspectos energéticos, ambientales y económicos.
- Los equipos utilizados para el proceso de Electrorrefinación del cobre dependen de la cantidad de mineral a tratar, siendo su objetivo extraer los restos de oxígeno presentes en el cobre blíster, incrementando la pureza del mineral, pasando por hornos anódicos en los que se inyecta gas natural con vapor de aire y reduciendo el nivel de oxígeno presente en el material fundido hasta alcanzar cátodos de 99,97% de pureza.
- La lixiviación en pilas se aplica ampliamente en América, donde se lixivian minerales de óxidos y sulfuro secundarios. Se espera que esta técnica continúe aportando a la producción hidrometalúrgica del cobre, porque es una técnica simple, robusta, flexible y de bajo costo. Con base en los lineamientos para el desarrollo del proceso de la transformación hidrometalúrgica se estima que con buenas prácticas se logren optimizar los procesos de trituración, curado, conformación de pilas, impermeabilización, construcción de pilas, aireación, actividad bacteriana, control de procesos, extracción por solvente y electroobtención que permitan obtener unas eficiencias de recuperación de cobre óptimas y se puedan implementar en el país.
- La lixiviación por agitación es una tecnología todavía costosa, pero que puede dar recuperaciones más altas de cobre, motivo por el que se continúan mejorando los diseños, materiales, tecnología y procesos para bajar los costos y se constituya en una ruta factible para el tratamiento



hidrometalúrgico en la recuperación de sulfuros de cobre en condiciones controladas.

- El procesamiento de sulfuros de cobre primario y secundario por la tecnología de la biolixiviación sigue siendo un importante campo de interés para el proceso hidrometalúrgico, debido a su gran potencial y viabilidad económica. El desarrollo de la tecnología sigue avanzando hacia la madurez con grandes esfuerzos por mejorar la cinética y las condiciones del medio para su óptimo desarrollo.
- En el tema de la relación de escalas, la pirometalurgia, por los montos que produce, está diseñada para tratar grandes cantidades de cobre, sin embargo, la hidrometalurgia tiene la flexibilidad de realizar el tratamiento metalúrgico en distintos tamaños de producción. A partir de las estimaciones de reservas del mineral en los diferentes proyectos que hay en el país y las limitaciones del territorio, es importante considerar la implementación del tratamiento hidrometalúrgico para realizar los procesos de beneficio y transformación del cobre.
- Los avances tecnológicos permiten monitorear y evaluar los procesos en tiempo real, optimizando el tiempo para realizar ajustes inmediatos para controlar las decisiones operativas en la planta.
- La mayor parte de las compañías mineras más competitivas del mundo impulsaron una estrategia de inversión en yacimientos e instalaciones adyacentes, atendiendo a que las fundiciones y refinerías de cobre tienen rentabilidades menores que la minería, ya que dependen principalmente de su competitividad tecnológica y de gestión, a diferencia de las minas de cobre, las que además tienen la calidad del yacimiento como fuente de la renta que perciben.

### **Con relación a los impactos ambientales:**

Los procesos de beneficio y transformación del cobre generan impactos principalmente en los componentes atmosférico, hidrológico y de suelos.

1. En el proceso de beneficio del cobre se presenta la emisión de material particulado durante la trituración y molienda del mineral. Las medidas de mitigación que deben implementarse están relacionadas con la humectación del material y la aspersion de agua en los equipos de trituración y molienda. El proceso de beneficio también incluye la flotación y concentración de cobre y estos procesos generan impactos principalmente en el componente hídrico debido al elevado consumo que se requiere para el desarrollo del proceso, otro impacto es la generación de relaves. Los relaves deben ser gestionados



con buenas prácticas tales como deshidratación que permiten no solo la recuperación de agua para su posterior reúso, sino también la disposición en depósitos que generan la reducción de los impactos ambientales asociados a las estructuras para disposición de relaves húmedos (presas de relaves). Disponer relaves deshidratados genera también reducción de la posibilidad de generación de DAM.

2. Para la transformación del cobre y según la mineralogía del material (óxidos o sulfuros) se pueden realizar procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos; los primeros generan principalmente afectación ambiental relacionada con la calidad del aire, por las emisiones de SO<sub>2</sub>, gases y partículas generadas en los hornos de fundición, y los segundos generan principalmente afectación a la calidad del agua y el suelo debido a los procesos de lixiviación que son realizados principalmente con ácido sulfúrico.
3. La alternativa para los procesos de lixiviación es la biolixiviación ya que este proceso no requiere ácido sulfúrico para su desarrollo, sino que a través de bacterias se genera la lixiviación del mineral de cobre, el cual se envía posteriormente al proceso de extracción por solvente. Asimismo, el proceso de biolixiviación puede ser una alternativa para el uso de aguas que tienen afectación por el DAM.

### **Con relación a la Economía Circular:**

Los procesos de beneficio y transformación del cobre presentan una alta potencialidad para el desarrollo de la economía circular. Se pueden implementar prácticas de reducción, reúso y reciclaje en la mayoría de los procesos para la obtención de cobre.

1. En el proceso de beneficio la más alta potencialidad para el desarrollo de la economía circular está relacionada con los relaves resultantes de la flotación y concentración del cobre. Se presenta potencial para reúso de agua residual que puede reincorporarse al proceso; reúso de relaves filtrados para procesos de retrolleado en la mina y una potencialidad para extracción de cobre en relaves con baja ley por el método de biolixiviación.
2. En el proceso de transformación por la vía de la pirometalurgia, se presenta la posibilidad de recuperación de gases tales como SO<sub>2</sub> para la producción de ácido sulfúrico requerido para el desarrollo de la lixiviación. También se genera escoria y chatarra de cobre que se puede reincorporar al proceso para la obtención de cobre. Se pueden recuperar metales preciosos del lodo anódico generado en los procesos de electrorrefinación.



3. En el proceso de la hidrometalurgia se genera potencial desarrollo de economía circular con el reúso de los agentes lixiviantes, disminuyendo también el consumo de estos ácidos. También se genera la posibilidad de reusar los ripios de lixiviación mediante la lixiviación secundaria para obtener el cobre que se encuentre contenido en éstos. Se pueden recuperar metales preciosos del lodo anódico generado en los procesos de electroobtención.

### **Con relación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible- ODS:**

Los procesos de beneficio y transformación del cobre están directamente relacionados con los siguientes ODS:

- ODS 6 – Agua limpia y saneamiento
- ODS 7 – Energía asequible y no contaminante
- ODS 12 - Producción y consumo responsable
- ODS 13 - Acción por el clima

1. El uso eficiente del recurso hídrico, la prevención en la generación de DAM, el control de posibles derrames o afectación asociada a los procesos de lixiviación y el adecuado tratamiento de las ARD de los procesos, permite que el proceso esté alineado al ODS 6. Agua limpia y saneamiento.
2. El uso eficiente de la energía en los procesos, mediante la implementación de tecnologías que disminuyan el consumo, así como la transición a la transición energética que consiste en el remplazo gradual de los combustibles fósiles por fuentes de energía renovables como la hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, entre otras, permite que el proceso esté alineado al ODS 7. Energía asequible y no contaminante.
3. La implementación de buenas prácticas durante todo el desarrollo del proceso productivo para el beneficio y la transformación del cobre, permitirá que se realice un uso eficiente y racional de recurso hídrico y de la energía, asimismo, que sean prevenidos o mitigados impactos ambientales a los componentes atmosférico y suelo y que sean aprovechados los subproductos del proceso en el marco de la economía circular. Las buenas prácticas permiten que el proyecto se encuentre alineado al ODS 12. Producción y consumo responsable.
4. Dentro del proceso de beneficio y transformación del cobre la fundición es el proceso que genera mayor afectación a la calidad del aire por las emisiones de SO<sub>2</sub>, gases y partículas generadas en los hornos de fundición. El adecuado tratamiento y manejo, potencializando la reducción de la

**MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA – ATG LTDA.**  
CONTRATO DE CONSULTORÍA GGC-631-2022  
CONCEPTUALIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA DE  
LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE BUENAS PRÁCTICAS PARA  
ESTANDARIZAR LOS PROCESOS ASOCIADOS A LA MINERÍA  
DE COBRE Y OTROS MINERALES, ACORDE CON LAS  
EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.



**MINISTERIO DE MINAS Y  
ENERGÍA**



generación de gases y el reúso de estos, permite que el proyecto esté alineado con el ODS 13. Acción por el clima.



## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrades, R.A. (2016). *Estandarización del proceso planificación minera del presupuesto división El Teniente*. Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141058/Estandarizacion-del-proceso-planificacion-minera-del-presupuesto-revision-0-Division-El-Teniente-Codelco-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- AngloGold Ashanti. (s.f). *Quebradona Esencia para la transición energética*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://anglogoldashanticolombia.com/portfolio/quebradona/>
- Arriagada, M. A. (2013). *Hidrometalurgia - Curso de Molienda (Primera Parte)*. Obtenido de [es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633](https://es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633)
- ATG Ltda. (2022). *Asesorías Técnicas y Geológicas* .
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. (6 de octubre de 2022). *Proyectos de Interés en Evaluación Soto Norte*. Obtenido de [https://www.anla.gov.co/01\\_anla/documentos/normativa/leyes/177.pdf](https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/normativa/leyes/177.pdf)
- Ávila Pinto, R. (2021). *Libro blanco del cobre en Colombia*. Colombia.
- Bnamericas (2022). Bajo la lupa: los desafíos de las fundiciones de cobre de Chile. (junio 30 de 2022) <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bajo-la-lupa-los-desafios-de-las-fundiciones-de-cobre-de-chile>
- Boletín Agrario. *Xantato - ¿Qué es xantato? - significado, definición, traducción y sinónimos para xantato*. Obtenido de <https://boletinagrario.com/ap-6,xantato,821.html>
- Bravo Gálves, A. C. (2003). *Manual de molienda y clasificación empresa minera Yauliyacu S.A. Casapalca*.
- Britannica. (n.d.). *mate | metalurgia | británica*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.britannica.com/technology/matte-metallurgy>
- Bustamante Escobedo, M. (2020). *Diseño óptimo de circuitos de flotación*. [https://inglomayor.cl/edicion\\_18/a/paper4.pdf](https://inglomayor.cl/edicion_18/a/paper4.pdf)
- Centro de Inversión Sostenible de la Universidad de Columbia [CCS]. (2016). *Cartografía de la minería en relación con los objetivos de desarrollo sostenible*. [https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping\\_Mini ng\\_SDGs\\_An\\_Atlas\\_SP.pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mini ng_SDGs_An_Atlas_SP.pdf)
- Codelco Educa. (2018a). *Biolixiviación “Bacterias come piedras”*. Chile. [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004857/biolixiviacionmedia\\_tcnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004857/biolixiviacionmedia_tcnico_060119.pdf)
- Codelco Educa. (2018b). *Chancado “Reduciendo la roca”*. Chile. [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancadomedia\\_tcnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancadomedia_tcnico_060119.pdf)
- Codelco Educa. (2019a). *Electroobtención “Obteniendo la máxima pureza”*. Chile. [https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencionmedia\\_tcnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencionmedia_tcnico_060119.pdf)





- Codelco Educa. (2019b). *Electrorrefinación "Ánodos y cátodos se encuentran"*. Chile.  
[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorefinacion media t cnico 060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorefinacion%20media%20t%C3%A9cnica%20060119.pdf)
- Codelco Educa. (2019c). *Flotación "Burbujas de cobre"*. Chile.  
<https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- Codelco Educa. (2019d). *Lixiviación "El riego"*. Chile.  
[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion media t cnico 080119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion%20media%20t%C3%A9cnica%20080119.pdf)
- Codelco Educa. (s.f)c. *Fundición "Recién salido del horno"*. Chile: Codelco Educa. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/fundicion.html#:~:text=%22Reci%C3%A9n%20salido%20del%20horno%22,un%20cobre%20de%20mayor%20pureza.>
- Codelco Educa. (s.f.)a *Exploración "En búsqueda del metal rojo"*.  
[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploracion media 060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploracion%20media%20060119.pdf)
- Codelco Educa. (s.f.)b. *Extracción subterránea: El cobre profundo*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/extraccion.html#:~:text=Extracci%C3%B3n%20es%20la%20etapa%20que,de%20cobre%20de%20alta%20pureza.>
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2007). *Buenas Prácticas y uso eficiente de agua en la industria Minera*. Chile.  
[https://www.academia.edu/30924783/BUENAS PR%C3%81CTICAS Y USO EFICIENTE DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA](https://www.academia.edu/30924783/BUENAS_PR%C3%81CTICAS_Y_USO_EFICIENTE_DE_AGUA_EN_LA_INDUSTRIA_MINERA)
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2015a). *Tecnologías en fundiciones de cobre*. Ministerio de Minería de Chile.  
[https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias\\_fundiciones\\_v1.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf)
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2015b). *Reseña de la Innovación Tecnológica en la Minería del Cobre: "El Caso Codelco"*. Chile.  
<https://docplayer.es/11955517-Resena-de-la-innovacion-tecnologica-en-la-mineria-del-cobre-el-caso-codelco-dg-12-05.html>
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Chile.  
[https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/sulfuros%20primarios desaf%C3%ADos%20y%20oportunidades.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/sulfuros%20primarios_desaf%C3%ADos%20y%20oportunidades.pdf)
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (29 de Marzo de 2022). *CONPES 4075 de 2022*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)a. *Biolixiviación*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de



<https://www.codelco.com/sustentabilidad/publicaciones/informe-sustentable/biolixiviacion>

Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)b. *Glosario*.  
[https://www.codelco.com/flipbook/reporte\\_sustentabilidad/2011/sitio/pdf/glosario.pdf](https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2011/sitio/pdf/glosario.pdf)

Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. *Glosario de conceptos mineros*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de  
[https://www.codelco.com/glosario/prontus\\_codelco/2016-06-22/175933.html](https://www.codelco.com/glosario/prontus_codelco/2016-06-22/175933.html)

Decreto 1076 de 2015. [Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015.  
[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=7153](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=7153)

Decreto 284 de 2018 [Departamento Administrativo de la Función Pública]. Por el cual se adiciona el Decreto 10476 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y electrónicos -RAEE y se dictan otras disposiciones. 15 de febrero de 2018.  
[https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma\\_pdf.php?i=85199](https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=85199)

Delgado Abril, G. G. (2016). *Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo – plata - cobre de sociedad minera corona S.A.* Perú.

Departamento Nacional de Planeación. (2016, 21 de noviembre). Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. (Documento CONPES 3874).  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2016, 8 de agosto). *Política Nacional de Desarrollo Productivo de 2016*. (Documento CONPES 3866).  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2016, 8 de agosto). Política Nacional de Desarrollo Productivo. (Documento CONPES 3866).  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2018, 10 de julio). *Política de crecimiento verde*. (Documento CONPES 3934). <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Pol%C3%ADtica%20CONPES%203934/CONPES%203934%20-%20Pol%C3%ADtica%20de%20Crecimiento%20Verde.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2018, 15 de marzo). Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. (Documento CONPES 3918).  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>

Departamento Nacional de Planeación. (2022, 29 de marzo). Política de Transición Energética. (Documento CONPES 4075).  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>



- Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [DAASU-MADS] (2020). Listado de impactos ambientales específicos en el marco del licenciamiento ambiental. <https://www.andi.com.co/Uploads/listado-de-impactos-ambientales-espec%C3%ADficos-en-el-marco-del-licenciamiento-ambiental.pdf>
- Domic Mihovilovic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago, Chile.
- Doroteo Reyes, E. (2009). *Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos*.
- Ellen MacArthur Foundation (s.f). *Introducción a la economía circular ¿Qué es una economía circular?* Recuperado el 6 de Octubre de 2022 de <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- FAusIMM, M. R., P.Geo., R. S., & FAusIMM, B. D. (2022). *Reporte técnico NI 43 - 101*. Colombia.
- Freeport - McMoRan (s.f.). *La marca del cobre*. Recuperado el 30 de septiembre de 2022 de <https://www.fcx.com/sustainability/coppermark>
- Gardez Incivil. (2021). *Procesos de la Hidrometalurgia del Cobre*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=UFB7pUQ1U44&t=29s>
- Gobierno de Chile - Consejo Minero. (6 de Octubre de 2022). *Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Practicas*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/view/38040834/uso-eficiente-de-aguas-en-la-industria-minera-y-buenas-practicas>
- International Copper study group. (2015). *ICSG statistical database* ([www.icsg.org/index.php/external-database](http://www.icsg.org/index.php/external-database)). Lisbon, Portugal.
- Jones, B., Acuña, F., & Rodríguez, V. (2021). *Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina*. Cepal. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47136-cambios-la-demanda-minerales-analisis-mercados-cobre-litio-sus-implicaciones>
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). *Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países*. CEPAL. Cooperación Alemana. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47451-analisis-economico-cadenas-globales-valor-suministro-cobre-refinado-paises#:~:text=El%20cobre%20de%20mina%20producido,se%20exporta%20actualmente%20en%20concentrados>
- Ley 1333 de 2009. *Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. Julio 21 de 2009. D.O: 47417. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3687>
- Ley 1450 de 2011. *Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014*. Junio 16 de 2011. D.O: 48102. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43101>



- Ley 1753 de 2015. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país. Junio 9 de 2015. D.O: 49538. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=61933>
- Ley 1955 de 2019. Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, pacto por la equidad. Mayo 25 de 2019. D.O: 50964 [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1955\\_2019.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1955_2019.html)
- Ley 685 de 2001. Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. Agosto 17 de 2001. D.O: 44.545. [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0685\\_2001.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0685_2001.html).
- Linares Gutiérrez, N. (2020). *Procesamiento de minerales - mineralurgia*. Colombia: Instituto Nacional de Colombia.
- LME An HKE Company (s.f.) Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <http://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Trading+day+summary>
- Lundgren, D. S. (1980). *Ore leaching by bacteria*. *Annu. Rev. Microbial.*
- Mark E, S. K. (2022). *Extractive Metallurgy of Copper*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128218754/extractive-metallurgy-of-copper>
- Metallurgist. (s.f.) *Floculación Selectiva*. Recuperado el 6 de Octubre de 2022 de <https://www.911metallurgist.com/selective-flocculation/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Listado de Impactos Ambientales específicos en el marco del Licenciamiento Ambiental*. <https://www.andi.com.co/Uploads/listado-de-impactos-ambientales-espec%C3%ADficos-en-el-marco-del-licenciamiento-ambiental.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. [https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf\\_637176135049017259.pdf](https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 4741 de 2005. Residuos peligrosos*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 838 de 2005. Disposición final de residuos sólidos*.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile- Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (en alemán GIZ). (s.f.). *Energía en minería*. Recuperado el Noviembre de 2022, de Eficiencia energética en la minería: <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/fundicion>
- Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente. (2002). *Guía minero ambiental - Beneficio y transformación*. Colombia. <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/865/3%20Gu%EDa%20minero%20>



[20ambiental%20-  
%20Beneficio%20y%20transformaci%20n.pdf;jsessionid=3FE2D397730351F1FC  
A88421127CD82D?sequence=3](https://www.politicanacionalminera.cl/Ministerio%20de%20Medio%20Ambiente%20y%20Transformación%20de%20Recursos%20Naturales%20y%20Ambientales/Archivos/Política%20nacional%20de%20Gestión%20Integral%20de%20Residuos.pdf)

Ministerio de Minería (s.f.). Política nacional Minera.  
<https://www.politicanacionalminera.cl>

Ministerio de Medio Ambiente [MMA]. (1997) Política para la Gestión Integral de Residuos.

[https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/  
pdf/Polit%C3%ACcas de la Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica para la gesti%  
C3%B3n integral de 1.pdf](https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas%20de%20la%20Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica%20para%20la%20gesti%C3%B3n%20integral%20de%20residuos.pdf)

Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. (28 de Mayo de 2015). *Conozca el Marco de Referencia, un instrumento para estructurar la gestión de tecnología en su entidad*. Recuperado el 18 de noviembre de 2022 de <https://mintic.gov.co/portal/inicio/9354>

Naciones Unidas. (1999). *El desarrollo de la minería del cobre en la segunda mitad del siglo XX*. CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Chile. Serie 4. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6391-desarrollo-la-mineria-cobre-la-segunda-mitad-siglo-xx>

Naciones Unidas. (2015) Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Nordmin Engineering Ltd. (2022). *Reporte técnico y estudio de prefactibilidad*. Colombia: Córdoba Minerals. <https://cordobaminerals.com/assets/docs/2019-07-29-san-matias-pea.pdf>

Outletminero. (s.f). *Mina El Teniente alcanza la mayor producción de su historia, Chile*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://outletminero.org/mina-el-teniente-alcanza-la-mayor-produccion-de-su-historia-chile/>

País minero. (21 de septiembre de 2022). Colombia está en la mira de multinacionales para ser potencia mundial en producción de cobre. <https://www.paisminero.com/mineria/mineria-colombiana/25333-colombia-esta-en-la-mira-de-multinacionales-para-ser-potencia-mundial-en-produccion-de-cobre>

Pietrzyk, S., & Tora, B. (2018). *Tendencias en la minería mundial del cobre: Una revisión*. Polonia: IOP Publishing.

Pradhan., N., Nathsarma, K., Rao, K. S., & L.B. Sukla, B. M. (2008). *Heap bioleaching of chalcopyrite*. Elsevier. Minerals Engineering.

Ramírez Oscco, L. A. (2015). *Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración*. Perú.

*Resolución 1312 de 2016*. [Autoridad Nacional de Licencias Ambientales]. Por medio del cual se adoptan los *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-1312-de-2016.pdf>





- Resolución 1326 de 2017. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas y se dictan otras disposiciones. 6 de Julio de 2017. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>
- Resolución 1407 de 2018. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones. 26 de Julio de 2018.
- Resolución 2206 de 2016. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones. 27 de Diciembre de 2016. [https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos\\_referencia/resolucion\\_2206\\_tr\\_mineria\\_2016.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos_referencia/resolucion_2206_tr_mineria_2016.pdf)
- Resolución 40599 de 2015.* [Ministerio de Minas y Energía]. Por medio del cual se adopta el *Glosario Técnico Minero. 27 de mayo de 2015*. Obtenido de [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res\\_40599\\_15\\_glosario\\_tecnico\\_minero.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_40599_15_glosario_tecnico_minero.pdf)
- Robinson, T. G. (2013). *Copper electrowinning-2013 world operating tankhouse data. Vol. V.*
- Rodriguez Vasquez, C. M. (2010). *Criterios de selección de equipos de chancado en una planta concentradora*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rumbo Minero Internacional. (2021). *Rumbominero.com*. Obtenido de <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>
- Schlesinger Mark, Davenport, W., Sole, K., & Alvear Flores, G. (2021). *Extractive Metallurgy of Copper, sixth edition*. Elsevier.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado*. Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado*. Colombia.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Beneficio y transformación de minerales*. Gobierno de México. Recuperado el 9 de octubre de 2022 de [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html)
- Siezen, R. J. (2009). *Genómica de biolixiviación*.
- Silver, R. (1995). *Minería con microbios, Biotecnología*.
- Sole, K. C., Davenport, W. G., Alvear, G. R., & Schlesinger, M. E. (2021). *Metalurgia extractiva del cobre - Sexta Edición*. Amsterdam.
- SOTO, A. M. (2006). *CARACTERIZACIÓN DE POLVOS DE FUNDICIÓN DE COBRE Y ESTABLECIMIENTO DE RUTAS DE PROCESADO*. BARCELONA.



- Tecnología minera. (8 de abril de 2022). *Los 10 principales países productores de cobre*. [Los 10 principales países productores de cobre - Revista Tecnología Minera \(tecnologiaminera.com\)](https://tecnologiaminera.com)
- Tiempo Minero. (27 de Julio de 2021). *Tiempo Minero*. Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/colombia-busca-ser-el-tercer-mayor-productor-de-cobre-en-latinoamerica-al-2030/>
- Uceda Herrera, D. (2016). *Hidrometalurgia química e ingeniería*. Perú.
- Unidad de Restitución de Tierras y Agencia Nacional de Minería (ANM). (Noviembre de 2015). *Cartilla Minería*. Obtenido de [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla\\_de\\_mineria\\_final.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla_de_mineria_final.pdf)
- Universidad de Santiago de Chile - Departamento de Ingeniería en Minas. (2016). *Dimensionamiento Planta de Hidrometalurgia de Minerales de Cobre*.
- UPME. (2022). *Aprovechamiento de minerales en Colombia bajo el esquema de Economía Circular*. Colombia. [https://www1.upme.gov.co/Documents/Aprovechamiento\\_minerales\\_en\\_Colombia.pdf](https://www1.upme.gov.co/Documents/Aprovechamiento_minerales_en_Colombia.pdf)
- Valdes, J., I., P., R., Q., R.J., D., H., T., & R., B. (2008). *Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from genome sequence to industrial applications*. BMC Genomics.
- Valenzuela Piñeiro, P. (2018). *Análisis de consumo eléctrico y propuesta de medidas de eficiencia energética en procesos de minería en Chile*. Chile. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46138/3560900259712UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas Olivares, A. (2010). *Evaluación técnico-económica de tecnología de conexión multicircuital en proceso de electrorrefinación, refinería No 2. Codelco Chile - División Codelco Norte*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Young, C. A. (2019). *Manual de procesamiento de minerales y metalurgia extractiva para PYMES*. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4hKGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Young,+C.+A.+\(2019\)&ots=1kyp-XFmMQ&sig=s\\_7fN32LIV0LtP97HNVJeEG53MM#v=onepage&q=Young%2C%20C.%20A.%20\(2019\)&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4hKGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Young,+C.+A.+(2019)&ots=1kyp-XFmMQ&sig=s_7fN32LIV0LtP97HNVJeEG53MM#v=onepage&q=Young%2C%20C.%20A.%20(2019)&f=false)