

ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE
APROVECHAMIENTO DE MINERAL DE

COBRE

EN COLOMBIA Y POSIBLES INCIDENCIAS
ECONÓMICAS.

Cu





UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA - UPME

SUBDIRECCIÓN DE MINERIA

COORDINADOR ESTUDIO:

RUBEN DARIO CHANCI BEDOYA

EQUIPO DE TRABAJO:

**HELENA GUAYARA
JOSEFINA GONZALEZ
FREDY WILMAN ROJAS
CAMILO GÓMEZ USUGA
ALEJADRO GALVEZ
CARLOS YECID MEDINA**

ABRIL 30 DE 2021

LISTA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. PRINCIPALES ASPECTOS GEOLÓGICOS	9
2.1. POTENCIAL DE MINERAL DE COBRE EN COLOMBIA	9
2.2. EXPLORACIÓN DE DETALLE PARA MINERAL DE COBRE EN COLOMBIA.....	13
2.2.1. Proyecto El Roble:	14
2.2.2. Proyecto Quebradona	17
2.2.3. Proyecto Soto Norte	20
2.2.4. Proyecto Mocoa Cobre – Molibdeno	24
2.2.5. Proyecto San Matías	25
3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL APROVECHAMIENTO DE MINERAL DE COBRE EN EL MUNDO Y EN COLOMBIA.....	27
3.1. PROYECTOS INTERNACIONALES DE APROVECHAMIENTO DE COBRE	28
3.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA EXTRACCIÓN DE MINERAL DE COBRE.....	40
3.2.1. Proyecto Quebradona:	41
3.2.2. Proyecto El Roble:	57
3.2.3. Proyecto El Teniente:	64
3.2.4. Proyecto Chuquicamata:	72
3.3. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS EXTRACTIVOS PARA MINERAL DE COBRE FORMULADOS EN COLOMBIA CON PROYECTOS REALIZADOS EN OTROS PAÍSES	77
4. PRINCIPALES IMPACTOS ECONÓMICOS CON EL APROVECHAMIENTO DE COBRE EN COLOMBIA	79
4.1. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL PROYECTO QUEBRADONA.....	80
4.1.1. Producción y Vida Útil del Proyecto:	80
4.1.2. Empleo:	80
4.1.3. Insumos del Proyecto (Encadenamientos hacia Atrás):	80
4.1.4. Inversión Requerida:	80
4.2. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL PROYECTO SOTO NORTE	82
4.2.1. Producción y Vida Útil del Proyecto:	82
4.2.2. Empleo:	83
4.2.3. Insumos del Proyecto (Encadenamientos hacia Atrás):	83
4.2.4. Inversión Requerida:	84
4.2.5. Costos de Operación:	85
4.3. CARACTERÍSTICA ECONÓMICAS DEL PROYECTO EL ROBLE	86
4.3.1. Producción y Vida Útil del Proyecto:	86

4.4. IMPACTOS ECONÓMICOS PROYECTADOS ASOCIADOS A LOS PROYECTOS QUEBRADONA Y SOTONORTE.....	87
5. ASPECTOS FAVORABLES Y DESFAVORABLES FRENTE AL POSIBLE APROVECHAMIENTO DE MINERAL DE COBRE.....	89
6. CONCLUSIONES.....	91
7. RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFIA	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principales prospectos y proyectos de mineral de cobre en Sur América	10
Figura 2. Áreas estratégicas con potencial para mineral de cobre en Colombia.	12
Figura 3. Ubicación de proyectos y prospectos para mineral de cobre en Colombia	14
Figura 4. Ubicación Proyecto el Roble	15
Figura 5. Mapa geológico área del Proyecto el Roble	16
Figura 6. Ubicación del proyecto Quebradona	18
Figura 7. Ubicación proyecto Soto Norte.....	21
Figura 8. Ubicación proyecto Mocoa	24
Figura 9. Ubicación proyecto San Matias.....	26
Figura 10. Ubicación mundial de depósitos tipo pórfido cuprífero y sedimentario.....	28
Figura 11. Método de explotación de hundimiento por subniveles	42
Figura 12. Secuencia avance labores de explotación	44
Figura 13. Esquema general del proceso de beneficio	47
Figura 14. Perfil del terreno donde se dispone los relaves.....	48
Figura 15. Características geométricas del depósito de colas filtradas	49
Figura 16. Estructura organizacional del proyecto	50
Figura 17. Infraestructura cercana al área del proyecto Quebradona	52
Figura 18. Acceso al Cuerpo mineralizado y método de explotación “Drift and fill”	58
Figura 19. Diagrama de flujo de la planta de beneficio	61
Figura 20. Depósito de colas o relaves.....	62
Figura 21. Método de explotación El teniente	65
Figura 22. Nuevo nivel de producción mina El Teniente.	66
Figura 23. Planta de concentración Colon	68
Figura 24. Muro contención colas aguas abajo	71
Figura 25. Organigrama proyecto el Teniente.	72
Figura 26. Método de explotación de hundimiento por bloques.....	73
Figura 27. Reservas para extraer con relación al antiguo pit (rajo) y ubicación de los niveles. ...	74
Figura 28. Muro de contención depósito de colas mina Chuqicamata	76
Figura 29. Obtención de cobre refinado a partir de óxidos y sulfuros	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de recursos en zonas con influencia en Colombia	14
Tabla 2. Recursos proyecto el Roble (a 30 de septiembre de 2020)	17
Tabla 3. Recursos Minerales	20
Tabla 4. Reservas	20
Tabla 5. Recursos proyecto Soto Norte	23
Tabla 6. Reservas proyecto Soto Norte	23
Tabla 7. Recurso Proyecto Mocoa cobre - molibdeno	25
Tabla 8. Recursos Indicados e Inferidos proyecto San Matías.	27
Tabla 9. Principales características geológicas de proyectos internacionales	29
Tabla 10. Material removido en la vida del proyecto.	45
Tabla 11. Cantidad de personas requeridas en cada una de las etapas del proyecto	50
Tabla 12. Disciplinas requeridas durante la etapa de construcción y montaje	51
Tabla 13. Principales vías utilizadas por el proyecto	53
Tabla 14. Vías para construir en el proyecto Quebradona	54
Tabla 15. Requerimientos de energía en el proceso de minado	56
Tabla 16. Proyección de producción de la mina	59
Tabla 17. Producción de concentrado	61
Tabla 18. Proyección de costos de producción (en miles de dólares US\$000)	63
Tabla 19. Clasificación de los costos de producción de cobre refinado en la industria chilena.	77
Tabla 20. Principales insumos requeridos en el proyecto Quebradona	81
Tabla 21. Inversión requerida durante la vida del proyecto.	82
Tabla 22. Empleo generado durante la vida del proyecto Sotonorte	83
Tabla 23. Principales insumos requeridos en el proyecto Soto Norte	84
Tabla 24. Resumen del Capex del proyecto Soto Norte	85
Tabla 25. Desglose costos unitarios proyecto Soto Norte.	85
Tabla 26. Inversión requerida (US\$ en miles)	86
Tabla 27. Costos de operación (US miles)	86
Tabla 28. Resumen comparativo impactos económicos	87
Tabla 29. Empleo anual comparativo	88

1. INTRODUCCIÓN

La posición geográfica de Colombia y su evolución geológica, que comprende diferentes eventos tectónicos, magmáticos y metalogénicos, favorecen la presencia de una diversidad de ambientes geológicos propicios para la ocurrencia de recursos minerales, como los depósitos de polimetálicos.

Ambientes geotectónicos similares a los de Colombia han sido identificados en otros países de la región, en los cuales se han descubierto importantes yacimientos polimetálicos con contenido de cobre, que dieron origen a proyectos de aprovechamiento de este metal en países como Chile, Perú y recientemente Panamá, que ubican a Sur América como la región con mayores reservas y producción de cobre a nivel mundial.

En los últimos años algunas empresas han realizado campañas de exploración en áreas con potencial en depósitos polimetálicos y mediante técnicas modernas (Gamma Ray, Polarización Inducida, Levantamientos aerotransportados de magnetometría, métodos electromagnéticos – ZTEM) han logrado el modelamiento geológico de algunas zonas, configurando prospectos que abren la posibilidad de generar proyectos de aprovechamiento de cobre de mediana y gran minería, en el mediano plazo.

Lo anteriormente planteado sirve de sustento para suponer que Colombia tiene un alto potencial mineral en polimetálicos con contenido de cobre.

Estudios del mercado internacional del cobre muestran una clara tendencia en el crecimiento de la demanda de este metal¹, justificada en gran medida por el proceso de transición energética promovida a nivel mundial, con miras a controlar el calentamiento global, modificando la forma de generar energía, que en la actualidad se sustenta en el uso de combustibles fósiles², para que esta sea producida a partir de recursos renovables (solar, eólica, biomasa y geotermia) y se avance hacia un mundo eléctrico de alta eficiencia.

La generación de energía con renovables y el mundo eléctrico que se proyecta, va a requerir del cobre, debido a sus características de alta conductividad térmica, eléctrica, ductilidad y ser altamente reciclable; “se estima que por cada megavatio (MW) de energía eólica en tierra se requieren 4.32 toneladas de cobre y 9.56 toneladas de cobre para un MW de energía eólica generada en el mar (offshore), en los sistemas de energía solar fotovoltaica se estima que por cada MW generado se requieren 4.99 toneladas de cobre”³; los cables de cobre también son muy utilizados en los sistemas de almacenamiento y regulación de la energía producida con recursos renovables y no renovables. Los vehículos eléctricos también van a demandar una buena cantidad de cobre, se estima que mientras un coche convencional de combustión interna puede tener unos “20 kg de cobre, un coche híbrido

¹ Ver estudio de CRU para la UPME en <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/inter-cobre.aspx>

² Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), para el año 2017 los combustibles fósiles (carbón, hidrocarburos líquidos y gas) representaron el 65.01% de la matriz de generación eléctrica mundial.

³ Adaptado de <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/internacional/19220-a-2050-demanda-de-cobre-para-energia-renovable-podria-triplicarse-con-respecto-a-2020-agencia-internacional-de-energias-renovables>

puede contener entre 30 y unos 55 kilos de cobre, y uno eléctrico puede llegar hasta a los 80 kg⁴.

Para dar respuesta a lo planteado en el Plan Nacional de Desarrollo (PND), que busca consolidar el sector minero – energético como dinamizador del desarrollo de territorios sostenibles, la institucionalidad minera considera que debe adelantarse acciones que lleven a diversificar la canasta de producción de minerales, haciendo énfasis en los estratégicos que contribuyan a la transición energética, y de esta forma aportar para que los diferentes procesos productivos se lleven a cabo de una forma más amigable con el medio ambiente; bajo esta perspectiva, el cobre se considera un mineral a tener cuenta para diversificar la canasta de producción de minerales del país.

Por las razones antes expuestas, el cobre es considerado un mineral estratégico para Colombia, según lo establecido en la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 del Ministerio de Minas y Energía (Minenergía), y continuará siéndolo en el mediano plazo, según la revisión de los minerales estratégicos realizada por la institucionalidad minera en 2019.

La UPME considera importante profundizar en el conocimiento del mineral de cobre en el país. Con este informe se busca recopilar la información que considera relevante de este mineral desde el punto de vista geológico (conocimiento de la geología básica y geología de detalle), procesos productivos (técnicas de extracción, beneficio, refinación y transformación), bajo supuestos razonables, estimar los posibles impactos que generaría a la economía nacional la realización de dos o tres proyectos de aprovechamiento de mineral de cobre.

No se genera información que permita identificar o establecer los determinantes ambientales y sociales que pueden surgir con el aprovechamiento del cobre en Colombia, dado que el enfoque es netamente técnico, sin embargo, en una futura actualización de este documento, no se realizará tanto énfasis en el componente técnico y se profundizará en el mercado nacional e internacional del cobre y en el análisis a profundidad de los determinantes ambientales y sociales.

La UPME con este documento de perfil técnico pretende generar información para los grupos de interés que tiene un mediano conocimiento geológico, en técnicas de extracción y beneficio de depósitos polimetálicos enriquecidos con cobre. No va dirigido a profesionales expertos y con experiencia y trayectoria en este tipo de depósitos desde el punto de vista geológico, de operación minera y de beneficio, por tal motivo recomendamos que si una persona tiene un bajo o ningún conocimiento de geología y minería aborde la lectura con acompañamiento de estudiantes de últimos niveles, técnicos, ingenieros (en geología y minería) y de esta forma obtener el máximo provecho de la información que se encuentra en el documento desde punto de vista geológico (potencial de Colombia en cobre, tipos de depósitos, diferencias, principales características mineralógicas, calidades, reservas), minero (técnicas de extracción subterráneas, sistemas de extracción de altos

⁴ Adaptado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47136/1/S2100341_es.pdf

volúmenes, sistemas de arranque, cargue y transporte y manejo de estériles) beneficio (trititación, molienda, flotación y manejo de colas-relaves).

Este estudio también es de interés para aquellas empresas o personas que quieran conocer sobre encadenamiento minero para este tipo de proyectos y de esta forma identificar que actividades pueden generar insumos que muy seguramente contribuirá a dinamizar la economía de las regiones donde se ubiquen los proyectos.

2. PRINCIPALES ASPECTOS GEOLÓGICOS

Los esfuerzos para incrementar el conocimiento de la geología básica del país, por parte del Estado, se vienen realizando desde la década de los 70 para el caso del cobre, por intermedio del INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano – SGC), que inició esta tarea en convenio con Naciones Unidas, mediante un programa de exploración geológica para la búsqueda de metales en la Cordillera Central y Occidental.

2.1. POTENCIAL DE MINERAL DE COBRE EN COLOMBIA

Los primeros trabajos adelantados por INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano – SGC) en la década de los 70, permitieron identificar en el país el cinturón metalogénico que hace presencia a lo largo de la cordillera de los Andes, en donde se han encontrado yacimientos de polimetálicos que han dado origen a grandes proyectos mineros en países como Chile, Argentina, Perú, Ecuador, Panamá, Méjico y EE. UU. Ver figura 1.

La continuidad en Colombia de dicho cinturón se confirmó con el descubrimiento de numerosos prospectos de interés para cobre, como Acandí, El Infierno, Río Chili, Piedrancha, Patascoy, El Pisco y Mocoa, entre otros. Se continuó profundizando en el conocimiento de estos prospectos y se definieron tres cinturones de pórfidos cupríferos a saber: Occidental (de edad Eoceno), donde se encuentran los pórfidos de Pantanos-Pegadorcito, Andagueda, Murindó, Acandí y Piedrancha; Oriental (edad Jurásica), donde se encuentran los pórfidos de Andes y El Infierno – Chili, California, Dolores y Mocoa; Central (de edad Mioceno), donde se encuentran los pórfidos de El Tambo, Dominical, Piedrasentada y El Pisco. También se han identificado yacimientos de tipo skarn y sulfuros masivos vulcanogénicos.

Figura 1. Principales prospectos y proyectos de mineral de cobre en Sur América



Fuente: <https://www.nextsmallcap.com/asx-junior-mining-powerhouse-partnership-gears-drill-mcarthur-basin/>

En los últimos años El SGC, continuó con la tarea de mejorar el conocimiento de la geología básica del país sobre depósitos polimetálicos. El objetivo principal de este trabajo fue definir áreas con potencial mineral, cuya selección se fundamenta en la información geológica, geoquímica y geofísica disponible en el SGC y datos del inventario minero que proporcionó información sobre ocurrencias, prospectos, mineralizaciones y minas existentes⁵.

Para el caso del cobre, desde el punto de vista geológico se valoró la existencia de eventos magmáticos félsicos a intermedios tipo batolito y stocks, brechas pipes intrusivas dentro de los cuerpos batolíticos o rocas sedimentarias, rocas vulcano dacíticas a andesíticas y tobas coetáneas, pórfidos sieníticos, secuencias vulcano – sedimentarias intruidas por pórfidos, rocas sedimentarias de capas rojas y rocas metamórficas afectadas por vetilleo y diques. Además, se consideró el ambiente tectónico y eventos metalogénicos formadores de mineralizaciones de cobre⁶.

Las áreas con potencial para mineral de cobre se encuentran distribuidas en las tres cordilleras de la región Andina, y se consideraron los modelos de depósitos minerales con perspectivas para su hallazgo en Colombia, como los Pórfidos Cupríferos, Skarn, Sulfuros Masivos Volcanogénicos y Secuencias Sedimentarias Rojas, que se encuentran en los prospectos identificados para cobre en el país (como Acandí, El Infierno, Río Chili, Piedranha, Patascóy, El Pisco y Mocoá, entre otros).

⁵ <http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/8566.pdf>

⁶ Servicio Geológico Colombiano, (2012), Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado, tomado de: <http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/8566.pdf>

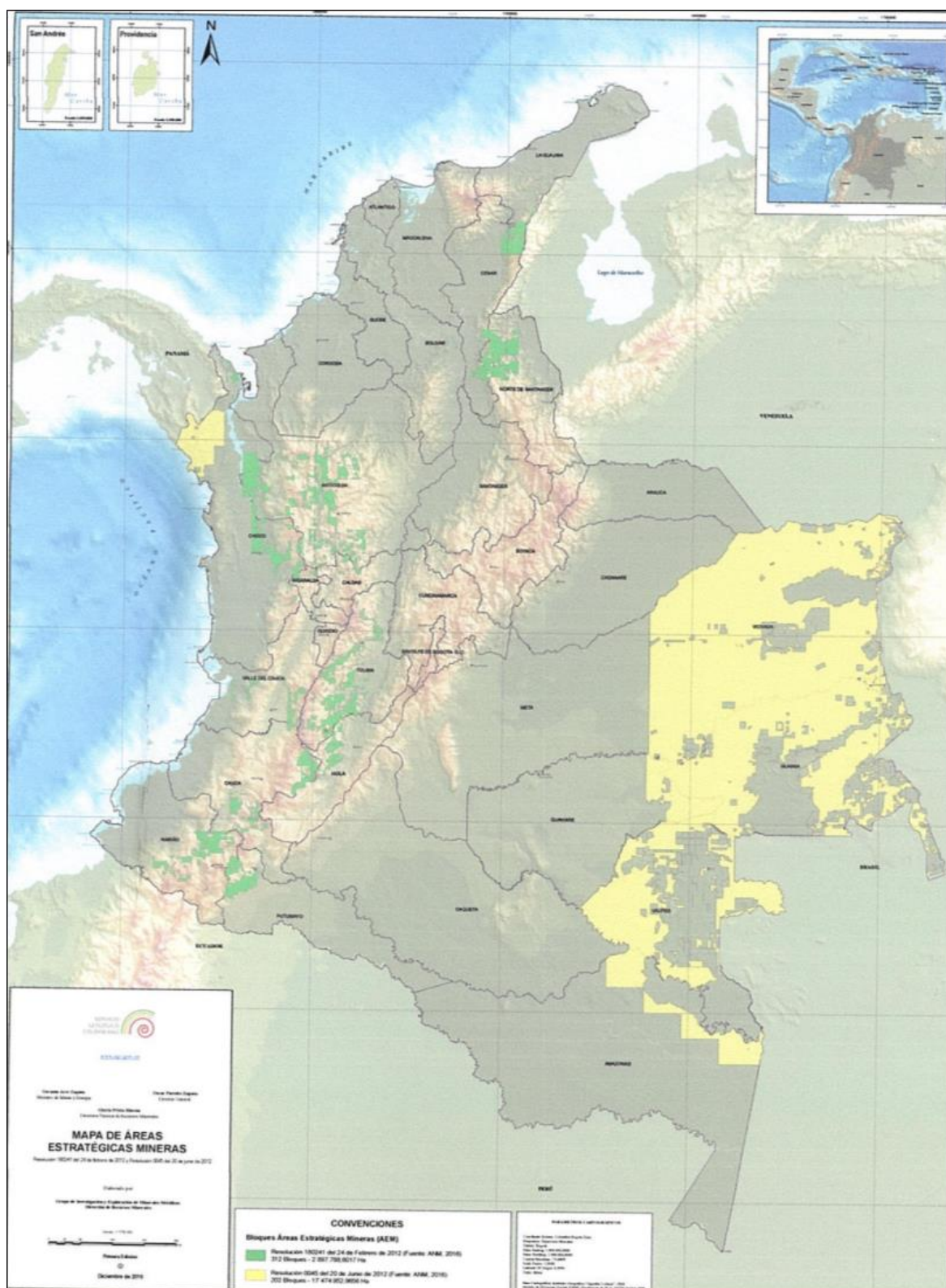
Identificadas las áreas con potencial en mineral de cobre en el país, se procedió a eliminar las superposiciones con títulos mineros otorgados y vigentes, propuestas de contratos y solicitudes de legalización, zonas mineras de comunidades étnicas, resguardos indígenas, zonas de comunidades negras y áreas excluibles de la minería; se recomendó declarar una superficie de 2,299,150 hectáreas como áreas estratégicas para mineral de cobre. Ver figura 2.

Otro análisis del potencial mineral para cobre que tiene en cuenta el territorio colombiano es el que realiza el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que teniendo en cuenta las características geológicas del cinturón metalogénico identificado en Sur América, los modelos geológicos de los depósitos en explotación en países vecinos, y mediante el uso de modelos estadísticos y otros criterios técnicos, infieren recursos que se clasifican como Recursos Hipotéticos y/o especulativos, entendiendo estos como los recursos minerales que pueden estar presentes en un área de estudio, pero para los cuales la ubicación, el grado, la calidad y la cantidad de material mineralizado se determina a partir de evidencias geológicas indirectas.

Según el USGS, de las 26 regiones con depósitos de tipo pórfido cuprífero identificadas en Sur América, cinco tienen influencia en el territorio colombiano, de las cuales tres también hacen parte de Ecuador, Perú y Panamá. En la tabla 1 se presentan los recursos hipotéticos o especulativos estimados para las áreas de influencia en Colombia para depósitos de tipo pórfido cuprífero.

Las filas 1, 2 y 3 de la tabla 1, corresponden a información que abarca Ecuador, Perú, Colombia y Panamá y en promedio en dichas áreas estiman recursos hipotéticos de mineral de cobre de 37.3 millones de toneladas, mientras que las filas 4 y 5 corresponde a áreas que están ubicadas en Colombia y se estima un potencial 7.7 y 9.7 millones de toneladas de recursos hipotéticos, respectivamente.

Figura 2. Áreas estratégicas con potencial para mineral de cobre en Colombia.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Tabla 1. Estimación de recursos en zonas con influencia en Colombia

Nombre Región Geológica	Recursos Hipotéticos y/o Especulativos			
	Promedio de Recursos Estimados In-situ (Millones de toneladas)	Probabilidad de Recursos In-situ(%)	Promedio de Recursos Estimados Económicos (Millones de Toneladas)	Probabilidad de Recursos económicos (%)
Plate 22, Porphyry Copper Assessment for Tract 005pCu1005 Miocene Chaucha-Colombia and Ecuador	39	2	21	10
Plate 23, Porphyry Copper Assessment for Tract 005pCu1003, Jurassic San Carlos-Colombia, Ecuador and Peru	40	2	20	15
Plate 24, Porphyry Copper Assessment for Tract 005pCu1001, Paleocene-Eocene Acandi-Colombia, Ecuador and Panama	33	3	18	14
Plate 25, Porphyry Copper Assessment for Tract 005pCu1004, Cretaceous Infierno- Chili- Colombia	7.7	6	4.4	58
Plate 26, Porphyry Copper Assessment for Tract 005pCu1002, Jurassic California-Colombia and Venezuela	9.7	7	5.2	55

Fuente: USGS Assessment of Undiscovered Copper Resources of the World, 2015, Scientific Investigations Report 2018–5160 Version 1.1, May 24, 2019.

2.2. EXPLORACIÓN DE DETALLE PARA MINERAL DE COBRE EN COLOMBIA

Como se vio en el numeral anterior, el país tiene avances en el conocimiento de la geología básica para mineral de cobre en el territorio nacional; sin embargo, los avances en conocimiento detallado de la geología para este metal son reducidos, es decir, el país está prácticamente inexplorado para mineral de cobre, por este motivo hay pocos proyectos de extracción de mineral de cobre como lo muestra la figura 1.

En los últimos años, y dada la dinámica del mercado internacional del cobre, y el potencial que tiene el territorio colombiano para albergar depósitos de este metal, algunas empresas ampliamente reconocidas a nivel mundial se han interesado en adelantar campañas de exploración, las cuales han logrado identificar algunos prospectos, que se pueden visualizar en la figura 3. De llegar a convertirse en proyectos de extracción, beneficio y transformación de cobre, pueden generar cambios significativos en la calidad de vida de las regiones y del país en general.

Figura 3. Ubicación de proyectos y prospectos para mineral de cobre en Colombia



Fuente: UPME, Subdirección de minería

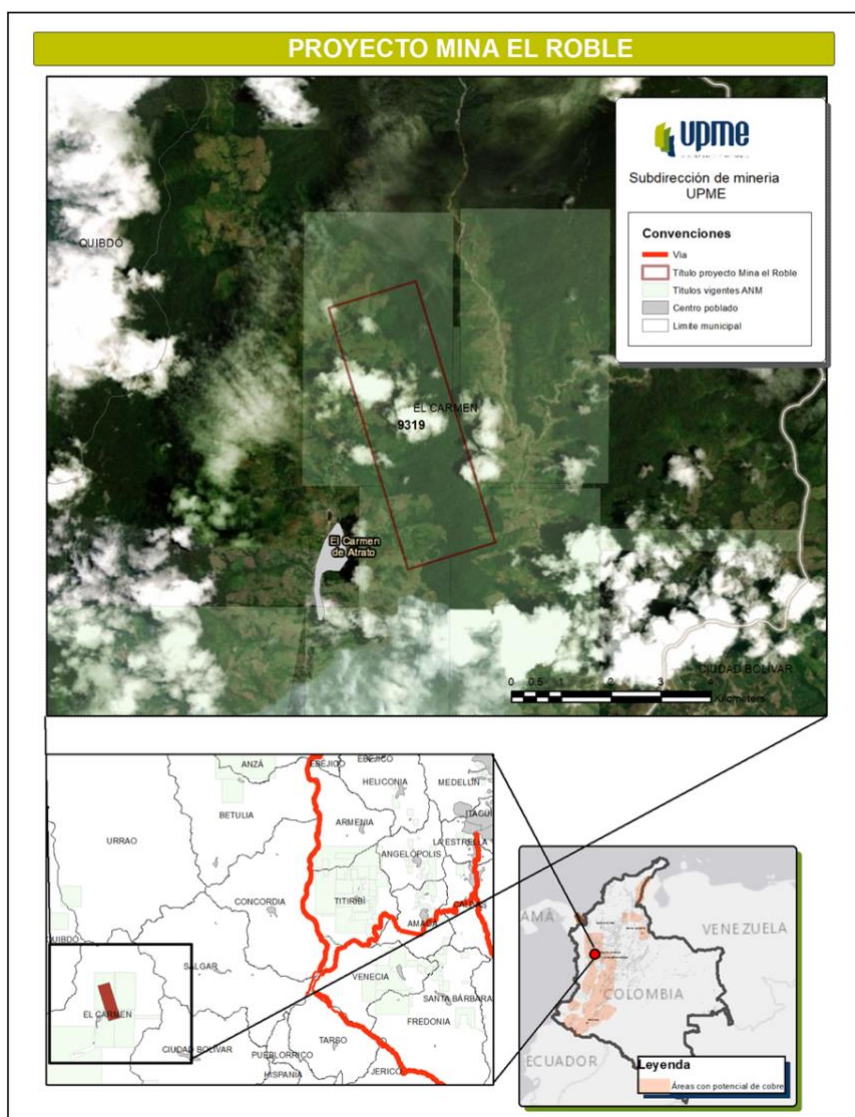
Este numeral presenta un resumen sobre los avances en exploración obtenidos por varias empresas interesadas en realizar proyectos de aprovechamiento de mineral de Cobre en Colombia.

2.2.1. Proyecto El Roble⁷: Es el único proyecto que actualmente extrae cobre en Colombia, como parte de un concentrado que también contiene oro y plata.

Este proyecto se encuentra ubicado en el sector central de la cordillera occidental, en el departamento del Chocó, en el límite con el departamento de Antioquia, tres kilómetros al norte del municipio de Carmen de Atrato. Ver figura 4.

⁷ <http://aticominig.com/resources/technical-reports/Atico-technical-report-2018-final.pdf>

Figura 4. Ubicación Proyecto el Roble



Fuente: UPME, Subdirección de Minería

Las unidades dominantes del área del proyecto son la formación volcánica Barroso y la sedimentaria Penderisco; junto con rocas intrusivas tonalíticas y rocas metamórficas paleozoicas, delimitadas por el río Cauca al oriente y el río San Juan de Atrato al occidente; este yacimiento está formado dentro de una corteza oceánica asociado a procesos volcánicos que se vieron afectadas por el magmatismo tonalítico.

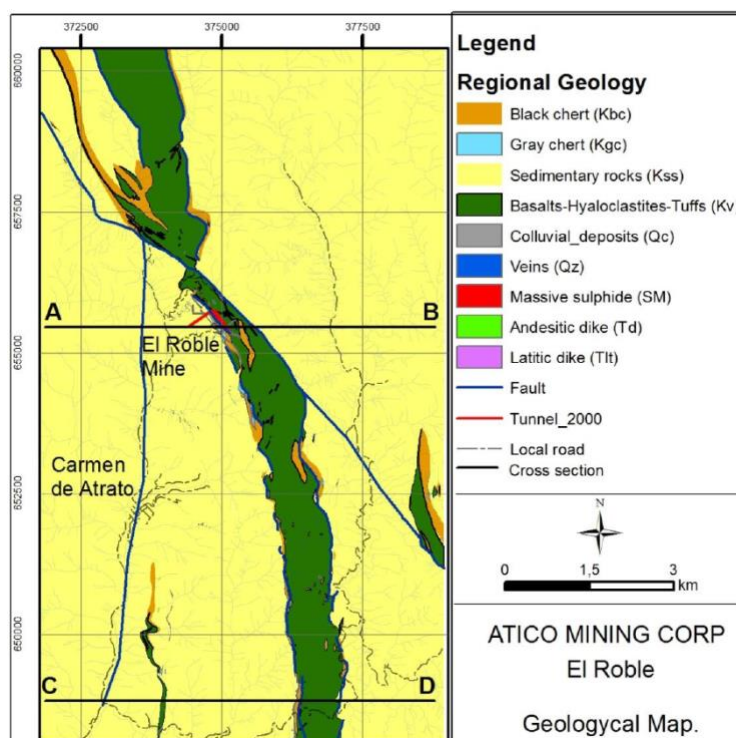
La formación Barroso ocupa aproximadamente un 15% del área de la cordillera occidental cortando las secuencias anteriores y siendo portadoras de importantes mineralizaciones de pórfidos cupríferos y también de numerosas vetas auríferas.

La formación Barroso aflora en dos grandes franjas a ambos lados de la cordillera occidental; se compone por rocas lávicas y rocas volcánicas clásticas como diabasas, basaltos, tobas, brechas y aglomerados. Dentro de ellas también se incluyen gabros y paquetes de rocas sedimentarias como chert, lutitas y en ocasiones calizas.

La formación Penderisco es una unidad sedimentaria de 5Km de espesor plegada. La unidad se compone de grauvacas, limolitas, arcillolitas, calizas y vulcanitas básicas de fuerte

espesor. La unidad se compone principalmente de areniscas ubicadas al piso de la formación, seguido de lutitas que priman hacia el techo⁸. Ver figura 5.

Figura 5. Mapa geológico área del Proyecto el Roble



Fuente: LECHNER J. Michel, et al. Amended Updated Mineral Resource Estimate El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia

El concentrado de cobre, oro y plata extraído de este proyecto se obtiene de un depósito volcánico de sulfuro masivo (VMS) de forma lenticular e inclinación casi vertical, que contiene pirita y calcopirita, oro, cantidades menores de plata, esfalerita, pirrotina, como mineral de ganga se tiene cuarzo, clorita, calcita, dolomita, y en cantidades menores hematita y magnetita.

Este cuerpo mineralizado está en contacto con rocas sedimentarias pelágicas y rocas volcánicas; las dimensiones identificadas del depósito muestran que tiene 360 metros de largo y 550 metros de profundidad por un máximo de 45 metros de espesor; está compuesto por 5 cuerpos minerales los cuales son; Maximus, Maximus Sur, Perseus, Goliat y Zeus. Este último se considera la principal fuente de recursos mineros del proyecto. Los trabajos de exploración bajo el nivel 2000 indican la continuidad del VMS y demuestran que el depósito permanece abierto en profundidad, al sureste y noreste.

En los últimos años este proyecto ha incrementado la exploración, buscando ampliar sus recursos, e inició una campaña de perforación entre el año 2010 y 2015, logrando un total de 693 perforaciones, que corresponde a 29,482 metros perforados, con los cuales se han

⁸ Castrillón A, Daniel R. 2017. Evaluación del sistema de ventilación de la mina el Roble. Tesis de grado Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC.

identificado siete lentes mineralizados y se estimaron recursos medidos e indicados, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Recursos proyecto el Roble (a 30 de septiembre de 2020)

CATEGORIA	MENA (t)	TENORES		CANTIDAD DE METAL	
		%Cu	(g/t) Au	Cu (Lb)	(oz) Au
Recursos Medidos	1,039,200	4.34	2.29	75,745,700	76,500
Recursos Indicados	135,200	4.06	2.62	8,597,700	11,400
Medidos +Indicados	1,174,400	4.30	2.33	84,343,400	87,900
Recursos Inferidos	17,100	2.03	3.41	186,400	1,900

Fuente: <http://aticominer.com/resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf>.

- 2.2.2. Proyecto Quebradona⁹:** El proyecto se ubica en el municipio de Jericó, que se localiza a 115 km de la ciudad de Medellín, en el departamento de Antioquia. Las obras de infraestructura minera del proyecto se encuentran a 34,5 km por carretera desde la cabecera municipal de Jericó (Ver figura 6).

Este proyecto lleva 16 años de investigación. Inició en 2004 con actividades de prospección geológica a nivel regional; comenzando con recorridos de campo para realizar prospección geoquímica, se tomaron y analizaron muestras de suelos, sedimentos en quebradas, afloramientos, y se localizaron y muestrearon áreas de explotación de minería artesanal. En este proceso se tomaron cerca de 4,200 muestras. También se realizó análisis de información de fuentes secundarias, para localizar formaciones geológicas promisorias para el proyecto.

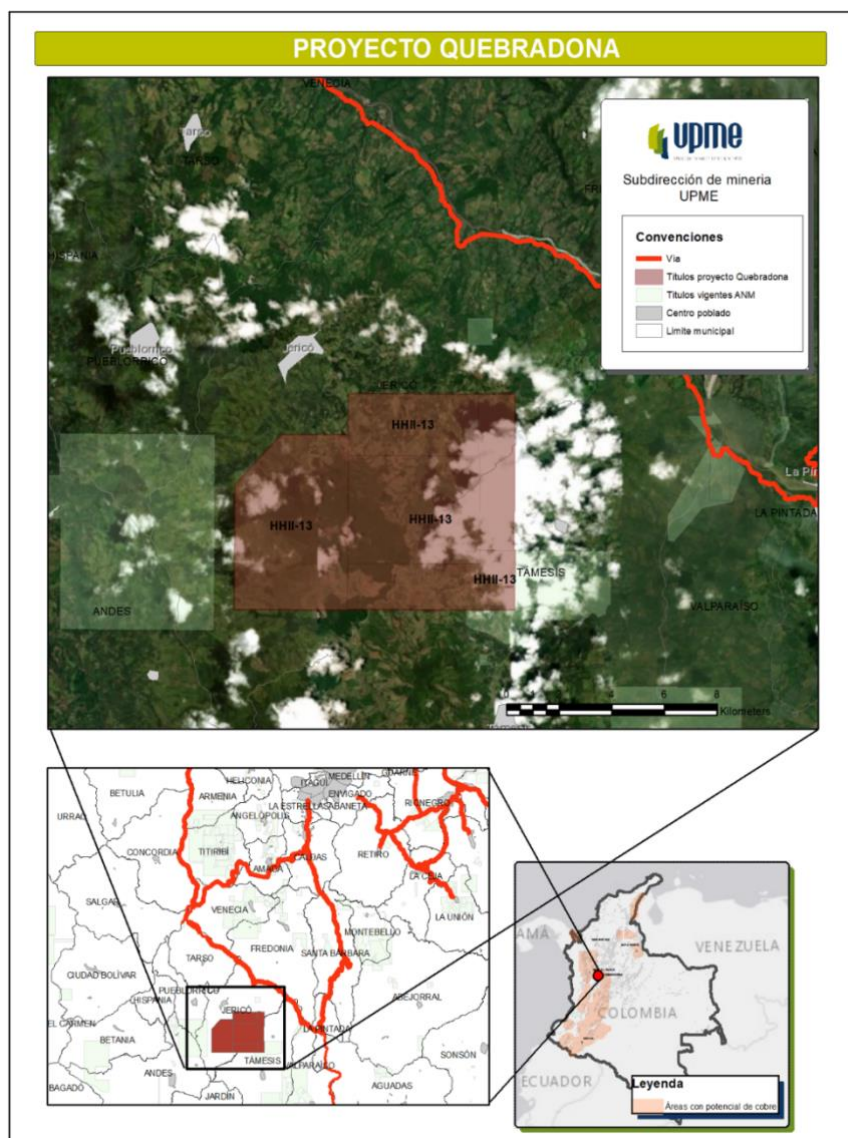
Con este trabajo se identificaron potenciales mineralizaciones en el pórfido de cobre y oro, entre las cuales se incluyó el distrito Quebradona. Un trabajo posterior identificó una zona sobre la quebrada Quebradona e Higuerrillos, una alteración sericitica fuerte y un “stockwork” de óxido de hierro con inclusiones locales de cuarzo. También se observaron otros prospectos minerales como Aurora, La Sola, Tenedor e Isabela, sobre los cuales se definió evaluar en profundidad la existencia de mineral de oro u otro mineral de interés, mediante la aplicación de técnicas directas de exploración del subsuelo (perforaciones).

Entre los años 2006 y 2008 se perforaron 13,319 metros en el Distrito Quebradona, con 1,987 metros distribuidos en cinco perforaciones que se ubicaron en Chaquiro y el resto en los otros blancos de exploración.

En el año 2010, AngloGold Ashanti perforó el área Chaquiro (ahora llamado Nuevo Chaquiro) con el objetivo de caracterizar una amplia zona con anomalía geoquímica de oro, correspondiente a un sistema de vetillas tipo Intermediate Sulphidation State (ISS – D) y caracterizar un pórfido profundo centrado en un área de “stockwork” vetilloso con correspondencia a una alta anomalía magnética.

⁹ Adaptado de: <https://www.anglogoldashanticolombia.com/home/quebradona/>

Figura 6. Ubicación del proyecto Quebradona



Fuente: UPME, Subdirección de Minería.

Entre el 2011 y 2018 se continuó con la campaña de exploración del subsuelo a través de perforaciones en el depósito Nuevo Chaquiro, con las cuales se obtuvieron las muestras utilizadas para realizar los estudios que permitieran delimitar el depósito potencialmente económico, estimar su tamaño y contenido de mineral, para poder definir la viabilidad técnica y económica del proyecto. Esta información también es insumo importante para definir la viabilidad ambiental del mismo.

Las condiciones geológicas del depósito Nuevo Chaquiro se definen por una serie de stocks del Mioceno y diques dioríticos y cuarzodioríticos que intruyen una secuencia subhorizontal de rocas volcánicas y volcanoclástica de composición andesítica.

A profundidad se identifican dos cuerpos intrusivos, los que son foco de alteración y mineralización del depósito Nuevo Chaquiro. El intrusivo cuarzodiorítico se encuentra muy mineralizado y el diorítico con menos intensidad de alteración y llamado intra mineral.

Existe un sistema bien zonificado de alteración formado por ensambles potásicos, cálcico – potásico y propilíticos tempranos, superpuestos por una alteración de sericita – clorita de baja temperatura y una capa cuarzo – sericítica que se extiende desde la superficie hasta unos 400 m de profundidad.

El depósito Nuevo Chaquiro está constituido por cenizas, tobas, aglomerados y andesitas. La secuencia es intruída por pequeños diques de diorita y cuarzodiorita. La intrusión ocurre por diferentes pulsos de diorita y en mayor proporción por cuarzodioritas de grano medio a fino que en su mayoría no afloran en superficie. Las rocas intrusivas se categorizan en preminerales, tempranas, intraminerales y tardías, de acuerdo con sus relaciones de corte, temporalidad y contenidos de Cu y Au. Se encuentra encajado en la Formación Combia, con espesor hasta de 600 metros, con secuencias pobremente definidas de piroclastos, volcanoclastos y flujos con edades entre 6 y 10 millones de años (González, 2001).

En los testigos de perforación se puede apreciar que la Formación Combia la conforma una serie de rocas tobáceas volcánicas y volcanoclásticas, predominantemente andesíticas. Además, comprende en orden de abundancia tobas de ceniza, lapillita, aglomerados y flujos de andesita. Las rocas se correlacionan con el miembro volcánico inferior de la Formación Combia. Los tipos de rocas individuales (de la Fm Combia) son bastante variables en distribución vertical y lateral, por lo que no ha sido posible correlacionarlos lateralmente para la construcción de columnas estratigráficas. Para el propósito del logueo de núcleos, se agrupan varios tipos de rocas en la Formación Combia como una sola unidad llamada “tobas”.

En contacto discordante y subyaciendo la formación Combia, se encuentran rocas sedimentarias asociadas a la formación Amagá, de edad terciaria.

En el área de Nuevo Chaquiro, el buzamiento y la estratificación para diferentes unidades rocosas de la Formación Combia son típicamente subhorizontales, con rumbos locales en dirección NE y NW y buzamiento aproximado de 15° E.

De igual forma, el depósito Nuevo Chaquiro contiene múltiples intrusiones de cuarzodiorita a diorita, todas similares en apariencia, tamaño de grano, litología gruesa y desarrollo porfídico.

La alteración desarrolla un sistema de pórfido bien zonificado con alteración de diferentes temperaturas. Se presentan conjuntos propilíticos, hasta sericíticos, cloríticos, potásicos y cálcico – potásicos. La mineralización de alta ley de Cu y Au (>0,6 % de Cu) está asociada con venas de cuarzo bien desarrolladas en la cúpula de cuarzodiorita temprana, persistiendo sobre un intervalo vertical de 500 m y un stockwork que contiene más del 10% del volumen de roca.

El cuerpo mineralizado nuevo Chaquiro en la alteración potásica contiene minerales como la biotita – magnetita, feldespato potásico y feldespato, secundarios con o sin venas de cuarzo asociadas, venas del stockwork con calcopirita, pirita, molibdenita asociadas con la mineralización económica.

Las perforaciones profundas detectaron la alteración potásica y encontraron la mineralización de Cu – Au con un centro ígneo intramineral, lo que permite definir una

amplia zona con valores de 0.48 a 0.54 % de Cu y 0.18 a 0.31 g/t de Au. Además, se identifica una extensa zona de bajo contenido de minerales metálicos, por lo que se definió que se trataba de un depósito polimetálico tipo pórfido de cobre y oro, con contenido de plata y molibdeno. Sin embargo, existía la preocupación de que los contenidos de metales encontrados fueran insuficientes para soportar una operación subterránea.

Trabajos de geofísica que incluyeron levantamientos aerotransportados de magnetometría, radiometría, métodos electromagnéticos (ZTEM) y un levantamiento de polarización inducida terrestre dipolo-dipolo, permitieron en el 2013 el descubrimiento de una zona de alta ley, confirmada a través de perforaciones, con valores entre 1 y 1.2 % de Cu y 0.44 a 0.61 g/t de Au, a partir de las cuales se pudo delinear la zona de alta ley y orientar las campañas siguientes para detallar y delimitar estos sectores.

Los principales minerales que le dan importancia económica al depósito Nuevo Chaquiro son calcopirita y molibdenita, aunque se han observado localmente trazas de bornita y cubanita en cantidades menores al 0.1 % en volumen. Otros sulfuros incluyen pirita y cantidades menores de pirrotita en intervalos específicos. El Au y la Ag correlacionan bien con el Cu y por analogía con otros depósitos se cree que ocurren dentro de la calcopirita, lo que fue comprobado con los últimos estudios geo metalúrgicos.

Uno de los objetivos de la construcción del modelo geológico es cuantificar la cantidad de recursos y reservas del proyecto, las cuales se puede apreciar en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Recursos Minerales

CATEGORIA	MENA (Mt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Mo (ppm)
Indicados	256	0.86	0.45	5.40	145.44
Inferidos	343	0.47	0.22	3.46	130.14
	599	0.64	0.31	4.29	136.67

Fuente: Minera de Cobre Quebradona, 2019.

Tabla 4. Reservas

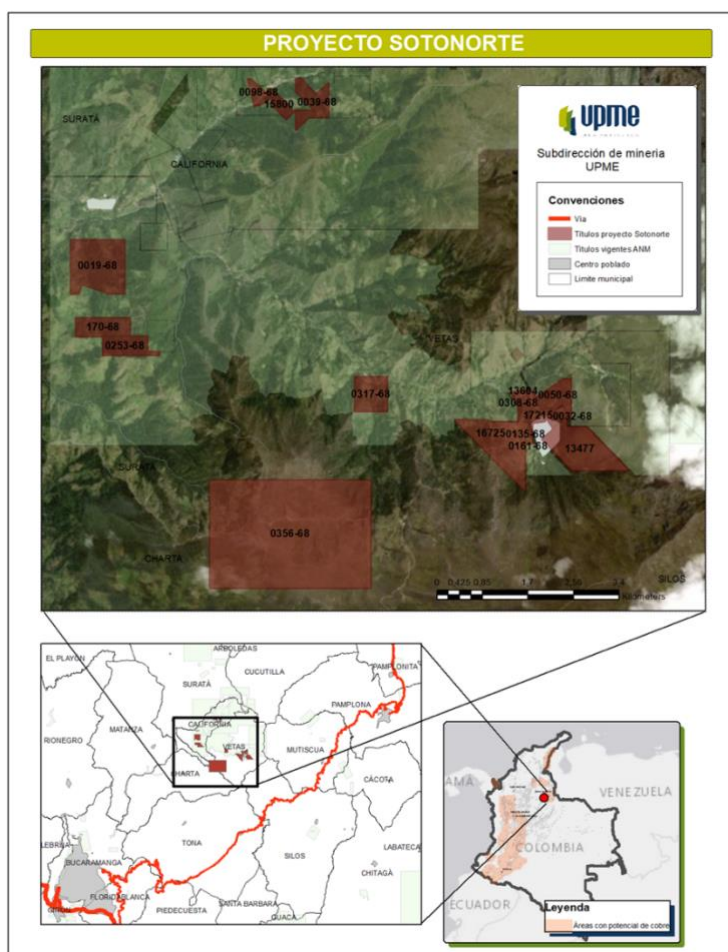
RESERVAS	MENA (t)	Cu (%)	Au (g/t)	Cu CONTENIDO (t)	Au CONTENIDO (oz)
Probadas					
Probables	109,667,606	1.21	0.66	1,323,609	2,342,215
Total	109,667,606	1.21	0.66	1,323,609	2,342,215

Fuente: Minera de Cobre Quebradona, 2019.

2.2.3. Proyecto Soto Norte¹⁰: El proyecto Soto Norte se encuentra ubicado en la parte oriental del Macizo de Santander, Cordillera de los Andes, al noreste del territorio colombiano, aproximadamente a 470 km al noreste de Bogotá por carretera y 60 km al noreste de Bucaramanga por carretera, capital del departamento de Santander; a 5 km de la cabecera del municipio de California, en dirección NE por carretera sin pavimentar. Ver figura 7.

¹⁰ Adaptado de: <http://www.anla.gov.co/proyectos-anla/proyectos-de-interes-en-evaluacion-soto-norte>

Figura 7. Ubicación proyecto Soto Norte



Fuente: UPME, Subdirección de Minería

En el área del proyecto Soto Norte se han realizado amplias labores de investigación geológica (suelo y sub-suelo), geotécnica e hidrogeológica (aguas subterráneas) desde el año 2009. Los trabajos realizados para modelar el depósito mineral consistieron en:

- Cartografía geológica de superficie, toma y análisis de muestras de suelo, afloramientos, sedimentos activos (geoquímica). Se realizó inventario de todos los túneles antiguos y bocaminas, los cuales fueron levantados topográficamente, seleccionando los aptos para ser mapeados y muestreados. El mapeo consiste en el registro de las características litológicas, mineralógicas, estructurales y geotécnicas de las paredes de las excavaciones, así como el muestreo de roca para caracterización geoquímica.
- Más de 1,300 perforaciones para exploración geológica, geotécnica e hidrogeológica, equivalentes a casi 500,000 metros de muestras de núcleos de roca para conocer la disposición y características del suelo y el sub-suelo. Esto se logra mediante perforaciones de entre 6 y 10 cm de ancho, que se realizan en el suelo hasta profundidades que varían típicamente entre 300 y 700 m con el fin de recolectar muestras de los diferentes materiales, que fueron enviadas a laboratorios internacionales certificados para el análisis químico de sus componentes minerales.
- Entre 2016 y 2017 se realizaron 93 sondeos geofísicos magnetotelúricos para ampliar el conocimiento de la disposición geométrica de las rocas. Estas técnicas no requieren realizar perforaciones; se disponen sensores electrónicos en superficie

para hacer un escáner o radiografía del sub-suelo hasta más de 500 m de profundidad. De esta manera, se identifican estructuras geológicas (fallas y fracturas), contenidos metálicos importantes y zonas que pueden o no contener agua subterránea.

El dominio geológico general de la zona del proyecto Soto Norte está conformado por rocas sedimentarias de edad Jurásica – Cretácica, que comprenden unidades de shale, lodolita y arenisca con intercalación de capas menores de caliza y chert. También se identifica un dominio ígneo-metamórfico conformado por neis y anfibolita de edad Pre-Cámbrica, intruidas por granitos del Triásico – Jurásico.

El depósito mineral del proyecto Soto Norte es clasificado como epitermal de alta sulfuración, con ocurrencias de oro, plata y cobre principalmente en sulfuros. Está formado por venas y brechas tectónico-hidrotermales que han sido generadas por la falla local de rumbo La Baja, con tendencia estructural Noreste-Suroeste. El depósito mineral está asociado a stocks y diques de pórfidos del Mioceno, que han sido identificados en el área del proyecto cortando las rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas más antiguas.

La génesis del depósito se dio a partir de fluidos hidrotermales profundos relacionados con el magmatismo antiguo, que fluyeron a través de caminos y zonas fracturadas generadas por las fallas y la actividad tectónica local. Estos procesos dieron origen a alteraciones hidrotermales filica y propílica “de fondo”, que fueron generadas durante las etapas tempranas de mineralización. Estas alteraciones son características de un ambiente transicional pórfido-epitermal.

Se identifica otra alteración de silicificación y alteración argílica avanzada localizada en el centro de las vetas principales, con una zonación de argílica intermedia y propílica hacia fuera de los cuerpos mineralizados. Estas alteraciones se formaron durante las etapas principales de mineralización.

La litología de la zona del yacimiento corresponde a rocas metamórficas del Precámbrico denominadas Neis de Bucaramanga (Ward et al., 1973) y rocas ígneas de composición granítica del Triásico - Jurásico (Mantilla et al., 2012; Mantilla et al., 2013); en la zona Oeste del Proyecto aflora una espesa secuencia de rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico (Goldsmith et al., 1971; Ward et al. 1977; Polania, 1980); diques y cuerpos porfiríticos aproximadamente de 1 a 2 km de exposición, que indican un pulso magmático de edad Mioceno Tardío y brechas tectónico-hidrotermales de edad Plioceno a Pleistoceno (Rodríguez, 2014), teniendo en cuenta que estas rocas han sido afectadas por procesos de alteración hidrotermal.

Las rocas mineralizadas que se explotarán en el Proyecto Soto Norte se encuentran en venas y brechas tectónico-hidrotermales generadas por fluidos hidrotermales que fluyeron a través de caminos permeables (zonas fracturadas).

Estas rocas son de granulometría fina a muy gruesa, resistencia a la compresión uniaxial débil a muy fuerte (“UCS”) con un rango típico entre 20 - 125 MPa y densidad entre 2.5 - 2.8 g/cm³. Se identifican como minerales mena la pirita (sulfuro) como el mineral más predominante; otros minerales mena están asociados a la mineralización de metales preciosos y sulfuros de cobre (por ejemplo, calcopirita, calcosina, bornita y covelita),

tenantita-tetraedrita, enargita, wolframita (variedad hubnerita) y esfalerita (Rodríguez, 2014; Mount, 2017).

Los metales de interés económico como el oro se presentan en forma nativa, electrum (oro-plata) y en teluros, asociado a la ocurrencia de sulfuros de hierro y cobre. La plata ocurre asociada al oro nativo como electrum y en algunos teluros, fuertemente asociada a sulfuros de cobre. En menor cantidad ocurre en minerales de antimonio, arsénico y bismuto. El cobre ocurre en una variedad de sulfuros, de los cuales predominan la calcopirita, bornita, calcosina y enargita; también se encuentra asociado a tetraedrita, tenantita y covelita.

Las rocas que harán parte del material estéril se componen predominantemente de cuarzo de rocas metamórficas, ígneas, sedimentarias y brechas, seguido por tectosilicatos en moderado grado de ocurrencia, representados por feldespatos plagioclasa y potásico principalmente. Por otra parte, se observan filosilicatos e inosilicatos de origen primario y representado por moscovita, biotita, clorita y hornblenda; también producto de alteración como sericita, illita, caolinita y montmorillonita. Como minerales secundarios se evidenciaron óxidos (hematita, goetita, rutilo, magnetita, titanita, especularita, limonita), sulfatos (alunita, woodhouseita, jarosita, calcantita, natroalunita) y sorosilicatos (epidota); minerales accesorios como carbonatos (calcita) y nesosilicatos (citrón).

La estimación de recursos del Proyecto Soto Norte fue realizada con base en el Código JORC (2012), el cual determina los criterios de clasificación de los recursos minerales en medidos, indicados e inferidos. En la aplicación del Código JORC, la clasificación de recursos tiene una relación directa con el nivel de continuidad estructural de la mineralización, la exactitud del muestreo y los ensayos, y el espaciamiento de las muestras. Para el caso del Proyecto Soto Norte, el modelo geológico indica un alto grado de continuidad en los dominios mineralizados, así como sólidos muy bien definidos. En la tabla 5 se puede apreciar la categoría y los recursos estimados.

Tabla 5. Recursos proyecto Soto Norte

RECURSOS	MENA (Kt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu Contenido (Klb)	Au Contenido (koz)	Ag Contenido (Koz)
Indicados	36,837	0.19	6.0	29.0	151,617	7,052	34,339
Inferidos	31,967	0.17	5.4	34.4	119,286	5,531	34,403

Fuente: Sociedad Minera de Santander, 2016.

A partir de la aplicación de los factores modificadores a los recursos indicados y bajo los lineamientos del Código JORC, se establecieron las reservas del proyecto (Ver tabla 6).

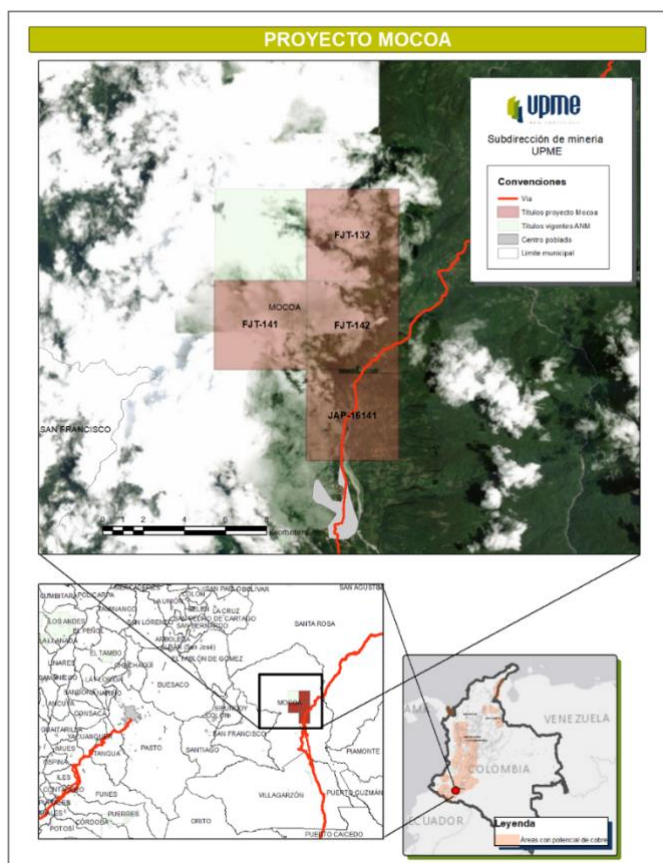
Tabla 6. Reservas proyecto Soto Norte

RESERVAS	MENA (t)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu Contenido (Klb)	Au Contenido (koz)	Ag Contenido (Koz)
Probables	28,539,000	0.14	5.4	28.2	106,055	5,284	25,942

Fuente: Sociedad Minera de Santander, 2017.

2.2.4. **Proyecto Mocoa Cobre – Molibdeno¹¹**: Este proyecto está ubicado en la cordillera oriental de Colombia, a 465 kilómetros al sur oeste de Bogotá y a 10 kilómetros del centro de Mocoa, capital del departamento de Putumayo. (Ver figura 8).

Figura 8. Ubicación proyecto Mocoa



Fuente: UPME, Subdirección de Minería.

Este depósito fue descubierto entre 1973 y 1976, en un trabajo conjunto entre Naciones Unidas y el INGEOMINAS (hoy Servicio Geológico Colombiano - SGC) a través de un estudio geoquímico regional.

Entre 1978 y 1983 se adelantó un programa de exploración que consistió en un mapeo geológico de superficie (muestras de suelos, afloramientos, sedimentos activos) para ensayos geoquímicos, geofísica, 31 perforaciones diamantinas (18,321 metros) y ensayos preliminares de metalurgia.

En 2008 se realizaron nueve perforaciones (5,123 metros) y en 2012 tres perforaciones adicionales (1,768 metros).

El área de este depósito hace parte de un cinturón que está conformado por rocas volcánicas, sedimentarias, e intrusivas que varían en edad desde el Triásico-Jurásico hasta el Cuaternario, y por restos de metasedimentos paleozoicos y rocas metamórficas de la edad

¹¹ Adaptado de: <http://liberocopper.com/resources/reports/TechnicalReportMocoaCu-MoDepositColombia150618.pdf>

precámbrica. Este cinturón alberga varios depósitos de pórfido y cobre, como Mirador, San Carlos y Panantza, ubicados en el sureste de Ecuador (Von Guttenberg, 2008).

La mineralización de cobre y molibdeno se asocia con una intrusión de pórfido de dacita de la edad del Jurásico Medio emplazada en rocas volcánicas andesíticas y dacíticas. El sistema de pórfido de Mocoa exhibe un patrón zonal clásico de alteración hidrotermal y mineralización, con un núcleo central más profundo de alteración potásica cubierto por sericitización y rodeado por propilitización. La mineralización consiste en calcopirita diseminada, molibdenita y bornita local asociada con venas multifásicas, stockworks y brechas hidrotermales. La oxidación superficial irregular se extiende hasta una profundidad de 150 metros y se superpone a una litocapa de cuarzo-sericita-pirita estéril de 70 a 220 metros de espesor que recubre la mineralización primaria de cobre-molibdeno. El depósito no contiene mineralización de cobre supergénica significativa.

Las perforaciones han indicado que el depósito es aproximadamente cilíndrico, con un diámetro de 600 metros y espesores que varían de 250 a 350 metros. La mineralización de cobre-molibdeno de alto grado continúa a profundidades superiores a 1,000 metros. En la tabla 7 se presentan los recursos estimados.

Tabla 7. Recurso Proyecto Mocoa cobre - molibdeno

RECURSOS	MENA (Mt)	CuEq (%)	Cu (%)	Mo (%)	CuEq Contenido (Blbs)	Cu Contenido (Blbs)	Mo Contenido (Mlbs)
Inferidos	636	0.45	0.33	0.036	6.31	4.60	510.5

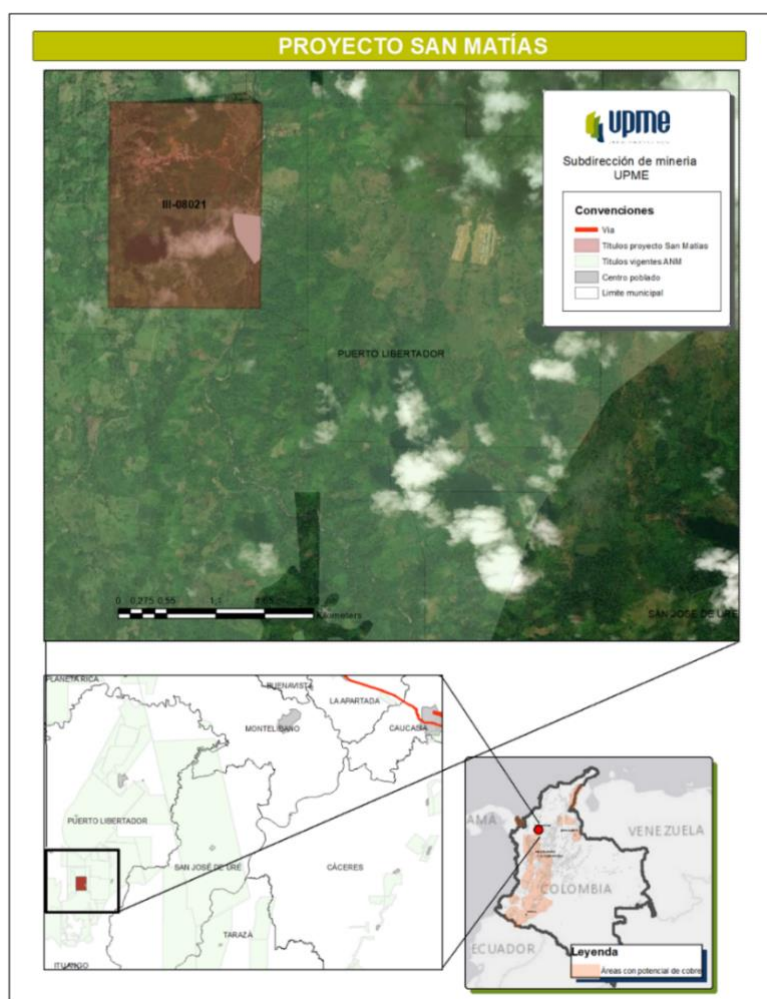
Fuente: Mocoa Copper – Molybdenum project.

- 2.2.5. Proyecto San Matías¹²:** Es un proyecto de la empresa Córdoba Minerals Corp., tiene potencial para la extracción de cobre, oro y plata. San Matías está ubicado en el Municipio de Puerto Libertador, Departamento de Córdoba, a 112 km al sur de Montería departamento de Córdoba (Ver figura 9). El proyecto alberga los depósitos el Alacrán, Montiel East, Depósitos de Montiel West y Costa Azul.

El Proyecto se encuentra en la Llanura del Caribe dentro de la región geomorfológica montañosa y de colinas constituidas por las estribaciones septentrionales de la Cordillera Occidental. Regionalmente el área se caracteriza por la presencia de una secuencia volcano-sedimentario del cretácico superior (Grupo Cañasgordas), que se subdivide en la Formación Barroso de basaltos, y la formación Penderisco de turbiditas, cuarzo y piedra caliza. La secuencia ha sido atravesada por stocks de rocas ígneas de composición diorítica.

¹² Adaptado de: [NI 43-101 Technical Report and Resource Estimate, San Matías Copper-Gold-Silver Project, Colombia. 2019](#)

Figura 9. Ubicación proyecto San Matías



Fuente: UPME, Subdirección de Minería

La geología del área está compuesta por secuencias de rocas volcánicas de composición basáltica con intercalaciones de rocas de composición intermedias como andesitas, también alrededor del área de interés se encuentran intrusivos de composición diorítica.

El área del proyecto comprende tres dominios litológicos primarios: Rocas intrusivas (Incluyendo pórfidos) en los depósitos Alacrán, Montiel East y Costa azul, Rocas volcánicas en los depósitos Montiel West y Rocas volcanoclásticas también están presentes en el Alacrán Norte.

El magmatismo de la zona se interpreta como parte del arco magmático pre-acumulativo en el sector de Calima Terrane (Manco et al., 2018). La mayoría de las rocas intrusivas mapeadas afloran a lo largo del lado este del Río San Pedro. Mineralógicamente, el intrusivo y las rocas de pórfido se pueden dividir en tres grupos: 1) tonalita-granodiorita, 2) tonalita-cuarzo diorita, y 3) Diorita-Cuarzo Diorita.

Se han propuesto varios modelos geológicos para el depósito de Alacrán, incluidos los de tipo sulfuro masivo volcánico ("VMS"), Skarn, Depósito de reemplazo de carbonato ("CRD") y los de tipo Óxido de hierro cobre-oro ("IOCG"). Sin embargo, los minerales de Alacrán

muestran más características relacionadas con los de tipo Pórfido cuprífero, que con características asociadas a depósitos tipo VMS o IOCG.

La mineralización de Cu y Au, presente en el Proyecto El Alacrán, están relacionadas a mantos con sulfuros y óxidos en agregados masivos, y secuencias volcanoclásticas con presencia de pirita-magnetita-moscovita-calcopirita-pirrotita diseminada, en parches y flujos. En la cobertura laterítica óxidos secundarios. Limonitas (Hematita, Goethita), jarosita.

Tabla 8. Recursos Indicados e Inferidos proyecto San Matías.

RECURSOS	MENA (Mt)	Cu (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Cu Contenido (t)	Au Contenido (oz)	Ag Contenido (oz)
Indicados	94.9	0.51	0.29	2.7	488,115	897,881	8,245,332
Inferidos	3.4	0.3	0.2	1.3	10,350	22,439	142,769

Fuente: Ni 43-101 Technical Report and Resource Estimate, San Matías Copper-Gold-Silver Project, Colombia. 2019

3. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL APROVECHAMIENTO DE MINERAL DE COBRE EN EL MUNDO Y EN COLOMBIA

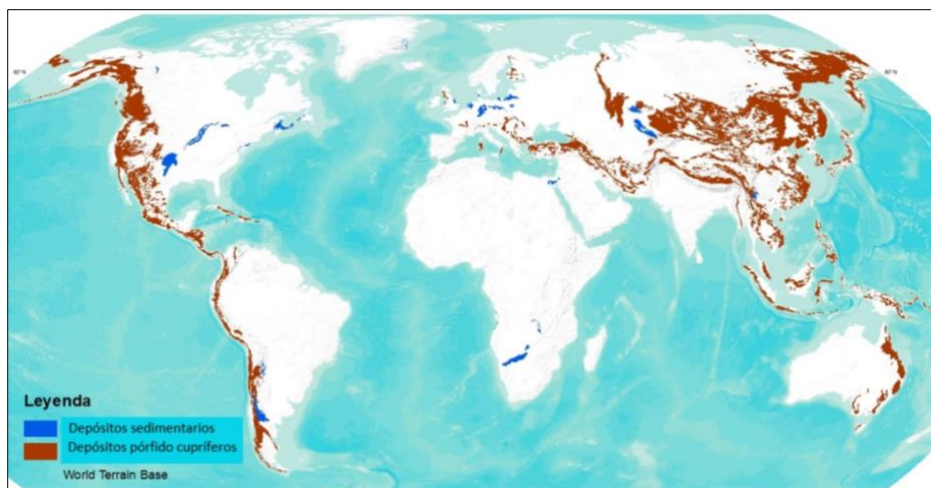
Como se pudo ver en el numeral anterior en Colombia existe potencial de depósitos polimetálicos con contenido de cobre en los identificados como pórfidos cupríferos, sulfuros masivos volcanogénicos, skarn y secuencias sedimentarias rojas.

Los estudios geológicos de detalle realizados por los concesionarios mineros están confirmando la existencia de estos depósitos, de los cinco (5) proyectos analizados en este estudio cuatro (4) corresponden a pórfidos, aunque para el proyecto San Matías se han encontrados zonas que han llevado a proponer varios modelos geológicos para el depósito de Alacrán.

En el proyecto el Roble el depósito es del tipo sulfuro masivo volcanogénico (VMS), de esta forma Colombia no difiere de la tendencia que existe en el mundo, en donde el mayor potencial y producción se asocia a depósitos de tipo pórfido, depósitos sedimentarios, segregación magmática y sulfuros masivos volcanogénicos; los dos primeros representan aproximadamente el 84% del total de recursos identificados de cobre, los de tipo pórfido representa el 74% y los de tipo sedimentario el 10%¹³, en la figura 10 se puede ver la distribución de estos depósitos en el mundo.

¹³ U.S. Geological Survey 2014 Información basada en 730 proyectos mineros en 2010 compilados por Mudd y otros 2013.

Figura 10. Ubicación mundial de depósitos tipo pórfido cuprífero y sedimentario



Fuente: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). 2016.

En este capítulo mediante revisión bibliográfica, se presentan las principales características geológicas y técnicas del aprovechamiento de mineral de cobre en proyectos ubicados en diferentes partes del mundo, en depósitos similares a los identificados en Colombia.

También se realiza una revisión de los procesos técnicos de aprovechamiento de mineral de cobre aplicados o propuestos para los proyectos en operación o próximos a operar en Colombia, para finalizar con una comparación que permita identificar las ventajas y desventajas técnicas del aprovechamiento de mineral de cobre aplicadas en Colombia, con relación a las aplicadas a nivel internacional.

3.1. PROYECTOS INTERNACIONALES DE APROVECHAMIENTO DE COBRE

Se seleccionaron los 19 proyectos más representativos teniendo en cuenta la producción de cobre a nivel internacional, en depósitos similares a los identificados en Colombia, es decir en depósitos tipo pórfido (sulfuros y óxidos), sulfuros masivos volcanogénicos y skarn.

Se hace una breve descripción de las principales características geológicas, mineralógicas y se describen las principales características técnicas de la extracción, las cuales se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Principales características geológicas de proyectos internacionales

NOMBRE PROYECTO	GEOLOGIA	MINERALIZACIÓN	MINERÍA
La Escondida	Ubicado al occidente de Chile, a 170 kilómetros al sur este de la ciudad de Antofagasta, a 3100 de altitud en el desierto de Atacama. Es un pórfido conformado por tres cuerpos, formados por pulso hidrotermales de sulfuros que contienen entre 0.2 y 1% de Cu, que intruyen un sistema fallas. La meteorización posterior creó una capa estéril y lixiviada, de hasta 180 m de espesor, sobre un mineral enriquecido supergénico de alto grado, ambos superpuestos a los sulfuros primarios. https://www.mining-technology.com/projects/escondida/	La mineralización de sulfuro primario incluye pirita, calcopirita y bornita, con calallita y calcocita en la zona enriquecida. RESERVAS: Las reservas de mineral probadas y probables combinadas de Escondida y Escondida Norte mediados en 2004 fueron: 2,018Mt de mineral de sulfuro de cobre con 1,24% de cobre; 1.701Mt de mineral de sulfuro de cobre de baja ley con 0,55% de cobre; y 290 Mt de mineral de óxido de cobre a 0,73% de cobre soluble en ácido. Las reservas probadas y probables de Escondida son actualmente de 3.900Mt, incluida la adición de 1.200Mt del proyecto Escondida Norte. Las operaciones mineras actuales se proyectan para 34 años.	Es la mina de cobre más grande del mundo por producción a 250 metros de profundidad. Abierta desde 1990, es una de las minas a cielo abierto más profundas del mundo, con una producción de 1.270 Kt de cobre, que representa el 5% de la oferta mundial. Es copropiedad de BHP Billiton (57.5%), Rio Tinto Corp. (30%) y Japan Escondida (12.5%). https://www.mining-technology.com/projects/escondida/
Buenavista o Cananea	Ubicado en Sonora, México. Es un pórfido cuprífero que se extiende desde el SO de Estados Unidos al NE de Sonora. En este distrito se presentan varios tipos y estilos de mineralización, que incluyen brechas magmático-hidrotermales (Cu-Mo), skarn (Cu-Zn), y diseminado (Cu-Mo).	La mineralización primaria se presenta en forma de sulfuros, particularmente en calcopirita, bornita y molibdenita. La mineralización altamente económica está formada por horizontes de calcocita derivado de la lixiviación de los minerales primarios (Chávez, 2000; Titley, 2004.) RECURSOS: Más de 30 Mt de Cu contenido	También conocida como Cananea, la segunda mina de cobre más grande del mundo por reserva y con una producción anual de 510 kt, es una de las minas a cielo abierto más antiguas de América del Norte, y abrió sus puertas en 1899. Es propiedad de Southern Copper Corporation (SCC), una subsidiaria de Grupo México. https://miningdataonline.com/property/1092/Buenavista-Mine.aspx
Cerro Verde	Ubicado a 32 kilómetros al sur oeste de Arequipa, Perú. Es un pórfido que intruye un área constituida por diversos tipos de rocas ígneas, sedimentarias (calizas, lutitas y areniscas) y metamórficas (cuarcitas y gneis bandeados de grano medio a grueso con abundante ortosa, cuarzo y biotita), con	Tiene mineralización de óxidos y sulfuro primarios y secundarios. Los minerales de óxido de cobre predominantes son brochantita, crisocola, malaquita y brea de cobre. La calcocita y calallita son los minerales de sulfuro de cobre secundario más importantes. La calcopirita y la molibdenita son los sulfuros primarios dominantes.	Es una mina de cobre a cielo abierto con una superficie de aproximadamente 157,007 acres, lo que la convierte en la segunda mina de cobre más grande de Perú, según las reservas. Su producción anual se sitúa en 500 kt. Es propiedad de un consorcio formado por Freeport-McMoRan (el operador de la mina con una participación del 53.56%), SMM Cerro Verde Netherlands, una subsidiaria de Sumitomo Metal (21%),

	edades geológicas comprendidas entre el Precámbrico y el Cuaternario reciente. El pórfido intrusivo que aportó la mineralización de Cu y Mo corresponde al cretácico-terciario, la última de las tres etapas principales de la actividad ígnea.		Compañía de Minas Buenaventura (19.58%) y accionistas públicos (5.86%)
		RESERVAS: Tienen reservas estimadas en 1,033 Mt de sulfuros primarios. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Texto%2014%20de%20junio%20del%202004.pdf.pag21	
Doña Inés de Collahuasi	Ubicada en el norte de Chile en la región de Acatama, a 2870 de altitud. El depósito corresponde a un pórfido dacítico a riolítico de edad cercana a los 35 Ma. La geología del entorno está dominada por unidades intrusivas y volcánicas cuyas edades varían entre el Paleozoico Medio y el Holoceno. En los más de 400 Ma de historia magmática del distrito, sólo el magmatismo Eoceno Superior parece haber generado mineralización económica de cobre. La mineralización de cobre se produce tanto en disseminaciones como en vetillas controladas por fractura.	El centro de la zona mineralizada contiene bornita, calcopirita y calcocita primaria y generalmente carece de pirita. La mineralización de óxido se concentra principalmente en la porción noreste del depósito. El óxido consiste en Crisocola, malaquita y brochantita en una matriz fuertemente limonítica. Cuprita, tenorita y Cu nativo también están presentes localmente.	Está en uno de los depósitos de cobre más grandes del mundo, es la segunda mina de cobre más grande de Chile y produce 454 kilo toneladas anuales. Es copropiedad de Anglo American (44%), Glencore (44%) y Mitsui + Nippon (12%) y vende la mayor parte de su cobre a China para ser fundido. Ha estado abierto desde 1999.
		RECURSOS: 9,964 millones de toneladas de cobre disponible. https://miningdataonline.com/property/1383/Collahuasi-Mine.aspx	
Chuquicamata	Está ubicada en Chile, 15 kilómetros al norte de Calama, en la región de Antofagasta, a una altitud de 3000 metros. Es un pórfido cuprífero de edad Eoceno-Oligoceno (40-32 Ma) el que se encuentra mineralizado por alteraciones argílica, Clorítica, Feldespato Potásico – Cuarzo de Grano Fino (K-Sil), Vetas y Vetillas de Cuarzo – Molibdenita, Sericita Gris-Verde Temprana y potásica de fondo, además de la presencia de sulfuros, óxidos y lixiviados de cobre. Es un depósito elongado en dirección Nor-Nor-Este (NNE), con 4 km de	Los eventos de alteración hipogena de la Mina Chiquicamata han sido divididos en dos categorías; los eventos tempranos de las alteraciones pueden asociarse a mineralizaciones de baja sulfuración y eventos tardíos o de alta sulfuración. Alteración temprana; se caracteriza por presentar 4 eventos de alteración. Alteración potásica; presenta minerales de alteración como feldespatos potásicos, plagioclasas que fueron alteradas a albita, Biotita (K) secundaria en forma de “book” sericita y/o arcillas con escasa disseminación de calcopirita-bornita y localmente con vetillas de cuarzo granular estériles (Vetillas tipo A). Su contenido total de sulfuros es bajo (<1%), y el sulfuro dominante es la Calcopirita.	Es una mina de cobre y oro a cielo abierto, es considerada la más grande del mundo en su tipo y actualmente vive un importante proceso de transformación, hacia una operación subterránea, es la iniciativa de mayor envergadura en la cartera vigente de Codelco, con una inversión cercana a los US\$ 5.800 millones, luego de la cual se estima que alcance una producción 370 kilo toneladas de cobre al año

	largo, 300 a 900 m de ancho en sentido Este-Oeste que se ensancha de Sur a Norte, y una columna vertical de mineralización económica reconocida de unos 1.800 m (900 m bajo el fondo del tajo actual, de los cuales aproximadamente 700 m corresponden al cuerpo mineralizado de los Sulfuros Profundos de Chuquicamata). La geología del yacimiento de Chuquicamata se caracteriza por el dominio de rocas intrusivas y fallas regionales, además de rocas volcánicas y sedimentarias las que componen una columna geológica discontinua desde el Paleozoico hasta el Cuaternario. Dentro de la mina han sido definidas tres unidades intrusivas: El Pórfido Este que corresponden a granodioritas de grano grueso, en contacto gradacional con el Pórfido Oeste, de textura más fina, y el Pórfido Banco que es un monzogranito que intruye al Pórfido Este. RECURSOS: Se han cuantificado en 1.760 millones de toneladas de cobre. https://www.codelco.com/codelco-aprueba-historica-inversion-para-transformacion-de-chuquicamata/prontus_codelco/2014-12-18/182754.html	Alteración clorítica consiste en un reemplazo selectivo por clorita de minerales máficos primarios y secundarios que ocurre en los bordes del depósito como lo son las hornblendas y biotitas de los pórfidos. Con mineralización de baja ley hay Pirita-Calcopirita diseminada y localmente Especularita en vetillas y diseminada concuerda con la aparición de un gran magnetismo en la roca evidenciado por la aparición de magnetita primaria acompaña hornblenda preservada. Micro vetillas de calcita también son características de esta alteración. Alteración de vetas y vetillas este evento de vetas y vetillas de cuarzo-molibdenita, es el más importante y el que introdujo la mayor cantidad de molibdeno al sistema. Alteración feldespato-potásico-cuarzo La mineralización corresponde a bornita + digenita mayores a calcopirita sin pirita. Localmente se encuentra sericita asociada con bornita. Es común la ocurrencia significativa en el KSil, de anhidrita diseminada y en vetillas. La mineralización asociada ocurre preferentemente en vetillas y microvetillas con cantidades importantes de Cu. Alteración sericita consiste en el reemplazo por sericita gris-verdosa, cuarzo, abundante sulfuro diseminado, y en menor cantidad feldespato potásico. Eventos tardíos de alteración: consiste en alteración cuarzo-sericítica pervasiva (QSP) con mineralización característica de alta pirita y sulfuros de cobre. Esta alteración consiste esencialmente en agregados de sericita, cuarzo y pirita. Oxidación y enriquecimiento supergénico actualmente la zona oxidada del sistema ya ha sido explotada. Los minerales que se encontraban en mayor abundancia en este sector eran antlerita, brochantita y atacamita; menos común eran la kroenkita, chenevixita, turquesa y sampleita. https://www.studocu.com/es/document/universidad-catolica-del-norte/geologia-de-minas/informe/informe-mina-chuquicamata-2018/4191256/view	
--	--	--	--

Los Bronces	Está ubicado en Chile, a 65 kilómetros de Santiago, en la zona de montaña de la comuna de Lo Barnechea, región Metropolitana, a 3.500 metros de altitud. El depósito corresponde a un pórfido que hace parte del sistema de cobre pórfido mioceno plioceno río blanco, el cuerpo mineralizado se extiende 9 km de norte a sur y 3 km de este a oeste. El depósito está abierto en profundidad y lateralmente. En general, estos depósitos se emplazan en las potentes secuencias volcano - sedimentaria del Oligoceno Superior - Mioceno. La mineralización rica en sulfuro de cobre molibdeno es alojada en brechas de hipogénico que posteriormente se superimprimió por procesos supergénicos relacionados con la superficie, muestra una estrecha relación con la intrusión de diques y alfeizares de pórfido, desarrollo de zonas de alteración a gran escala desarrollo de venas y colocación de brechas. El cuerpo mineral está relacionado con al menos siete tubos de brecha hidrotermal que forman un gran cuerpo elíptico de 2 km de longitud, 0,7 km de ancho y 1 km de profundidad. la forma del sistema de brechas es en forma de embudo caracterizada por contactos agudos con las rocas huésped en la parte superior de la columna y transitorios en las profundidades. Las rocas anfitrionas son la secuencia volcánica de la formación farellones y las rocas plutónicas del batholith de san francisco que interfieren con la formación farellones	La roca de caja hace parte de la formación Farellones, donde se emplazó el plutón granodiorítico, y por lo tanto se encuentra como clasto en las brechas definidas en el yacimiento. La alteración hidrotermal corresponde a una total o parcial alteración cuarzo-sericita y biotización en la roca fragmentada. Según Stambuk y otros (1982) estas alteraciones están asociadas a las mayores concentraciones de mineralización de cobre y molibdeno. La mineralización de cobre está asociada con el emplazamiento de un sistema complejo de intrusiones de pórfido (monzonitas de cuarzo y monzodioritas de cuarzo) y brechas hidrotermales. la mineralización temprana de cobre y molibdeno está alojada en el stock de pórfido.	Es una mina de cobre y molibdeno que se explota a cielo abierto, el mineral que se extrae es molido y transportado por un mineroducto de 56 kilómetros a la planta de flotación Las Tórtolas, en la que se produce cobre y molibdeno contenido en concentrados. Además, en la mina se produce cobre en cátodos. En 2017 Los Bronces produjo 308,3 kilo toneladas de cobre fino, entre cátodos de alta pureza y cobre contenido en concentrado, además de 2.421 toneladas de molibdeno contenido en concentrado. En los Bronces laboran aproximada de 6.970 trabajadores, entre personal de planta y contratistas.
		RECURSOS: Medidos 792.8 Mt, Indicados 382,6 Mt, Inferidos 42.7 Mt. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169973/Dise%C3%B1o-y-desarrollo-de-un-nuevo-reporte-compacto-y-autom%C3%A1tico-de-planificaci%C3%B3n-mina-Divisi%C3%B3n-Los-Bronces.pdf?sequence=1&isAllowed=y	

Ministro Hales	Ubicada en Chile, a 10 kilómetros al norte de Calama por el camino que une a esta ciudad con Chuquicamata. Es un pórfido de Cu-Mo, bajo una cubierta de gravas aluviales miocenas, que en la porción superior desarrolló un sistema de alta sulfidación con la formación de brechas hidrotermales vetiformes con mineralización de Cu, Ag e impurezas de As. El pórfido y la mineralización forman un cuerpo alargado que se asemeja a un gran dique. La mineralización hipogénica se distribuye dentro de una matriz de cuerpos de brecha hidrotermal subvertical. El enriquecimiento supergénico y la oxidación produce una exótica capa de óxido en las gravas al este. Dentro del depósito las rocas más antiguas son flujos andesíticos y brechas verdes no diferenciados con cloto, epidota y pirita, asignados a la formación Collahuasi triásico.	La mineralización del pórfido son producto de unas venas precoces de tipo B con molibdenita axial y calcopirita, que aparece en lo profundo del depósito. Tiene una masa de tierra aplítica y escasos ojos de cuarzo, muestra alteraciones potásicas con feldespato K.	
		RESERVAS: El yacimiento contiene 1.300 Mt de reservas de cobre con una ley promedio de 0,96%. http://www.guiaminera.cl/codelco-division-ministro-hales/	Es una mina que se encuentra a una altitud 2600 metros, está operaciones desde 2010, es una mina a cielo abierto. Produce calcina de cobre, concentrado de cobre y plata. En 2018, la división produjo 195. 5 kilo toneladas métricas de cobre fino con 810 personas vinculadas a la operación.
Centinela	Ubicada en Chile en la región de Antofagasta. Es un pórfido multifásico enriquecido en Cu, Au y Mo, dentro del cual se reconocen cuatro pulsos intrusivos. Estos son pórfido granodiorítico portador de feldespato y biotita, Dacita pórfido con biotita y ojos de cuarzo, stock de granodiorita porfídica y pórfido de dacita tardío. El depósito se produce dentro del sistema de fallas domeyko, pero está localizado por una falla de tendencia WN. El sistema de pórfido se emplaza en el esquisto calcáreo jurásico y yeso.	Se conocen cuatro tipos de mineralización: Cu-Au de pórfido temprano con alteración potásica, venas EB A y B y mineralización de calcopirita de hipogéno bornita Au, Stock de granodiorita con mineralización Cu - Mo alteración de sericita clorito, sulfuros diseminados de grano fino y abundante molibdenita, Skarn de granate con Cu - Au con calcopirita pirita magnesita y hornfels y skarn que muestran oxidación in situ, que se va afectada por el colapso gravitacional debido a la solución basal de yeso. Las brechas de grava de piamonte y tectónicas y colapso de la solución luego canalizaron soluciones supergénicas que contienen cobre, lo que condujo a la precipitación de crisocola, antofagastita y taco de cobre. Minera Centinela está explotando actualmente el mineral de cobre de óxido de alto grado resultante.	Es una mina de propiedad de Antofagasta Minerals, el principal Grupo Minero privado de Chile. Nace en 2014, con la visión de utilizar las sinergias de las operaciones de Tesoro y Esperanza, aprovechando las condiciones geográficas, técnicas y logísticas que hacían posible una planificación y operación integrada. Centinela es la segunda con mayor producción de Antofagasta Minerals, en el 2017 alcanzó una producción de 228.3 kilo toneladas de cobre. Es además el séptimo productor de cobre del país y el décimo quinto a nivel mundial. Al igual que el resto de las operaciones del Grupo está comprometido con el desarrollo de una minería productiva, inclusiva y sustentable. Lo que la lleva a trabajar hoy para ser la minería del futuro. Así lo demuestran las innovaciones que presenta en su ciclo productivo, como la utilización de agua de mar sin desalar, la creación de una

	RESERVAS: Las reservas del metal rojo estimadas en 2,108 millones de toneladas, con una ley del 0,44%. Mientras que sus reservas de oro son de aproximadamente 0,15 gramos por tonelada de cobre. http://web.mineracentinela.cl/que-hacemos/productos/		planta termosolar y el uso de la tecnología de relaves espesados a gran escala, en la cual es pionera a nivel mundial. A fines del 2018 aspira a ser reconocida como la operación más segura y eficiente de Chile.
Radomiro Tomic	Ubicada en Chile, en la comuna de Calama a 3000 metros de altitud. Es un pórfido, oculto por gravas nogenas. El enriquecimiento ha alcanzado localmente profundidades de hasta 800 m a lo largo de las venas con fallas de sericita de cuarzo.	La mineralización de óxido comienza inmediatamente debajo del contacto de grava con distribución vertical típica de la zona de óxido lixiviado, una zona mixta y zona de sulfuro secundario. La parte superior de la zona de enriquecimiento inmediatamente debajo de la parte superior de los sulfuros se caracteriza por los grados más altos y se define por la presencia mayor del 80% de sulfuros de hidrógeno recubiertos por calcopirita, en la parte inferior de la zona el sulfuro supergénico principal es calallita con calcocita menor.	Es una mina explotada a cielo abierto para la obtención de minerales oxidados, que produce 200,000 toneladas por día de material mineralizado.
	RESERVAS: Cuenta con reservas del orden de 1.800 millones de toneladas de sulfuros, con una ley promedio 0.5%. https://www.codelco.com/division-radomiro-tomic/prontus_codelco/2016-02-25/163906.html		
Morenci	Ubicada a 16 km al sur de Silver City, Arizona, en los Estados Unidos. Es un pórfido de cobre en una zona de intensa oxidación hipogénica. Las rocas más antiguas que afloran en esta región corresponden a una secuencia volcánica andesítica del Cretácico Tardío. Estas rocas fueron cubiertas de manera discordante por lavas y tobas riolíticas del Eoceno-Oligoceno, y posteriormente por una secuencia de relleno de valles caracterizada por areniscas y conglomerados, con flujos ocasionales de basalto, la cual se correlaciona de manera regional con la Formación Báucarit del Mioceno.	La mineralización es predominantemente de sulfuro y óxido, siendo la pirita y la calcocita los principales minerales sulfurados, y la crisocola y la malaquita son los óxidos predominantes. Molibdenita, galena y esfalerita también están presentes. RESERVAS: Las reservas recuperables probadas y probables en la mina a diciembre de 2015 ascendían a 3.574Mt de mineral, con un promedio de 0.27% Cu, 14.1 mil millones de libras de Cu y 0.17 mil millones de libras de Molibdeno. https://miningdataonline.com/property/84/Morenci-Mine.aspx	Es una mina con una producción de cobre de 520 kt. Abierta para operaciones desde 1872, actualmente es operada por Freeport McMoRan, que posee el 85%, mientras que el 15% restante pertenece a Sumitomo Affiliates. Morenci es el mayor productor de cobre en América del Norte
Oyu Tolgoi	Ubicada en la región sur de Gobi de Mongolia, es un pórfido de Cu – Au – Mo, de vena estrecha producto del magmatismo que estuvo activo periódicamente desde el Neoproterozoico tardío hasta Permo-Triassic, que se extiende desde los Montes Urales hasta el Océano Pacífico. El depósito de Oyu Tolgoi está asociado con intrusiones múltiples y superpuestas de Devónico tardío (w372 a 370	Los primeros diques veteados de cuarzo tipo A fueron seguidos por mineralización de Cu-Au asociada con alteración potásica, principalmente feldespato K en monzodiorita de cuarzo y magnetita de biotita en huéspedes basálticos. RECURSOS: Se han estimado recursos por el orden de 42 Mt de Cu y 1850 t de Au. https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1674987115000924?token=00DE47F10BED73239E871D086744C3215A301D3C6FD42C3C28F09C6EEE7761D0A0158089291CCA	Es una de las operaciones más modernas, seguras y sostenibles, el depósito de cobre y oro que explota es considerado el más grande conocido en el mundo. Su proyección le permitirá ser la tercera mina de cobre más grande del mundo, esta en pleno proceso de restructuración de su producción para aplicar sistemas combinado de producción cielo abierto y subterráneo luego del cual (2028) se espera alcance una producción de 480 Kt de cobre al año.

	Ma) cuarzo-monzodiorita intruso Devónico (o más viejo), lava basáltica juvenil, probablemente rocas relacionadas con el arco intraoceánico y rocas volcánicas menores, superpuestas de manera inconformista por Devónico tardío (w370 Ma) rocas sedimentarias basálticas a daciticiroplásticas y volcánicas.	772450409BED64702.	
El Teniente	Está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua, a 80 km al sur de la capital chilena, Santiago. Es un pórfido de Cu – Mo más grande conocido, está relacionado con la actividad ígnea del mioceno tardío plioceno temprano en las laderas occidentales de la cordillera de los andes. El teniente se distribuye dentro de un stock de vetas mineralizadas y brechas hidrotermales menores dentro de andesitas, basaltos y gabros alterados de forma generalizada que forman parte de las rocas del país del alto mioceno. Dos cuerpos intrusivos ocurren dentro del depósito, la diorita (tonalita) en la parte sureste de yacimiento y el pórfido de teniente (dique norte sur) dacítico en su parte norte. las intrusiones menores de cuarzo diorita o tonalita conocida como diorita central y diorita del norte. las brechas hidrotermales ocurren comúnmente a lo largo de los contactos de cuerpos intrusivos con las rocas del país. https://www.miningdataonline.com/reports/annual/Codelco_annual_report_2017.pdf	Actualmente se distinguen tres etapas hipógenas de alteración y mineralización: la Tardimagmática, la Hidrotermal Principal y la etapa Hidrotermal Tardía. Adicionalmente se distingue una etapa Supérgena. Estas se habrían sucedido de manera continua para formar la mineralización del yacimiento, cuyo origen se asocia al emplazamiento de los pórfidos dacítico y diorítico, Brecha Hidrotermal de turmalina y Brecha Braden (Howell y Molloy, 1960). Durante las etapas hipógenas se desarrolló la zonación mineralógica consistente en un núcleo bornita-calcopirita, envuelto por una capa de calcopirita mayor que bornita, esta a su vez envuelta por una zona de calcopirita y un halo de pirita. Otros centros de mineralización hipógena se asocian a los Pórfidos Diorítico y Microdiorítico y al desarrollo de brechas hidrotermales de altas leyes. El emplazamiento de la Pipa Braden corresponde al evento terminal de la evolución de la mineralización, donde este elimina gran parte del núcleo de bornita y lo reemplaza por pirita. La alteración supérgena se produce por una infiltración gradual de aguas desde la superficie que genera lixiviación y enriquecimiento secundario en la parte alta de la 22 mineralización. Aparecen nuevos minerales de alteración, como sericita, arcillas, minerales oxidados en los niveles superiores. En profundidad aumenta la ley de cobre debido a la aparición de calcosina sobre calcopirita y menor cantidad de covelina en pátinas. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113301/cfbaraona_kl.pdf?sequence=1&isAllowed=y RECURSOS: Nuevo Nivel Mina (NNM) consiste en ampliar la mina El Teniente en un sector más profundo del cerro (cota 1.880), para asegurar la continuidad operacional de la	El Teniente es la mina de cobre subterráneo más grande del planeta, comenzó a ser explotada en 1905, y ya cuenta con más de 3,000 kilómetros de galerías subterráneas, produce 432 Kt de cobre al año, operada por Codelco. Actualmente, la empresa está llevando a cabo un proceso de expansión con la intención de ampliar la vida de producción en 50 años.

		División El Teniente. El proyecto NNM suma 2.020 millones de toneladas de reservas, con una ley media de cobre de 0,86% y una ley media de molibdeno de 0,022%, que se traducen –en un período de más de 50 años de operación contados desde el año 2018- en más de 17 millones de toneladas de cobre fino. https://www.codelco.com/nuevo-nivel-mina-el-teniente/prontus_codelco/2011-07-06/130724.html	
Grasberg Freeport	Ubicada en la provincia de Papúa en Indonesia, es un depósito pórfido skarn, se encuentra en la colisión de las placas tectónicas indo-australianas y del Pacífico. Dos fases distintas de intrusión han llevado a la producción de cuerpos de mineral de pórfido coaxial anidados y skarn rico en sulfuro en los márgenes, mientras que los estratos sedimentarios incluyen piedra caliza de carbonato clástico Eoceno con limolitas y areniscas cerca de la base. El Dalam Diatreme (DD) forma la primera etapa intrusiva, siendo altamente fragmentario y caracterizado por clastos y una matriz de composición diorítica	La mineralización está ampliamente diseminada y la calcopirita es dominante, con leyes promedio de 1.2% de cobre y 0.5g / t de oro. La segunda etapa intrusiva, el stock principal de Grasberg (MG), se compone de monzodioritas porfíricas no fragmentarias, formando un stock de dilatación de cuarzo-magnetita con mineralización de cobre-oro controlada por veinlet. Este es un recurso de alto grado, con promedios de 1.5% de cobre y 2g / t de oro. RECURSOS: Tiene reservas probada y demostrable de 2.8 billones de toneladas de 1.09% de Cu. Las reservas también contienen 0,98 g / t de oro y 3,87 g / t de plata. https://miningdataonline.com/property/303/Grasberg-Mine.aspx	Es la segunda mina de cobre más grande del mundo, y la más grande de oro por reserva. Operación dirigida por PT Freeport Indonesia Co, con producción anual de 750 kt. Descubierta en 1988, e inicio de operación en 1990, Grasberg es una de las minas a cielo abierto más grandes del mundo. Propiedad de Freeport McMoran Copper & Gold Inc. (67.3%), Rio Tinto (13%), Gobierno de Indonesia (9.3%), PT Indocopper Investama Corporation (9%).
Las Bambas	Ubicado al sureste de Perú, en el área de Cotabambas, Apurímac, es un depósito tipo Skarn de Cu (Mo Au), compuestos por rocas de cuarzo monzonita de granodiorita. Las rocas intrusivas del batolito en contacto con las calizas de ferrobamba dieron lugar al metamorfismo de contacto y en ciertos lugares a cuerpos de skarn con mineralización de Cu (Mo Au) https://miningdataonline.com/property/641/Las-Bambas-Mine.aspx	Los sulfuros de cobre hipogénicos son los principales minerales que contienen cobre, con una mayor ocurrencia de óxidos de cobre y carbonatos supergénicos cerca de la superficie. RECURSOS: Cuenta con reservas minerales de 6,882 millones de toneladas de cobre y recursos minerales de 10,649 millones de toneladas (a fines de 31 de diciembre 2018). El tiempo de vida de la mina estimado es de dieciocho años, con un considerable potencial de exploración.	Esta mina produce 450 kt. de cobre por año, de propiedad de MMG (accionista mayoritario con 62.5% de propiedad), Guoxin International Investment Co. Ltd. (22.5%) y CITIC Metal Co. Ltd. (15%), solo el 10% de la propiedad de la mina ha sido desarrollado. Según las proyecciones del proyecto, se espera que cuando la mina esté en plena producción, será la mina de cobre más grande del mundo, colocando a Perú como líder mundial en la producción del cobre.
Antamina	Ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la Región Ancash a 170 millas al norte de la capital de Perú, Lima. Es un depósito tipo Skarn, intrusión del cuerpo de	La mineralización está asociada a los minerales granates que contienen las rocas skarn y a algunos sulfuros como la calcopirita, bornita, esfalerita y molibdenita, dando como resultado un enriquecimiento principalmente de Cu y en menor medida Zn, Ag, Mo.	Es una empresa de BHP Billiton (33,75%), Teck (22,5%), Glencore PLC (33,75%) y Mitsubishi Corp. (10%), según el ICSG. Produce 450 kt de cobre por año y está programado que culmine el permiso para explotación en el 2029, el cual se

	cuarzo monzonita en las calizas. La litología de Skarn generalmente se divide en zonas desde la fuente de fluido hacia adentro y hacia afuera. se encuentra emplazado desde el Jurásico medio con la Formación Oyotún hasta el Cretácico Superior con la Formación Celendín y ubicándose metalogenéticamente en la cordillera occidental; su geología local está determinada por la litología perteneciente a la Formación Jumasha y a la Formación Celendín y en su marco estructural está afectada por fallas transversales al sistema andino. El yacimiento se caracteriza por la intrusión ígnea de un pórfido cuarzo-monzonítico en rocas calcáreas dando así la formación de un depósito tipo Skarn, y que de acuerdo a su alteración ha producido las rocas con el mismo nombre (skarns) que están ligados con diferentes tipos de granates y otros minerales como la wollastonita los cuales influyen en la distinción de dominios del depósito, además la zonación está dada de tres formas según la proximidad al intrusión así se tiene el endoskarn, el skarn intermedio y el exoskarn.	RECURSOS: Se han estimado un total 745 millones de toneladas métricas y un total de 1,934 millones de toneladas de recursos. La vida útil de la mina se ha estimado hasta el 2029. https://miningdataonline.com/property/138/Antamina-Mine.aspx https://www.academia.edu/37325072/Geología y Alcances Generales del Yacimiento Minero de Antamina Perú	renovar incluso antes del cese de este. Además del cobre, también se producción de plata, bismuto, molibdeno y plomo.
Polar División de Norilsk	Ubicada en la península rusa de Taimyr en la ciudad de Norilisk, es un depósito de masa intrusiva de gabro y diabasas que contienen sulfuros diseminados, donde los intrusivos son principalmente diabasa y gabro-diabética, pero incluyen rocas diferenciadas como la picrita, la tschenita, profilita labradorita, diabasa augusta titanífera, y otros tipos	Los minerales esenciales de los indiferenciados las rocas son feldespato plagioclasas (comúnmente labradorita), augita, hornblenda, biotita y olivina, con los minerales secundarios clorita, serpentina, sericita, prehnita, y las zeolitas. RECURSOS: Se estima que hay 63 millones de toneladas de reservas. https:// www.nornickel.ru/business/assets/taimyr/	Mina de Norilsk Nickel. Produce anualmente 450 kt de cobre. La División Polar se abrió en la década de 1930 como una mina de níquel, antes de convertirse en una mina de varios tipos diferentes de metales: cobalto, oro, plata, platino y, por supuesto cobre.

	especializados. Estos intrusivos difieren morfológicamente de los de Sudbury en que se producen como grandes diques, alféizares y cuerpos intrusivos menos regulares. Este depósito es rico en cobre, níquel y platino.		
Kansanshi	Está ubicado Chief Kapampangan, en Zambia, es un depósito de tipo vena estrecha de origen hidrotermal, donde el cobre se aloja en vetas y estratos hidrotermales, estructuralmente controlados, el depósito alojado por metasedimentos deformados del grupo Kundu Lungu inferior, dentro del supergrupo Katanga del cinturón de cobre de África central de Zambia. Las unidades de roca individuales de la secuencia estratigráfica comprenden dolomitas, mármoles dolomíticos y varios esquistos y filitas. Los depósitos recientemente definidos de South East Dome y Rocky Hill, en el sureste del área del proyecto están alojados de manera similar pero separados de la mina principal por una discontinuidad estructural.	Hay tres estilos de mineralización de sulfuro primario asociado con cúpulas: mineralización estratificada y diseminada, inmersión vertical, venas de sulfuro de carbonato de cuarzo que cortan la estratigrafía, mineralización de brechas. La mineralización primaria de sulfuro de cobre está dominada por calcopirita y bornita muy menor y está acompañada con pirita y pirrotita relativamente menor. La mineralización de óxido está dominada por crisocola y malaquita, limonita y goethita cuprífera. https://www.fqmcareers.com/es/nuestrasedes/zambia/kansanshi/nuestras-operaciones	Mina de propiedad de First Quantum Minerals. Ha avanzado mucho desde el primer año de producción en el 2005, en que produjo 70,000 toneladas de cobre. En la actualidad, Kansanshi produce más de 270 Kt de cobre al año, emplea a más de 13.000 personas y utiliza tecnología de última generación para extraer cobre y oro de tres tipos de minerales muy diferentes, con eficiencia de primer nivel.
Tenke Fungurume	Esta situada dentro del cinturón de cobre africano en la República Democrática del Congo, es un depósito tipo stratabound (SMS), hace parte de la ventana tectónica del cinturón de cobre de África central, rodeada de conjunto litotectónicos. La mineralización de cobre está asociada a los bloques de lutitas dolomíticas (RSF y SDB), separados por dolomita celular silicificada.	La mineralización primaria de cobre es predominantemente calcocita (Cu ₂ S), digenita (Cu ₉ S ₅), bornita (Cu ₅ FeS ₄) y carrollita (CuCo ₂ S ₄). La oxidación ha resultado en una alteración generalizada que produce malaquita (Cu ₂ CO ₃), pseudomalaquita (Cu ₅ (PO ₄) ₂ (OH) ₄), crisocola (silicato de cobre hidratado y heterogenita (Co ₃ + O (OH))). https://miningdataonline.com/property/302/TenkeFungurume-Mine.aspx	
La Mutanda	Se encuentra aproximadamente 40 kilómetros al sureste de Kolwezi en la provincia de Katanga de la República Democrática del Congo, es un depósito de cobre y cobalto alojado en sedimentos, se encuentra en la parte inferior de la sucesión sedimentaria neoproterozoica de Katanga, que se extiende	Los principales minerales de óxido de cobre presentes son malaquita y pseudomalaquita, con heterogenita, el principal mineral de cobalto. El cuarzo y el clorito dominan el componente de ganga en todas sus muestras. Los minerales de sulfuro aún no se han sometido a un análisis mineralógico de laboratorio.	

	a lo largo de más de 700 km desde zambia a través de la provincia de Katanga de la RDC y tiene hasta 150 km de ancho. Es parte de un cinturón de empuje y plegado conocido como el arco lufillian, comparte las mismas características de la mayoría de los depósitos dentro de copper belt al ser estratiforme y asociado con carbonatos o litologías ricas en carbón.	https://miningdataonline.com/property/3150/MutandaMine.aspx	
--	--	--	--

Fuente: UPME, Subdirección de minería

Según lo presentado en los numerales 2.1. y 2.2 de este informe los depósitos de polimetálicos con contenido de cobre en Colombia son alta sulfuración a diferencia de la mayoría de los principales proyectos que se encuentran en producción en el mundo, que también contienen óxidos de cobre y sulfuros de cobre de baja sulfuración, que facilita la obtención de cobre refinado a través de procesos de lixiviación con ácido.

Los recursos y reservas hasta ahora estimados en Colombia en los proyectos que tienen avances importantes en la modelación geológica de los depósitos muestran que están muy por debajo de los recursos y reservas de los estimados para los principales proyectos en operación en el mundo. El proyecto con mayores recursos y reservas estimado en Colombia es Quebradona, y en el mejor de los casos representan aproximadamente el 50% de los recursos y reservas de los principales proyectos en la operación en el mundo.

Los contenidos de cobre en los proyectos en operación en Colombia (El Roble) y el proyecto con estudio de factibilidad técnica finalizado (Quebradona) cuyo metal principal es el cobre muestran tenores entre 1.2 y 3.6%, mientras que los principales proyectos en operación en el mundo muestran tenores por debajo de 1%, estando la mayoría alrededor del 0.8%, contenido que va disminuyendo a medida que se profundiza en el depósito.

3.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA EXTRACCIÓN DE MINERAL DE COBRE

La extracción de minerales se realiza básicamente bajo dos grandes sistemas identificados como minería a cielo abierto y minería subterránea, la extracción de mineral de cobre no difiere de esta condición y al igual que para otros minerales como una variante de estos dos sistemas, surge otro que es el mixto o combinado.

La minería cielo abierto se caracteriza por el movimiento de grandes volúmenes de material rocoso, compuesto por material estéril (rocas con bajo o nulos valores del metal de interés, para nuestro caso cobre) y mena o mineral (rocas con contenidos del metal de interés, que hacen viable su extracción mediante un proceso de minado), la relación entre estos dos tipos de roca es una de las variables críticas a tener en cuenta para definir la viabilidad económica del proyecto, la cual varía de forma considerable de un proyecto a otro, ya que está muy relacionada con las características geológicas del yacimiento y condiciona por ejemplo la profundidad de la excavación desde superficie.

La minería subterránea es más selectiva y la extracción de estéril suele ser muy baja a lo largo de la vida de la mina, al igual que la minería a cielo abierto, este sistema requiere de grandes esfuerzos, conocimiento e inversión para garantizar la estabilidad de las excavaciones, el control del derrumbe de los estratos rocosos suprayacentes a las excavaciones, y sobre todo para controlar la proyección de los hundimientos del terreno en superficie y un ambiente de trabajo adecuado en el interior de la mina (ventilación, iluminación y desagüe).

El sistema mixto o combinado como su nombre lo indica es una combinación de minería a cielo abierto y subterránea en un mismo proyecto para garantizar una adecuada extracción y aprovechamiento del recurso mineral bajo condiciones económicas y ambientales sostenibles, se comienza con una operación a cielo abierto y luego a una subterránea, pueden operar la dos de forma simultánea o en ocasiones se migra de forma paulatina de una operación a cielo abierto a una subterránea, dependiendo de condiciones técnicas, ambientales y económicas.

Los depósitos de cobre a nivel internacional, según sus condiciones geológicas, generalmente se explotan a cielo abierto, 15 de los 19 principales proyectos de cobre analizados en este informe a nivel mundial se explotan con este sistema (Ver tabla 9), y 2 recurren a métodos mixtos, solo 2 de los grandes proyectos a nivel mundial de explotación de cobre aplican exclusivamente la minería subterránea, estos proyectos mineros son Polar División Norilsk y El Teniente.

En Colombia el único proyecto (mina El Roble) que en la actualidad extrae mineral de cobre como parte de un concentrado lo realiza de forma subterránea, y los dos proyectos (Quebradona y Soto Norte) que han presentado estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental, tienen proyectado la extracción del mineral con minería subterránea.

A continuación, se presenta información de las principales características técnicas de la extracción de mineral de cobre en Colombia, de los proyectos El Roble (departamento del Chocó) y la propuesta de extracción del proyecto Quebradona (departamento de Antioquia),

ya que en estos proyectos el metal principal a extraer es el cobre. Para el caso del proyecto Soto Norte (Departamento de Santander), no se presenta esta información, ya que el cobre no es el metal principal dentro del concentrado que se producirá, el metal principal que tendrá dicho concentrado es el oro, luego la plata y en tercer lugar el cobre.

También se detalla la información técnica de extracción de Cu de dos proyectos a nivel internacional que, por las características geológicas y método de explotación se asemejan a los proyectos que tienen estudios de factibilidad en Colombia.

3.2.1. Proyecto Quebradona: La ubicación y las principales características geológicas de este proyecto se describen en el numeral 2.2.2, este proyecto presentó el estudio de impacto ambiental en el año 2019, el cual se encuentra en evaluación por parte de la autoridad ambiental (Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA), de ser aprobado y obtener la licencia ambiental se cumpliría con los requisitos requeridos en Colombia para entrar en la etapa de construcción y montaje y posteriormente a la de explotación.

El área concedida al título minero del proyecto Quebradona tiene una superficie de 7,593 hectáreas (ha)¹⁴, de las cuales el proyecto intervendrá 471 ha, es decir aproximadamente el 2.4% del territorio total del Municipio de Jericó.

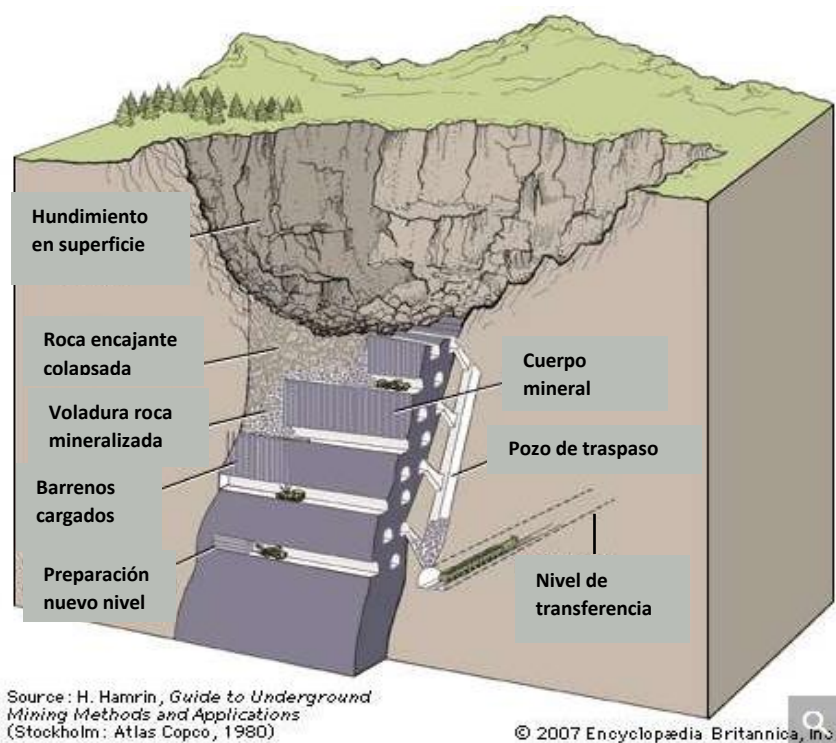
3.2.1.1. Operación Minera:¹⁵ En este proyecto se tienen planeado extraer el mineral de forma subterránea, aplicando el método de hundimiento por subniveles (Sublevel Caving), el cual se ilustra en la figura 11.

El acceso al cuerpo mineralizado desde superficie se realizará a través de dos excavaciones identificadas como túnel sur y norte, con una separación entre ellos de 50 metros, cada uno tendrán una longitud de 6 Km y avanzaran de forma paralela, con una sección de 10X10 metros, para remover el material de estas excavaciones en los primeros 300 metros se utilizará maquinaria pesada (excavadoras, cargadores, camiones) y perforación y voladura, dependiendo de la dureza de la roca. De los 300 metros en adelante las excavaciones cambiarán de sección a 6X6 metros, y se utilizará para el arranque de la roca perforación y voladura; la perforación (barrenos) se realizará de manera mecanizada con el uso de equipos móviles denominados Jumbos, provistos de brazos mecánicos sobre los cuales están montadas perforadoras hidráulicas. La sustancia explosiva será tipo emulsión a granel, que será cargada a los barrenos con un equipo mecanizado, el cual consiste en una plataforma provista de una bomba que inyecta el explosivo al interior del barreno.

¹⁴ Reporte de Gestión BIC 2020. Minera de Cobre Quebradona S.A.S. BIC

¹⁵ Adaptado de: <https://www.anglogoldashanticolombia.com/home/quebradona/#gallery>

Figura 11. Método de explotación de hundimiento por subniveles



Fuente: <https://www.britannica.com/topic/sublevel-caving>.

Adaptación UPME,

Subdirección de Minería

A 1.5 kilómetros en el túnel sur se realizará una bifurcación de donde se desprenderá una excavación en diagonal hacia arriba con un gradiente de 10%, manteniendo la misma sección y avanzando hasta cortar el cuerpo rocoso mineralizado en la parte superior del mismo.

El otro ramal del túnel sur continuará con un pendiente semi horizontal (gradiente 0.5%) y una longitud de 5 Km y llegará a la cámara de trituración primaria, en el nivel más bajo de la mina.

El túnel norte se construirá con una pendiente de 0.5% y avanzará hasta la cámara de trituración, de forma paralela (gemelo) al túnel sur que llega a la trituradora, y estarán conectados cada 150 m por galerías, las cuales favorecerán las condiciones de ventilación y permitirán desviar la circulación de la maquinaria en caso de ser necesario. A los 1.8 Km de avance de este túnel se realizará una bifurcación (rampa) con gradiente de 14.5% que comunicará con la parte superior del cuerpo mineralizado.

Desde superficie y lo más cercano posible al cuerpo mineralizado se construirán 4 pozos, que cortarán los subniveles de producción y de esta forma generar el circuito de ventilación, que garantizará el suministro de aire limpio para lo cual se utilizarán dos de los cuatro pozos y para la evacuación de aire viciado del interior de la mina se utilizarán los otros dos pozos

y de esta forma mantener una atmósfera subterránea adecuada para adelantar las labores mineras.

Estas excavaciones, más el pozo de traspaso y nivel de transferencia son las que permiten acceder de forma segura al cuerpo mineralizado; por esta razón son las denominadas labores de desarrollo, que por lo general se realizan en la etapa de construcción y montaje.

La roca estéril producto de la construcción de los túneles, rampas, pozos y galerías subterráneas propias de las labores de desarrollo se extraerán y transportarán hasta superficie a través de banda transportadora y volquetas.

La estabilidad de las excavaciones se garantiza con la aplicación de concreto lanzado, pernos y marcos de aceros los cuales se utilizarán de acuerdo con las condiciones geomecánicas de la roca; en las zonas más inestables se utilizará malla electrosoldada con la posterior aplicación de concreto lanzado, los pernos se colocarán en las paredes de las excavaciones ya sea con roca fresca o con revestimiento en concreto. El papel principal de los pernos es el control de la estabilidad de los bloques y cuñas rocosas potencialmente inestables.

Cuando se está en el cuerpo mineralizado, que esta aproximadamente a 470 metros bajo la superficie y se extiende hacia profundidad otros 577 metros verticales, se comienza las labores de preparación, que para el método planteado (hundimiento por subniveles) consiste en la excavación de niveles (subniveles), comenzando por la parte superior del depósito, es decir cerca a la cota 1702 y avanzando secuencialmente hacia las cotas inferiores, hasta llegar a la cota 1125 (ver gráfico 11), se tiene proyectado la construcción de 21 subniveles, el arranque del mineral se realizará con perforación y voladura.

Los bloques de roca mineralizada que están entre los subniveles se arrancan con perforación y voladura, esta operación corresponde a las labores de explotación. La perforación se realizará de manera ascendente del subnivel inferior al superior, para esto se requerirá de un equipo tipo Jumbo perforador de barrenos largos, cuya longitud máxima es de 31 metros. El equipo perforador está diseñado para realizar perforaciones verticales o inclinadas.

La sustancia explosiva utilizada en la fase de explotación es de tipo emulsión bombeable gasificada para barrenos verticales, que tienen propiedad de adherirse a las paredes internas del barreno, y evitar el derrame por efecto de la gravedad.

El avance de las labores de explotación es de forma secuencia de la parte superior del depósito a las cotas inferiores, como se muestra en la figura 12.

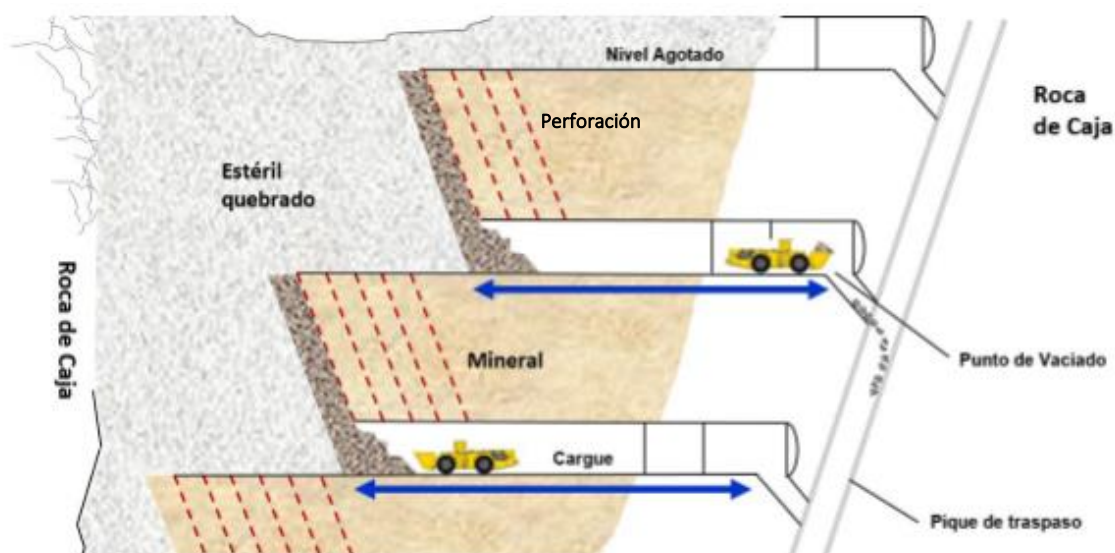
El material arrancado tanto en la etapa de preparación (construcción de los subniveles) como explotación se carga y transporta con cargadores con capacidad de 14 a 25 toneladas, que pueden ser de propulsión Diesel o Eléctrico, que lleva el material mineralizado a través

de los subniveles, hasta el pozo de traspaso; que es una excavación vertical que se comunica con todos los subniveles, en el proyecto se tiene diseñado realizar seis (6) pozos de traspaso.

El mineral cae por gravedad por el pozo de traspaso hasta el nivel de transferencia, de allí es transportado por cargadores hasta la cámara de trituración primaria, la cual se encuentra a un kilómetro de profundidad de la superficie, terminando de esta forma el proceso de minado e iniciando el proceso de beneficio.

En total el área a explotar en la parte superior tiene una superficie de 9.69 ha y en la parte inferior 14.22 ha, se estima que la operación de mina durará 25 años, en los cuales se extraerá 124 millones de toneladas (Mt) de roca mineralizada y 5.72 Mt de roca estéril producto de las excavaciones de desarrollo. Los cuatro (4) primeros años será para las labores de desarrollo y 21 años para las labores de preparación y explotación. En tabla 10 se muestra la cantidad y el tipo de material a extraer por año.

Figura 12 Secuencia avance labores de explotación



Fuente: Mineral de cobre Quebradona, 2019.

En la mina se trabajará 365 días en el año, 24 horas al día en tres turnos de 8 horas, para extraer 6.2 millones de toneladas por año (Mtpa)

Tabla 10. Material removido en la vida del proyecto.

AÑOS	ROCA MINERALIZADA (kt)			ESTERIL (kt)	TOTAL MATERIAL MOVIDO (kt)
	Dsarrollo	Producción	Total		
1 (Construcción)	-	-	-	998	998
2	-	-	-	1.630	1.630
3	147	-	147	1.130	1.277
4	931	2.145	3.076	807	3.883
5 (Operación)	716	4.010	4.726	220	4.946
6	572	5.027	5.599	80	5.679
7	578	5.272	5.850	69	5.919
8	567	5.474	6.041	67	6.108
9	385	5.487	5.872	41	5.913
10	331	5.482	5.813	34	5.847
11	222	5.840	6.062	51	6.113
12	289	5.852	6.141	56	6.197
13	298	5.874	6.172	62	6.234
14	295	5.855	6.150	67	6.217
15	317	5.859	6.176	45	6.221
16	594	5.674	6.268	49	6.317
17	576	5.600	6.176	41	6.217
18	571	5.518	6.089	46	6.135
19	548	5.549	6.097	35	6.132
20	450	5.502	5.952	90	6.042
21	559	5.521	6.080	75	6.155
22	551	4.963	5.514	26	5.540
23	528	5.184	5.712	-	5.712
24	13	5.740	5.753	-	5.753
25	-	2.884	2.884	-	2.884
TOTAL	10.038	114.312	124.350	5.719	130.069

Fuente: Minera de cobre Quebradona, 2019.

3.2.1.2. Beneficio: El proceso de beneficio consta de una trituración primaria, secundaria y terciaria, molienda, concentración por flotación y espesamiento

La trituración primaria se realizará al interior de la mina, mediante una trituradora giratoria tipo cónica, con capacidad de procesamiento máximo de 1,374 toneladas por hora, con lo cual se proyecta triturar 6.2 Mtpa.

El mineral triturado es conducido a través del túnel principal de transporte hasta el patio de acopio de la planta de beneficio en superficie, por una banda de aproximadamente 6 kilómetros de longitud, 42" de ancho a una velocidad de 2.69 m/s, bajo estas características se estima que tendrá una capacidad de transporte de 1,041 t/h.

El proceso de beneficio en superficie empieza con el cribado del mineral en seco, el sobre tamaño (roca con tamaño mayor a 51 mm) va a la trituración secundaria y el pasante van a la trituración terciaria.

La trituración secundaria se realiza con una trituradora cónica que trabaja en circuito cerrado en seco (es decir el material triturado pasa a una criba, el sobre tamaño es regresado a la trituración secundaria y pasante va a la siguiente etapa de trituración) el material que cumple con la especificación de tamaño requerido pasa a la trituración terciaria.

La trituración terciaria se realiza en un molino de rodillos de alta presión que opera en circuito cerrado con cribado húmedo, el material que alcanza el tamaño requerido (4 mm) pasa a la molienda, que se realiza con un molino de bolas que opera en circuito cerrado por medio de hidrociclones, el sobre flujo (pulpa con partículas con tamaño de 106 μm) pasa al siguiente ciclo (concentración) y el bajo flujo regresa a la molienda.

El sobre flujo de los hidrociclones pasa a flotación flash para capturar sulfuros metálicos y oro. El concentrado del sistema de flotación flash es bombeado hacia el circuito de remolienda de concentrado de cobre, mientras que las colas (relaves) de la flotación flash son retornados al circuito del molino de bolas.

El sobre flujo de flotación flash continua a las celdas de flotación rougher, el sobre flujo de este proceso de concentración es concentrado de cobre, y las colas pasan a las celdas de flotación scavenger, el sobre flujo de este proceso es concentrado de cobre y el bajo flujo son colas (relaves).

Los concentrados producidos en la flotación rougher y scavenger, pasan al proceso de remolienda, que se realiza en un molino Isamill, y se forman dos flujos para el proceso; uno con los concentrados de cobre de flotación flash el cual se une con el concentrado de cobre rougher y el otro con los concentrados de cobre scavenger, el objetivo del proceso de remolienda de concentrados de cobre es tener tamaños de partícula de 38 μm .

El producto del circuito de remolienda es enviado hacia la flotación de limpieza, que consta de tres etapas: las primeras dos etapas (cleaner y recleaner) están compuestas por tanques de flotación de aire forzado y la tercera etapa (tercer cleaner) es una celda Jameson.

Los concentrados de la flotación de limpieza cleaner pasan a recleaner y los concentrados de recleaner pasan a la flotación de limpieza de tercer cleaner, el bajo flujo de cleaner y recleaner salen del proceso como colas (relaves).

El sobre flujo (concentrado) del proceso de flotación de limpieza de tercer cleaner es el concentrado de alta ley con 27.9% de cobre (Cu), 9.99 g/t de oro (Au) y 115 g/t de plata (Ag), el cual pasa al ciclo de deshidratación, el bajo flujo (colas) entran nuevamente al ciclo de recleaner.

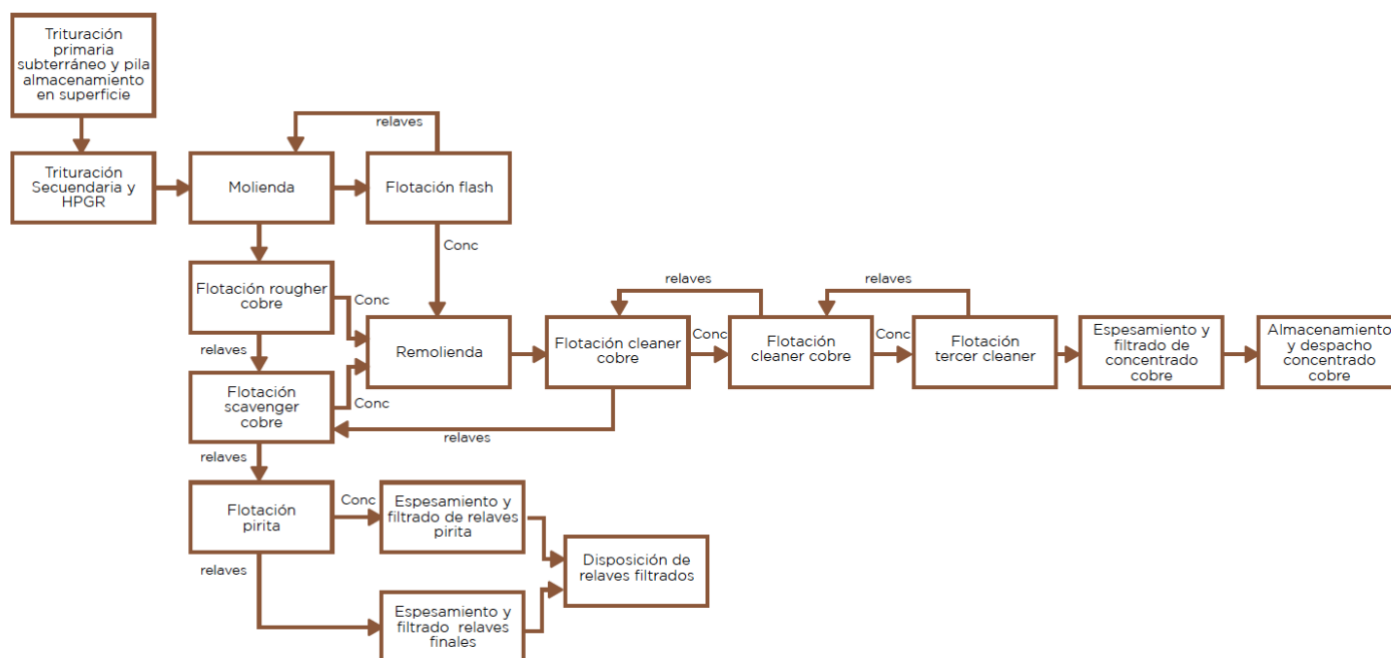
Se estima que el proceso de beneficio está diseñado para alcanza una recuperación del 93.7% de Cu, 57.6% de Au y 85.9% de Ag.

El ciclo de deshidratación se hace por sedimentación de partículas para lo cual se utilizan floculantes, el agua de reboce se reutiliza en el proceso de beneficio.

De esta forma se obtiene una pulpa de concentrado con alto contenido de sólidos, el cual es filtrado para producir una torta con una humedad residual apta para el cargue, transporte y comercialización.

La figura 13 corresponde al diagrama general del proceso de beneficio del proyecto Quebradona.

Figura 13. Esquema general del proceso de beneficio



Fuente: Minera de cobre Quebradona. 2019.

3.2.1.3. Colas (relaves) del proceso de beneficio: Las colas generadas en el proceso de beneficio son de dos tipos inertes y colas con pirita, las cuales deben ser adecuadamente manejadas.

Las colas (relaves) con pirita, debido a los niveles de componentes sulfurados (pirita) tienen la implicación ambiental de ser un potencial generador de agua ácida en las pilas de las colas (relaves), deben ser sometidas a flotación de pirita y espesamiento para separarla y disponerla encapsulada en una geomembrana de polietileno de alta densidad y será ubicado dentro del depósito de relaves filtrados inertes, de tal forma que queden cubiertos con una

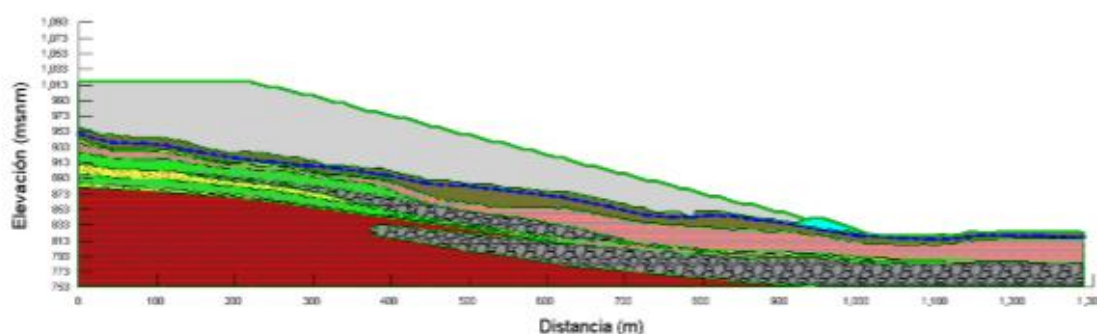
capa de las colas inertes de mínimo 10 metros de espesor, para impedir el contacto con el agua y el oxígeno y evitar la generación de aguas ácidas.

El área para disponer las colas tiene una superficie de 106.23 ha, su disposición inicia en la cota 838 msnm y termina en la 1,010 lo que garantizará un tiempo de vida útil de 21 años, es decir tendrá la capacidad de almacenar todos los relaves generados durante la operación de la planta de beneficio.

Bajo estas características se diseña un sitio para disponer las colas del proceso de beneficio con una capacidad de almacenamiento de 119.43 Mt de colas filtradas, de las cuales 13.57 Mt, corresponden a colas con pirita y 105.87 Mt de colas filtradas inertes.

Para el diseño del depósito de relaves se tuvo en cuenta la topografía del terreno, características del suelo y cobertura vegetal, características geológicas, profundidad de los acuíferos, calidad del agua subterránea, sismicidad y pluviosidad para garantizar la estabilidad del depósito de colas durante la operación, cierre y post cierre del proyecto. En la figura 14 se puede apreciar el perfil del terreno y un esquema general de cómo se depositarán los relaves filtrados

Figura 14. Perfil del terreno donde se dispone los relaves

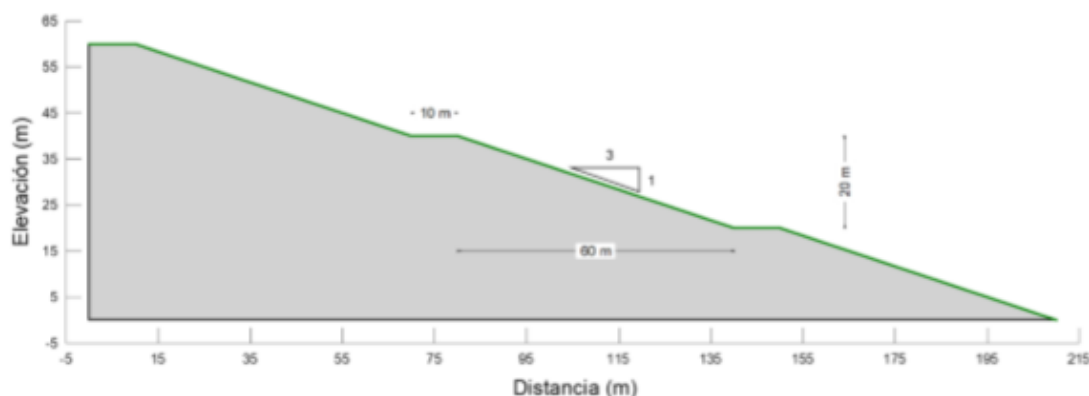


Fuente: Minera de cobre Quebradona. 2019.

Se construirá por medio de bancos cuyas características son pendiente entre bancos 3H:1V, altura del banco 20 metros y amplitud de la berma 10 metros, la figura 15 muestra las principales características de geométricas del del depósito.

3.2.1.4. Costo de operación: Los costos de operación promedio para la vida de la mina incluyen todos aquellos costos necesarios para la producción, extracción y beneficio del material incluyendo los costos de soporte y administración. Los costos de operación se estiman entre otros, asumiendo para los equipos horas de operación, disponibilidad y uso del 85% y ratas de consumo, los costos incluyen:

Figura 15 Características geométricas del depósito de colas filtradas



Fuente: Minera de cobre Quebradona. 2019.

- Cantidad, nivel de personal requerido, salarios y beneficios asociados.
- Consumos y costos de: - Energía - Explosivos - Repuestos - Combustibles - Insumos Reactivos, medios de molienda y consumibles operativos – Mantenimiento.
- Gastos generales y de Administración.
- Gastos de manejo de estériles y colas.
- Gastos de soporte a la minería y metalurgia (geología, planeación minera, ingeniería, etc.)
- Gastos de soporte a operaciones (transporte terrestre, alimentación, seguridad, protección, etc.).
- Servicios Contratados - Gastos de administración (oficina, seguros, legales, etc.).
- Gastos de cierre progresivo, cierre y post cierre de la operación minera
- Gastos de venta del concentrado, relacionados a transporte terrestre y marítimo del concentrado, costos de tratamiento y refinación del concentrado, más pruebas y muestreos de los materiales en el proceso.

En el proyecto se agrupan estos costos en tres grandes grupos y en promedio los costos de proyecto por unidad de producción es el siguiente; minería (extracción) US¹⁶\$9.61/t, que representan el 19% de los costos totales del proyecto, beneficio US\$6.25/t que representa el 13% y gastos generales y de administración US\$33.31/t que representa el 68% de los costos totales.

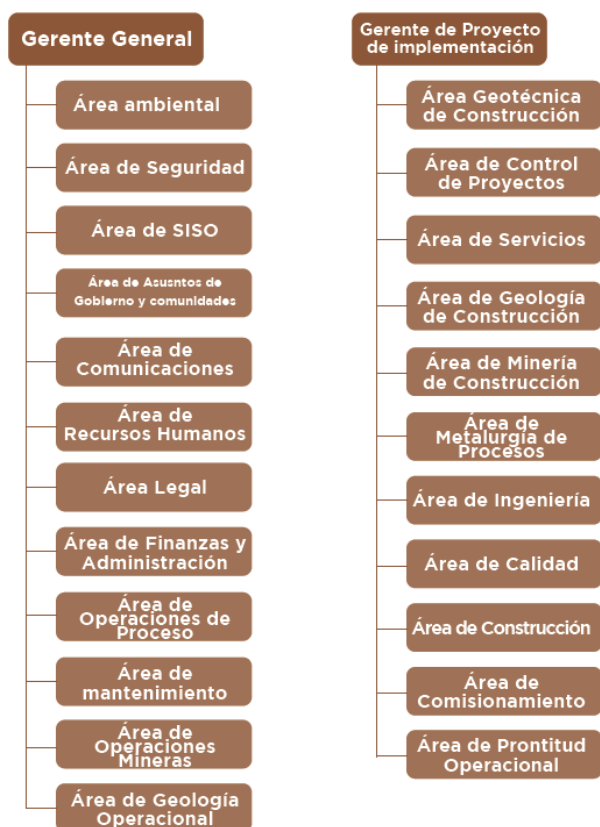
3.2.1.5. Personal: La estructura organizacional de la empresa debe ser flexible y se debe adaptar a los requerimientos del proyecto en cada una de sus etapas y a los avances tecnológicos.

El proyecto se lleva a cabo en tres etapas; construcción y montaje, operación del proyecto (minado y beneficio) y abandono y cierre; se configuró una estructura general de la empresa

¹⁶ Dólares constantes a 2018.

que estará vigente en cada una de estas etapas y es la que garantizará un adecuado empalme entre cada etapa, y que cada una de ellas se rija por las políticas trazadas por la empresa. En la figura 16 se puede apreciar la estructura organizacional planteada.

Figura 16. Estructura organizacional del proyecto



Fuente: Minera de cobre Quebradona, 2018.

Para cumplir con las labores requeridas en cada una de las etapas del proyecto se necesita vincular el personal que se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Cantidad de personas requeridas en cada una de las etapas del proyecto

ETAPA	CANTIDAD MAXIMA DE PERSONAS
Construcción y montaje	2,190
Operación (minado y beneficio)	694
Abandono y cierre	450

Fuente: Minera de cobre Quebradona, 2019.

Para capacitar el personal en las diferentes tareas se realizará un convenio con el SENA; para la etapa de construcción y montaje se considera tener personal capacitado en las disciplinas que se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Disciplinas requeridas durante la etapa de construcción y montaje

DISCIPLINA	PROMEDIO
Movimiento de tierra	284
Infraestructura	51
Concreto	530
Estructuras de acero	288
Sistemas de tubería	121
Arquitectura	104
Equipos eléctricos	28
Materiales eléctricos	111
Equipos mecánicos	169
Trabajo en la mina	53
Consumibles	4
Instrumentación/automatización	30
Paisajismo	16
SUBTOTAL CARGOS DIRECTOS	1789
SUBTOTAL CARGOS INDIRECTOS	401
TOTAL	2,190

Fuente: Mina de cobre Quebradona 2019

3.2.1.6. Infraestructura: La infraestructura existente en el área que será utilizada por el Proyecto está asociada principalmente a las vías, a la infraestructura social y/o productiva y otra infraestructura de servicios (energía, acueducto y telecomunicaciones).

- **Infraestructura Vial:** en la figura 17 se aprecia las principales obras de infraestructura vial en zonas aledañas al proyecto, algunas de las cuales se utilizarán temporalmente, durante la etapa de construcción y montaje, mientras que se construye la vía definitiva de acceso al proyecto.

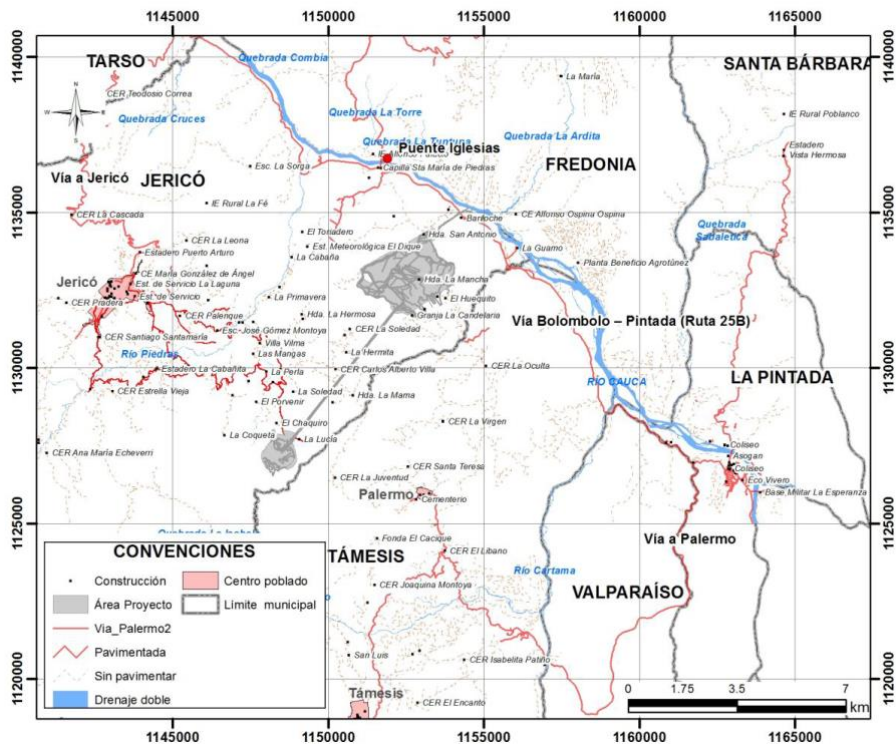
En la tabla 13 se hace una descripción de las principales características de las vías que utilizará el proyecto, en la etapa inicial, por donde ingresarán los primeros equipos requeridos para la construcción de vías internas y otras obras de infraestructura iniciales.

La vía Puente Iglesia Palermo solo se utilizará para el ingreso de los equipos (retro excavadoras, cargadores, volquetas) requeridos para construir las vías internas, el puente sobre la vía Palermo, así como la vía de acceso al proyecto desde la conexión Pacífico 2, que será la vía que en el futuro atenderá todo el flujo vehicular que se requiera para garantizar la operatividad del proyecto.

La vía Palo Cabildo y Galilea son opciones para comunicar a Jericó con la parte alta del proyecto, son vías que serán utilizadas para ingresar equipos que por sus características se pueden transportar en camiones convencionales máximo tracto camiones de 52 toneladas, que no tienen restricciones para transitar por estas vías, por tal razón la intervención que realizará el proyecto sobre estas vías se limitará a mantenimientos mínimos rutinarios.

Las vías terciarias relacionadas en la tabla 13 serán mejoradas en sus diseños geométricos en lo que tiene que ver con radios mínimos en curvas horizontales, pendientes longitudinales, anchos de la sección transversal, señalización, también se intervendrán los puentes para reforzarlos con vigas, concreto reforzado, obras de manejo de drenajes. En la vía Puente Iglesias – Palermo se intervendrá seis (6) puentes, vía Palo Cabildo tres (3) puentes y vía Galilea ocho (8) puentes.

Figura 17. Infraestructura cercana al área del proyecto Quebradona.



Fuente: MINERA DE COBRE QUEBRADONA S.A.- Integral 2019

Tabla 13. Principales vías utilizadas por el proyecto

CARACTERÍSTICAS MÁS RELEVANTES DE LAS VÍAS EXISTENTES EN LA ZONA DEL PROYECTO QUEBRADONA						
VÍA	ORIGEN	DESTINO	CATEGORÍA DE LA VÍA	LONGITUD (Kms)	SUPERFICIE DE RODADURA	ESTADO
Conexión Pacífico 2	Junto con Pacífico 1 y 3 corredor vial estratégico para comunicar el norte del país, con la zona cafetera, el Valle del Cauca y el Pacífico colombiano.		Primaria 4G	96.5	Asfaltada	En construcción Buena
Puente Iglesias - Palermo	Puente Iglesias	Palermo	Terciaria	20	Afirmado	Regular
San Antonio	Puente Iglesias - Palermo	Finca San Antonio	Privada	3,6	Afirmado	Malo
La Mancha	Puente Iglesias - Palermo	Finca La Mancha	Privada	1,3	Afirmado	Regular
Peña Linda	Puente Iglesias - Palermo	Finca Peña Linda	Privada	2,3	Afirmado	Regular
Candelaria	Puente Iglesias - Palermo	Finca Candelaria	Privada	6,2	Afirmado	Regular
Palo Cabildo	Jericó	Vereda Palo Cabildo (parte alta del proyecto)	Terciaria	12	Afirmado – Placa huella	Buena
Galilea	Jericó	Galilea (parte alta del proyecto)	Terciaria	13	Afirmado – Placa huella	Buena

Fuente: Construcción UPME, subdirección de Minería, datos Estudio de Impacto Ambiental Capítulo 3. Minera de Cobre Quebradona.

En total se tiene proyectado realizar obras de mejoramiento a las vías citadas en la tabla 13, en un total de 13.04 kilómetros, quedando estas con ancho de calzada que oscilará entre 5 y 7 metros.

Como se mencionó anteriormente las vías relacionadas en la tabla 13 se utilizarán en la fase inicial de la etapa de construcción y montaje, el mejoramiento proyectado para estas vías es un aporte de proyecto para la zona, lo que va a beneficiar la movilidad de personas, productos e insumos que entran y salen del sector, ya que se facilita el acceso de varios tipos de vehículos, se mejora la señalización y la seguridad en el tránsito.

En cuanto a la construcción de vías nuevas se considera la comunicación de la concesión Pacífico 2 con los portales de los túneles y de esta se desprenden tramos a sitios con diferente infraestructura del proyecto como campamentos, planta de beneficio, plataforma de piritas, plataforma de relaves filtrados, en la tabla 14 se describen las principales características de estos tramos.

Tabla 14. Vías para construir en el proyecto Quebradona

Nombre	Longitud (km)	Ancho Banca (m)	Origen	Destino
Vía de acceso	1.83	7.2	Concesión Pacífico 2	Vía principal
Vía principal	3.61	8.6	Vía acceso	Vía portales
Vía portales	1.1	8.6	Vía principal-campamento-planta	Plataforma túneles
Vía canal norte	0.51	5.6	Vía portales	NA
Vía campamento - planta	0.65	8.6	Campamento	Plataforma planta de beneficio
Vía depósito pirita	1.10	7.2	Plataforma de piritas	Depósito de pirita
Vía depósito relaves filtrados	6.39	7.2	Plataforma de relaves filtrados	Depósito de relaves filtrados
Vía a captación y descarga	0.47	5.0	Concesión Pacífico 2	Punto de captación y punto de descarga
Vía conexión plataformas	0.56	7.0	Plataforma A	Vía existente
Vía plataforma C	0.39	7.0	Vía existente	Plataforma C
Vía plataforma D	0.26	7.0	Plataforma C	Plataforma D

Fuente: Integral, 2019.

En total se considera construir 16.87 kilómetros de vías, con anchos de berma entre 5 y 8.6 metros, serán vías pavimentadas.

- **Puertos:** De los puertos existentes en Colombia se estima que el más conveniente para exportar el concentrado mineral producido en el proyecto es el de Buenaventura, ubicado en el océano Pacífico, a una distancia de 405 kilómetros del área del proyecto, tiene capacidad de manejar contenedores y mercancía a granel, posee un adecuado sistema de vías, y es atendido por varias compañías de transporte con camión.

- **Ferrocarril:** El puerto de Buenaventura está conectado actualmente por ferrocarril con el municipio de La Felisa en el departamento de Caldas, a través de la denominada Red Férrea del Pacífico, con la que se busca conectar el centro del país con el puerto de Buenaventura, aunque el sistema requiere una rehabilitación profunda.

Según información de la ANI el tramo Buenaventura Zaragoza de 380 kilómetros de longitud requiere una reparación profunda, ya que el puente sobre el río Bolo se derrumbó, presenta deslizamientos en algunos sectores, un deterioro general de la vía, que impide la operación comercial.

Mientras que el tramo la Felisa - Zaragoza de 118 kilómetros está en operación, es de resaltar que entre la Felisa y la zona del proyecto existe una vía pavimentada en buen estado que está siendo ampliada como parte del programa de mejoramiento de infraestructura vial nacional mencionado. En este sentido el Proyecto por lo pronto usará la infraestructura vial de Colombia para transportar el concentrado desde las instalaciones de Minera de Cobre Quebradona hasta el puerto de Buenaventura.

De entrar en operación el proyecto Quebradona se podría facilitar acuerdos o convenios públicos privados en los cuales varias empresas interesadas, entre ellas Quebradona,

juntamente con el Estado realicen el mantenimiento que requiere esta vía férrea y habilitar la operación comercial de la misma, también se puede evaluar la posibilidad de que dicho mantenimiento se realice por la figura obras por impuestos.

- **Infraestructura Eléctrica:** El Proyecto tiene requerimientos específicos de fuentes y sistemas de alimentación de energía para cada una de las dos fases de su desarrollo; la construcción de la infraestructura de la mina y la operación.

Actualmente, el área del Proyecto la abastece de energía Empresas Públicas de Medellín – EPM- a través de redes en media tensión pertenecientes a las subestaciones de Jericó y de Támesis. En la etapa de exploración la energía requerida fue utilizada de estas redes. El Proyecto está ubicado cerca de varias centrales hidroeléctricas como Río Piedras (20 MW) y Agua Fresca (7 MW), y de líneas de transmisión de alto voltaje (en un radio de distancia de 50 km), todos integrados al Sistema de Transmisión Nacional de Colombia (STN), facilitando el suministro de energía para las etapas de construcción y operación del Proyecto.

En la fase de construcción del Proyecto se estimó una demanda pico de 10 MW, para lo cual se solicitará una conexión a EPM, con circuitos de media tensión, el trazado de las líneas de conducción de energía podrán ir paralelo a carreteras y caminos existentes hasta llegar a la zona del proyecto para alimentar dos subestaciones para los frentes principales de construcción.

En los trabajos tempranos de construcción, donde el requerimiento de potencia es menor, y en caso de que la línea eléctrica llegue a presentar algún retraso, se emplearán generadores o plantas eléctricas para suministrar la energía eléctrica requerida. Estos generadores se podrían utilizar además para garantizar la ejecución de los trabajos ante cortes en el suministro de energía y en algunos casos en que los frentes de obra están muy retirados y ejecuten labores de corta duración que no ameriten la instalación de una línea de distribución.

Para la fase de operación, el suministro de energía eléctrica para el Proyecto Minera de Cobre Quebradona, se realizará mediante una conexión al Sistema de Transmisión Nacional (STN) con una línea a 230 kV en circuito sencillo, entre el punto de conexión que apruebe la UPME (se estima que es una subestación nueva que se origina con la apertura de la línea Ancón Sur - Esmeralda, propiedad de ISA), y la subestación Quebradona (nueva) con tensiones nominales de 230/34,5 kV, y capacidad de transformación 65/75 MVA

Se tiene proyectado una subestación eléctrica principal y subestaciones secundarias que darán energía a toda el área productiva, para el caso de la mina a los sistemas de ventilación, iluminación e instalaciones internas, para la planta de beneficio a los procesos de reducción de tamaño, concentración, espesamiento y filtrado, además de la energía requerida en la infraestructura de apoyo. En la tabla 15 se describen los consumos de energía en los principales procesos de producción del proyecto.

Tabla 15. Requerimientos de energía en el proceso de minado

CONSUMO DE ENERGÍA DE LA MINA			
DESCRIPCIÓN	ACTIVIDAD	KW	FUENTE PRINCIPAL
Planta de trituración + banda transportadora	Reducción de tamaño y transporte de material 1,250 t/h	861	Trituración primaria
Instalaciones subterráneas mina	Equipos de perforación, instalaciones, talleres, iluminación y otros	5,683	Talleres, oficinas internas, bahías de mantenimiento, comedores, Ventilación principal
Bombas, sumideros y otras instalaciones	Desagüe de mina	1,575	16 bombas de 110 kW y 2 de 90 Kw
Planta neutralización	Tratamiento agua mina	1,221	Bombas
Consumo total de energía en la mina		9,340 KW	
CONSUMO ENERGÍA PLANTA DE BENEFICIO			
Planta de trituración	Reducción de tamaño	5,966.5	Trituración secundaria
Molienda	Molienda	13,999.5	Molino
Concentración	Flotación	3,167.5	Celdas de flotación
Espesamiento	Espesamiento de concentrado	1,877.1	Espesamiento
Filtrado	Filtración de concentrado	1,022	Filtros
Espesamiento	Espesamiento de relaves	1,703	Espesamiento
Filtrado	Filtración de relaves	6,735.5	Filtros
Espesamiento	Espesamiento relaves con pirita	133.75	Espesamiento
Filtrado	Filtración de relaves con pirita	233.75	Filtros
Remolienda	Remolienda y floculantes	3,909.25	Molino
Consumo total de energía planta de beneficio		38,747.85 KW	
CONSUMO ENERGÍA INFRAESTRUCTURA DE APOYO			
Área integrada de operaciones	Logística y actividades de apoyo	552.5	Oficinas, alumbrado infraestructura
Explosivos	Almacén de explosivos	127.5	Polvorines
Saneamiento básico	Tratamiento aguas negras	315	Planta de tratamiento
Campamento	Bienestar personal	765	Dormitorios, casino, baños
Auxiliares	Bienestar personal	3,255	Áreas de esparcimiento
Servicios hídricos	Distribución agua diferentes procesos	2,587.5	bombas
Otros		2,550	
Consumo total infraestructura de apoyo		10,152.5 KW	
Consumo total energía proyecto Quebradona		58,240.35 KW	

Fuente: Construcción UPME, datos Estudio de Impacto Ambiental. Minera de Cobre Quebradona. 2019.

Según lo que muestra la tabla 15 el proyecto Quebradona en la etapa de extracción requerirá una capacidad instalada de 58.24 MW.

La mina contará con un sistema de respaldo de energía de plantas diésel para alimentar las cargas esenciales y de emergencia del Proyecto, estas plantas serán conectadas al barraje de distribución principal de 34.5 kV a través de transformadores elevadores 0.480/34.5 kV, ubicados en la subestación principal de 230/34.5 kV.

3.2.2. Proyecto El Roble¹⁷: Es la única mina que en la actualidad produce cobre en Colombia como parte de un concentrado que también contiene oro y plata.

Es operada por la empresa canadiense Atico Mining Corporation, quien adquirió en el año 2013 el 90% de las acciones de Minera el Roble (MINER S.A) y posteriormente en el año 2019 adquiere la totalidad de las acciones.

3.2.2.1. Operación Minera: La extracción de mineral se realiza de forma subterránea, después de aplicar varios métodos, que por dificultades técnicas no garantizaban la continuidad en la operación, desde el año 2014 se aplica el método de corte y relleno con avance ascendente de subniveles (ver figura 18). También se tiene proyectado para algunos sectores de la mina el método de hundimiento por subniveles.

El cuerpo mineralizado se encuentra ubicado aproximadamente a 450 metros de profundidad, se accede a través de una rampa principal (sección nominal de 4.5 m X 4.5 m) que sale del nivel 1880, con una pendiente del 12%.

La explotación inicia en la parte inferior del cuerpo mineralizado, el cual se conecta a la rampa principal, ubicada a unos 40 metros de este, mediante niveles y sub-rampas en intervalos verticales que van de 45 a 60 metros. Los niveles y sub-rampas tienen una sección nominal de 4m X 4m y radios de curvatura amplios para acomodar equipos grandes. El depósito es amorfo; los accesos pueden ubicarse en cualquier punto razonable según las necesidades de diseño.

El depósito se divide en varios bloques, cada bloque separado por un banco de cinco metros de espesor que cubre todo el depósito. El primer nivel se realiza en la parte más baja del cuerpo mineralizado, por donde la geometría del depósito y la posición de la rampa lo permitan, el nivel busca en lo posible atravesar el depósito de manera longitudinal, de contacto a contacto, evitando al máximo el contacto con la roca encajante y de esta forma disminuir al máximo la dilución.

Desde los niveles se forman bloques de 5 m X 5 m, los que se clasifican de forma consecutiva como primarios y secundarios. En primer lugar, se extraen los bloques primarios en grupos de tres formando paneles, normalmente extrayendo uno o dos no adyacentes, posteriormente dichos bloques son llenados con un relleno de roca cementada. Los paneles conformados por bloques secundarios se alternan con los primarios, en el mismo lado del

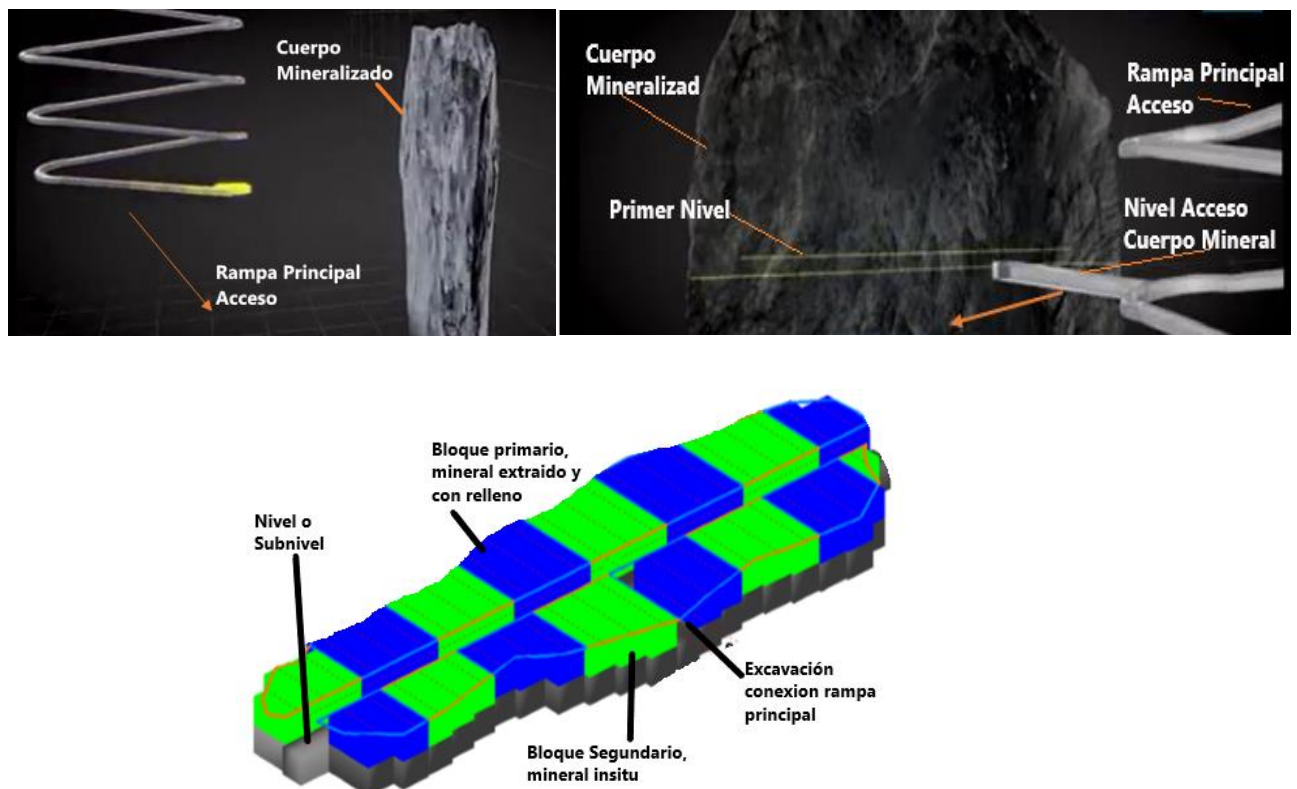
¹⁷ Adaptado del reporte técnico de la mina el Roble 2018 - "El Roble mine updated mineral resource and initial mineral reserve estimates" Atico Mining Corporation.

nivel y están escalonados con respecto a los paneles de los bloques primarios y secundarios en el lado opuesto del nivel, de esta manera se establece un patrón básico de tablero de ajedrez (ver figura 18).

Una vez que todos los bloques de primer nivel se han extraído y se han rellenado de roca cementada, se comienza con la apertura del acceso del mineral en el segundo nivel, se realiza el mismo proceso que se realizó en el primer nivel. Este proceso se repite hasta la parte superior del cuerpo mineralizado.

La roca cementada que sirve de relleno de los paneles excavados se monitorea de manera permanente en la planta de mezcla, mediante ensayos de resistencia sobre cilindros para definir las proporciones de las mezclas que garantizan una adecuada resistencia del relleno, adicional a estos ensayos y de forma independiente se hace monitoreo luego de la voladura al relleno cementado para evaluar posible sobre excavación del mismo, para evitar la dilución originada por el fracturamiento del relleno cementado.

Figura18. Acceso al Cuerpo mineralizado y método de explotación “Drift and fill”



Fuente: Modificado de Atlas Copco

El arranque de mineral se realiza a través de labores de perforación y voladura, para la perforación se utilizan equipos Jumbo de uno y dos brazos mecánicos. La sustancia explosiva utilizada es de tipo emulsión (emulind), a granel (anfo) y un hidrogel (indugel).

El mineral arrancado se transporta desde los frentes de explotación a tolvas ubicadas en cada subnivel, mediante el uso de cargadores Sandvik LHD de 3 y 4.6 m³ de capacidad, de las tolvas el mineral se descarga por gravedad a volquetas Sandvik de 20 toneladas de

capacidad, que se encargan de transportar el mineral por la rampa principal a superficie, para el proceso de beneficio.

El sostenimiento se realiza de manera mecanizada mediante la aplicación de concreto lanzado, instalación de pernos y malla para las excavaciones de desarrollo, para las excavaciones de preparación se utiliza pernos y/o malla, dependiendo de la calidad del macizo rocoso, en zonas con serios problemas de estabilidad se utiliza arcos, combinados con madera, malla y/o pernos. La aplicación de concreto lanzado se hace mediante el uso de un robot “Robojet spray system”, el espesor de la capa de concreto y su resistencia dependen de las características geomecánicas de la roca. Los pernos utilizados usualmente tienen diámetros de 22 mm con longitudes de siete u ocho pies, dependiendo de la calidad y estado del macizo rocoso, su instalación se realiza utilizando un Jumbo Sandvik DD-311.

En las excavaciones de explotación una vez extraído todo el material mineralizado se hace relleno, mediante la utilización de aproximadamente el 40% de las colas del proceso de beneficio, las cuales se cementan en superficie (se hace una mezcla de gravilla, agua, cemento y colas del proceso de beneficio) y son transportadas al interior de la mina en camiones mezcladores, en algunas excavaciones (donde no hay trabajos adyacentes) el relleno se hace con roca no cementada, la cantidad de este tipo de relleno es muy baja en comparación con el relleno cementado.

La mina se ventila utilizando el nivel 1880 como entrada de aire fresco. El aire desciende por la rampa de acceso principal mediante ventiladores de tipo extractor, de donde se distribuye a cada uno de los diversos trabajos en los subniveles activos. El aire viciado fluye hasta el nivel 2000, donde sale a la superficie.

Bajo este esquema de operación se tiene proyectado extraer de la mina las cantidades roca mineralizada que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Proyección de producción de la mina

AÑOS	2021	2022	2023	2024
Roca Mineralizada (t)	280,989	289,925	257,613	146,058

Fuente: http://aticominig.com/_resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf

El mineral crudo extraído de la mina está principalmente compuesto de una mezcla de sulfuros masivos de calcopirita y pirita semi masiva sobre una matriz silíceas, presenta bajas cantidades de pirrotita, magnetita y bajo aporte de chert negro (grafito), el cual pasa al proceso de beneficio.

3.2.2.2. Beneficio¹⁸: La planta de beneficio tiene una capacidad nominal de procesamiento de 850 t/d. el proceso consta de trituración, molienda y flotación convencional, espesamiento y filtrado para producir un concentrado de Cu y Au.

¹⁸ http://aticominig.com/_resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf

El material que sale de la mina es muestreado para determinar su tenor y apilado dependiendo de este valor, para garantizar un suministro material mineralizado a la planta con tenores relativamente homogéneos.

Con este material se comienza el proceso de reducción de tamaño en una trituradora de mandíbulas que es alimentada con un tamaño de roca de 10". El material triturado es descargado a un sistema de bandas transportadoras y luego a una criba vibratoria de dos mallas que clasifica el mineral en tamaños de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{4}$ ".

El mineral con diámetro superiores a $\frac{1}{4}$ " se envía a la etapa de trituración secundaria que se realiza en una trituradora cónica, este mineral triturado se envía a una criba vibratoria de una sola malla de $\frac{1}{4}$ ". El pasante se lleva a una tolva de mineral fino y el retenido se regresa a la trituración secundaria. El mineral se somete a trituración terciaria que se realiza en una trituradora de cabeza corta. Todas las etapas del proceso de trituración (primaria, secundaria y terciaria) se realizan en seco, cuando el mineral tiene el tamaño requerido se almacena en la tolva de mineral fino, para pasar a la fase de molienda.

Antes de que el mineral entre a la molienda primaria se humedece y se hace una clasificación por tamaño, el pasante se lleva a la línea de pulpas y el mineral retenido ingresa a la etapa de molienda primaria, la que se realiza en un molino de bolas, el material resultante de esta etapa se descarga hacia la línea de pulpas sin clasificación adicional, para que pase a la molienda secundaria, que también se realiza en un molino de bolas.

La pulpa producida en la remolienda se bombea para iniciar la etapa de flotación, para lo cual se requiere que durante el proceso de reducción de tamaño (trituración y molienda en todas sus etapas) el 80% del material mineralizado tenga un tamaño inferior a malla 200.

El sobre flujo de la flotación pasa al espesador de concentrado, el bajo flujo se clasifica por medio de hidrociclones, el sobre flujo del hidrociclón pasa al circuito de flotación y el bajo flujo del ciclón al segundo molino de bolas para una mayor reducción de tamaño.

El circuito de flotación comienza con el tratamiento del sobre flujo del ciclón secundario del molino de bolas, el sobre flujo de esta flotación es concentrado que se somete a un proceso de espesamiento, el bajo flujo es transportado a otras celdas de flotación, en donde el sobre flujo es concentrado, el bajo flujo se envía a otras celdas de flotación, el sobre flujo de esta etapa de flotación es concentrado, y el bajo flujo pasa a una etapa de flotación de limpieza final, en donde el sobre flujo es concentrado y el bajo flujo son colas del proceso que también se espesan, para luego ser transportado al depósito de colas o relaves.

El concentrado producido en la flotación se espesa y se filtra, hasta alcanzar una humedad que oscila entre el 8 y 10%. El material filtrado se lleva a través de una banda transportadora a una bodega de almacenamiento de concentrado, para luego ser transportado en camiones al puerto de Buenaventura. En la figura 19 se muestra el diagrama de flujo de la planta de beneficio.

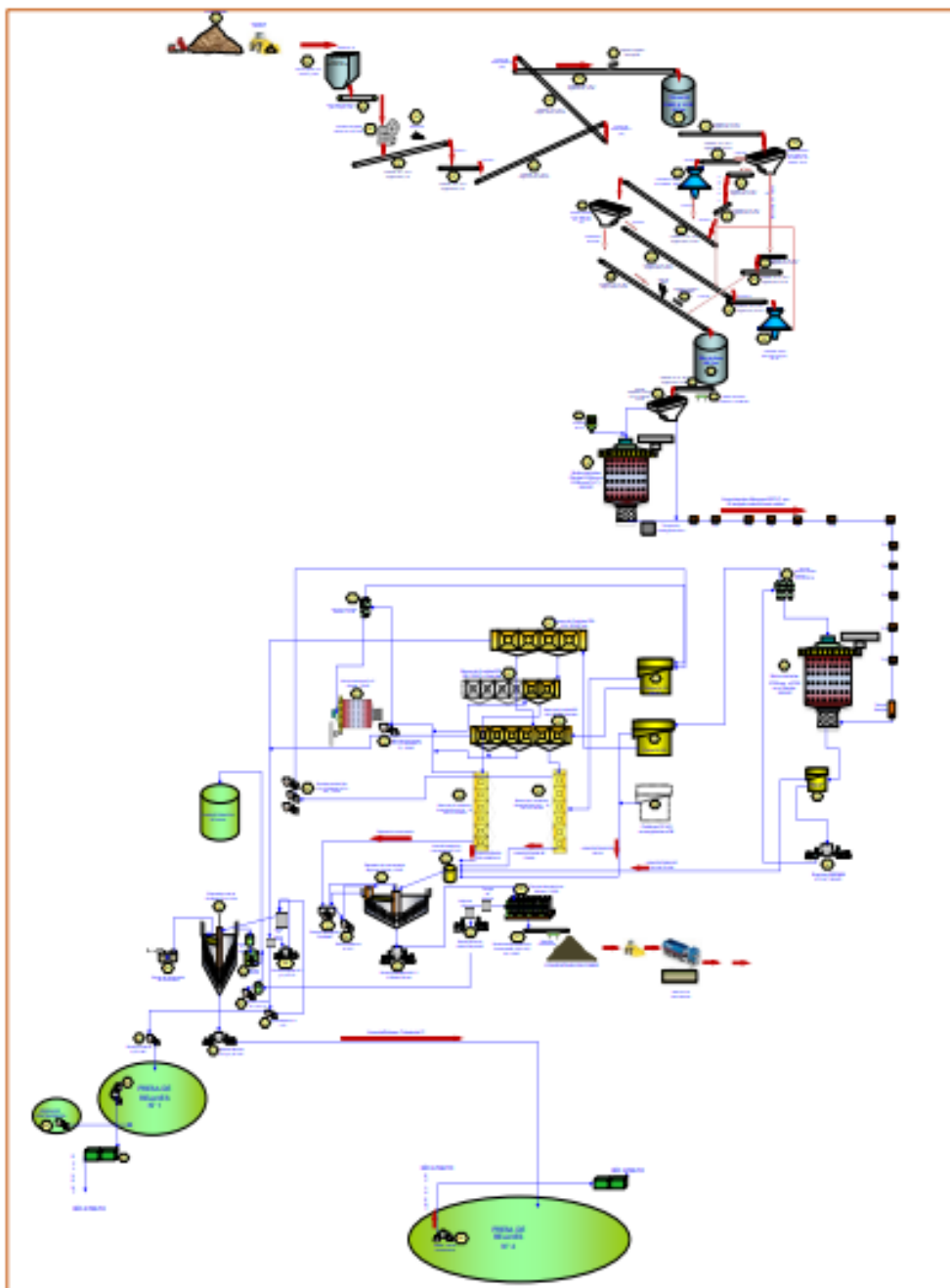
La planta de beneficio está diseñada para recuperar el 92.1% de Cu y el 57.9% de Au, se espera que el concentrado producido en la planta tenga un contenido promedio de 21.4% de Cu y 7.93 g/t de Au, se tiene proyectado la producción de concentrado que se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Producción de concentrado

ITEM	AÑOS			
	2021	2022	2023	2024
Concentrado (t)	35,705	36,221	32,133	21,448
Contenido Cu en concentrado (t)	7,637	7,747	6,872	4,587
Contenido Au en concentrado (oz)	9,885	9,474	7,778	5,474

Fuente: <http://aticominer.com/resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf>

Figura 19. Diagrama de flujo de la planta de beneficio



Fuente: <http://aticominer.com/resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf>

- 3.2.2.3. **Colas del proceso de beneficio:** Las colas (relaves) se espesan antes de ser enviados a los depósitos de relaves, el proyecto cuenta con cuatro (4) de estos depósitos, de los cuales dos (2) se encuentran en operación, el denominado deposito 1 se muestra en la figura 20, y sirve como deposito alterno, ya que se utiliza en caso de que por cualquier eventualidad no se pueda utilizar el deposito 4.

Figura 20. Depósito de colas o relaves



Fuente: http://aticominer.com/_resources/technical-reports/ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021.pdf

El terraplén del depósito 4, que sirve como estructura de soporte fue construido con un factor de seguridad (FS) de 1.4. este depósito esta ubicado 3.4 Km cuesta debajo de la planta de espesamiento de relaves, desde donde se bombea las colas o relaves a dicho depósito, para realizar un adecuado llenado del depósito se tienen varios sitios de descargue de las colas, para lo cual se utiliza mangueras flexibles.

La vida útil de este embalse se estima a septiembre de 2021, se esta en proceso de construcción del depósito 5, el cual se espera finalizar a principios de 2021.

Los depósitos de relaves 2 y 3 están cerrados y en proceso de recuperación ambiental.

- 3.2.2.4. **Costos de Operación:** Los costos de producción en el proyecto El Roble se agrupan en 4 ítems, y en la tabla 18, se muestra la proyección de dichos costos.

Tabla 18. Proyección de costos de producción (en miles de dólares US\$000)

ITEM	AÑOS			
	2021	2022	2023	2024
Minado	16,131	15,261	12,190	5,009
Beneficio (US\$/t)	4,081	4,113	3,544	2,173
Servicios Generales (US\$/t)	4,035	4,036	3,632	1,625
Administración	2,444	2,450	2,199	1,183
Gastos operativos de la mina	6,022	6,056	5,717	4,813
TOTAL	32,713	31,916	27,282	14,803

Fuente: El Roble mine updated mineral resource and initial mineral reserve estimates

Teniendo en cuenta que para el año 2021 se tiene proyectado producir 7,637 toneladas de cobre contenido en el concentrado, producir una libra de cobre se estima tiene un costo de 194,26 centavos de dólar.

3.2.2.5. Personal: La mano de obra en su gran mayoría es del Carmen de Atrato, ya que la mina se ha convertido en la principal fuente de empleo del municipio por más de 30 años, lo que ha permitido formar personal de la región para disponer con personas con alta experiencia y calificación en labores mineras subterráneas que sirven de soporte para la capacitación de nuevas generaciones.

Para labores especializadas (de capacitación, y manejo de equipos especiales) se cuenta con personal peruano de amplia experiencia en labores mineras subterráneas de aprovechamiento de depósitos polimetálicos.

En el proyecto de forma directa laboran 350 personas

3.2.2.6. Infraestructura: Este es un proyecto que esta en operación desde hace aproximadamente 30 años, y cuenta con la infraestructura requerida para llevar a cabo la operación minera que le permite obtener un concentrado de cobre y oro.

- **Infraestructura Vial:** Se cuenta con una vía de tres (3) kilómetros de longitud, afirmada en buen estado, que comunica al proyecto con la cabecera municipal del Carmen de Atrato, y este municipio está comunicado con la ciudad de Medellín por una vía pavimentada de 150 kilómetros de longitud. La ciudad de Medellín ofrece una gran variedad de insumos y servicios que requiere el proyecto.

Para transportar el concentrado al puerto de Buenaventura se carga cada tres (3) días una flota de aproximadamente nueve (9) camiones con capacidad cada uno de 30 toneladas, los cuales salen del municipio de Carmen de Atrato, pasan por los municipios de Ciudad Bolívar, Hispania, Andes, Jardín en Antioquia y Riosucio en Choco en busca de la Troncal de Occidente, que es una de las vías más importantes del país, con una extensión 1,498 km, cruza 10 departamentos e inicia su recorrido en el Puente Internacional de Rumichaca en la frontera con Ecuador y finaliza en la Ciudad de Barranquilla.

La ruta se encuentra pavimentada en su totalidad. Hay aproximadamente 120 km en doble calzada. El Ministerio de transporte con base en el proyecto de los Corredores de

Competitividad, ha iniciado la adjudicación de dobles calzadas en diversos tramos de dicha troncal.

- **Infraestructura Eléctrica:** La energía entregada al proyecto proviene del Sistema de Trasmisión Nacional (STN) a 13.2 Kv. Para lo cual se cuenta con una subestación eléctrica que tiene tres (3) transformadores de 1 MW cada uno, desde donde se proporciona energía a las diferentes áreas del proyecto (mina, plata de beneficio, plata de mezcla de relleno, talleres, oficinas, campamento).

Desde la subestación y a través de una línea de alta tensión se lleva la energía requerida en la mina, que cuenta con tres (3) subestaciones subterráneas móviles, que se ubican cerca a los frentes de operación, en donde se transforma la energía de alto voltaje (13.2 Kv) a electricidad a 440 v para ser utilizada por los diferentes equipos.

En la planta de beneficio se tuvo un consumo promedio de energía en el último año de 884,045 Kw.

En cuanto a las telecomunicaciones se cuenta con buena disponibilidad de internet en todas las inhalaciones del proyecto, inclusive en el interior de la mina.

A nivel internacional se analizará la información sobre las técnicas de aprovechamiento de mineral de cobre de las minas El Teniente y Chuquicamata ubicadas en Chile, por ser explotaciones subterráneas que aprovechan pórfidos de cobre de alta sulfuración como sucede en Colombia.

3.2.3. Proyecto El Teniente¹⁹: Es considerada la mina subterránea de cobre más grande del mundo. Situada en plena cordillera de los andes, entre los 2000 y 2700 msnm, a 44 km al este de la ciudad de Rancagua. Este proyecto está en operación desde 1904, es un proyecto con integración vertical, tiene asociado al proceso de extracción de mineral de cobre, la planta de beneficio Colon (produce concentrado de cobre) y la planta de fundición Caletones donde se obtiene cobre refinado (ánodos de cobre), y subproductos como molibdeno y ácido sulfúrico.

3.2.3.1. Operación Minera: En este proyecto se extrae entre 135,000 y 140,000 toneladas diarias de roca mineralizada, lo que representa una producción anual entre 450,000 y 475,000 toneladas de cobre refinado, esta producción se alcanza al tener en forma simultánea en operación siete (7) explotaciones subterráneas, las cuales se desarrollan desde un mismo nivel y una mina a cielo abierto.

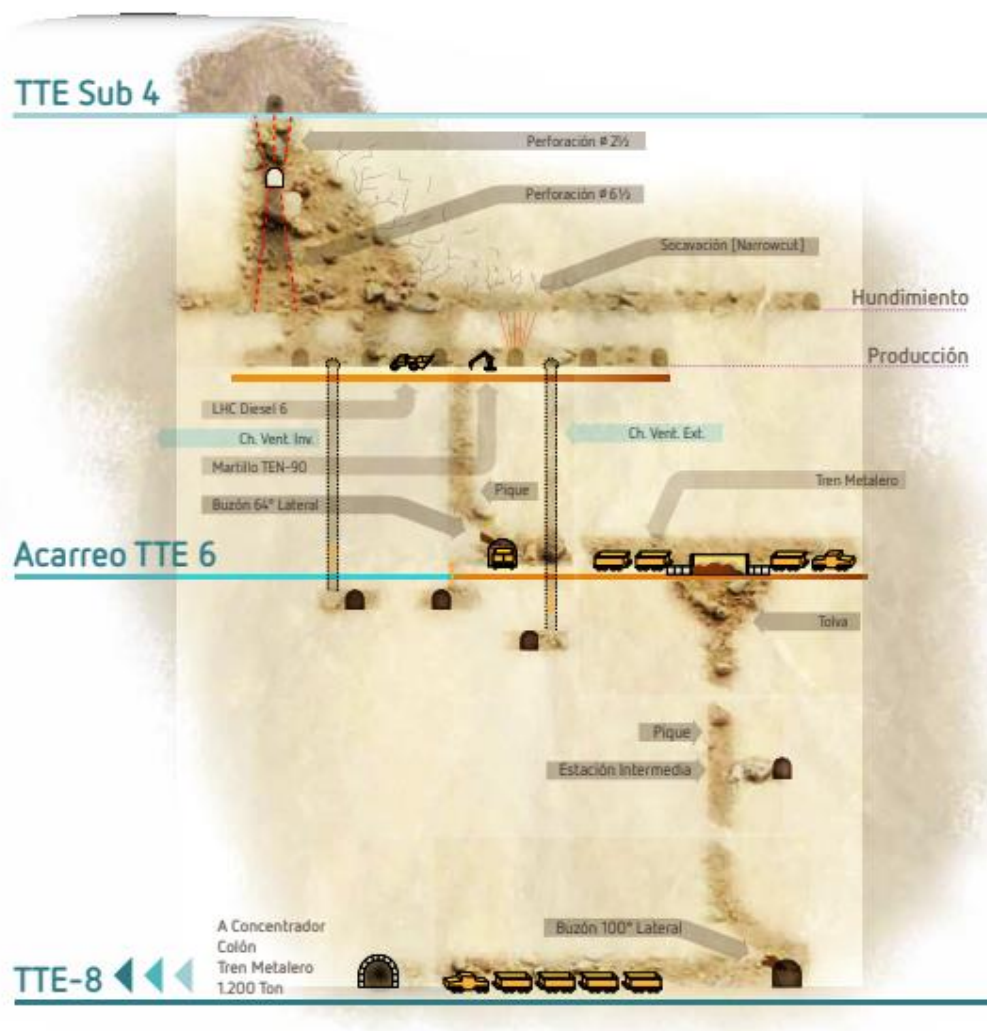
El método de explotación que se aplica en las minas subterráneas es de hundimiento de paneles (panel caving) a partir de subniveles, por tal razón algunos consideran que el

¹⁹ Adaptado de http://www.nuevamineria.com/numero10/reporteaje_001.php

método es de hundimiento por subniveles (Sublevel Caving) el cual se explicó con buen detalle en el numeral 3.2.1.1 (Proyecto Quebradona). Este método se aplica desde la década de los 80 y se trata de hundir paneles partiendo de un debilitamiento del macizo rocoso a través de voladura, el cual se acaba de facturar o romper por si solo debido a tensiones internas y efectos de la gravedad, esto hace que se requiera un mínimo de perforación y voladura.

Cada panel se divide en tres subniveles uno de hundimiento y producción donde los bloques de roca desprendidos del macizo rocoso se transportan en cargadores (LHD) a los puntos de vaciado, en donde los bloques con sobre tamaño se reducen con martillos, de allí y a través de un pozo (pique) el mineral llega al subnivel de acarreo interno, en donde el mineral es llevado a otro punto de vaciado, pero en un tren, para pasar al subnivel de transporte a superficie, donde el mineral es transportado de la mina a la planta de concentración Colón a través de un tren. (ver figura 21).

Figura 21. Método de explotación El teniente



Fuente:

https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20140520/asocfile/20140520183026/el_teniente_mineria_de_futuro.pdf

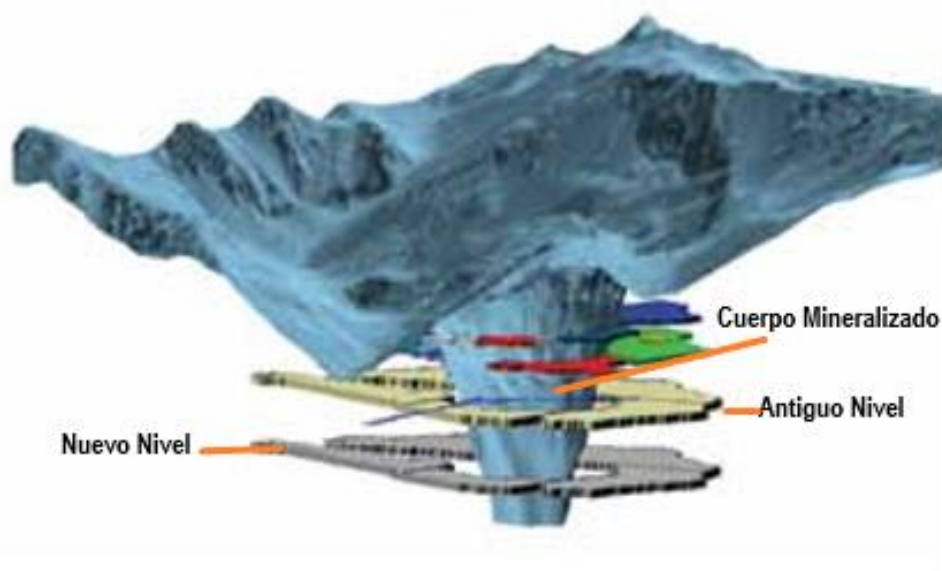
Las reservas de las siete minas se están agotando y se estima que para el 2025 termine su vida útil, motivo por el cual se está en un proceso de ampliación de la mina, el cual se describirá con mejor detalle por ser el futuro de mediano plazo de este proyecto.

La ampliación consiste en el desarrollo de un nuevo nivel, para garantizar los niveles de producción históricos de la mina y ampliar su vida útil otros 60 años. El nuevo nivel está 100 metros por debajo del actual nivel (ver figura 22), y habilita reservas de orden 1,681 Mt de mineral con un tenor de 0.86% de Cu, se estima que con el proceso de minado se extraerán 137,000 tpd de mineral, que equivalen a una producción de 430,000 toneladas de Cu fino al año, se tiene proyectado ampliar la capacidad de producción de la mina a 180,000 tpd de mineral. El método de explotación continuara siendo el mismo, solo que contará con trituración primaria al interior de la mina y desde el subnivel de transporte se evacua el mineral a superficie por una banda transportadora.

Se tenía proyectado que el nuevo nivel entrará en producción de prueba en el año 2018 pero por problemas técnicos se postergó el inicio de producción, para finales de 2019 se estimó que el estado de avance del proyecto es del 54%.

El acceso al nuevo nivel desde superficie será a través de dos túneles paralelos de 9 km de longitud, uno de ellos es para el acceso del personal y tiene una sección de 8.3X6.3 metros, y una pendiente de 2.5%, el otro tiene una sección de 9.3X6.9 metros y una pendiente del 2% y se utiliza para llevar a superficie por una banda transportadora el mineral triturado en el interior de la mina.

Figura 22. Nuevo nivel de producción mina El Teniente.



Fuente: Adaptación UPME, Sub dirección de Minería de <http://www.construccionminera.cl/wp-content/uploads/2014/04/elteniente.pdf>.

Se tenía proyectado realizar las excavaciones de desarrollo del nuevo nivel entre los años 2011 a 2018, para lo cual se debía excavar aproximadamente 98,450 metros de túneles horizontales y sub horizontales, 3,453 metros de excavaciones verticales o sub verticales (pozos de ventilación, pozos de traspaso. Ver figura 21).

El arranque de la roca en las excavaciones de desarrollo, al inicio del proyecto, se realizó con perforación y voladura, para la perforación se utiliza jumbos con tres brazos con martillos perforadores hidráulicos, la sustancia explosiva utilizada es una emulsión a granel, para cargar la roca se utilizan cargadores, los cuales depositan la roca mineralizada en camiones dumper que la llevan a superficie.

Debido a problemas técnicos se cambió la forma de arrancar la roca, y se utilizó la técnica denominada hidrofracturamiento, que consiste en inyectar agua a alta presión para fracturar la roca, este método de arranque en roca dura y para excavaciones de desarrollo, se convierte en un aporte innovador de este proyecto.

Para el sostenimiento de las excavaciones de desarrollo se utilizó pernos, mallas y concreto lanzado.

La operación de producción, en la cual se extrae la roca mineralizada se realizará en términos generales de la misma forma como se describe en el numeral 3.2.1.1, el mineral se arranca con perforación y voladura, el cual cae a un nivel de producción (subnivel) para ser recogido por un cargador, que lo lleva a tolvas interiores que se comunican con el nivel intermedio de transporte donde camiones recogen el mineral para llevarlo a otras tolvas que alimentan una banda transportadora ubicada en un nivel que permite llevar el mineral hasta la cámara de trituración primaria.

La trituración primaria se realizará al interior de la mina en una trituradora cónica giratoria, el mineral triturado se descarga en el nivel inferior de la mina y se transporta a superficie por uno de los túneles paralelos por medio de una banda que tiene la capacidad de transportar 180,000 tpd de roca mineralizada y tiene un ancho de 84".

Un hecho a destacar de esta operación de producción es que la maquinaria utilizada (cargadores y camiones) son totalmente automáticos y operados a control remoto desde las instalaciones de la empresa, ubicada en Rancagua a una distancia de 44 kilómetros de la mina, lo que reducirá de manera significativa el número de personas en el interior de la mina.

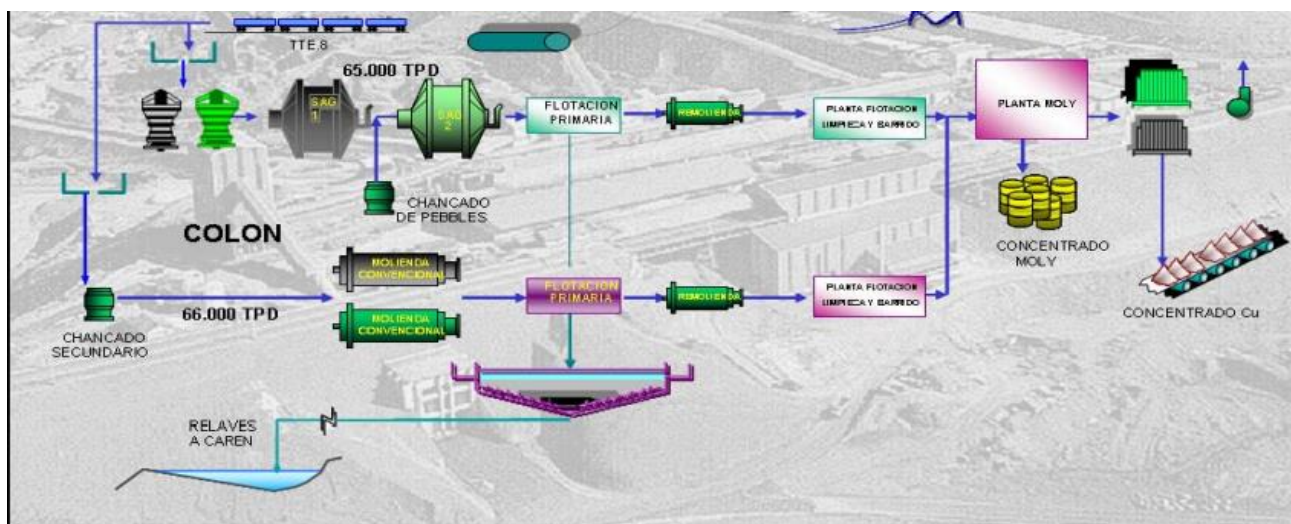
3.2.3.2. Beneficio: La planta de beneficio del proyecto El Teniente es denominada Colón, es una planta convencional de flotación para obtener concentrado de cobre y molibdeno, cuyo principio de funcionamiento se describió a detalle en el numeral 3.2.1.2, en la figura 22 se presenta el diagrama de flujo de la planta de beneficio Colón.

Notas aclaratorias sobre el diagrama de flujo de la planta: - Chancado igual a trituración

- Se tiene dos etapas de reducción de tamaño primaria y secundaria para la trituración y la molienda (la primaria se presenta de color gris oscuro y la secundaria de color verde tanto para la trituración como para la molienda). La trituración primaria para la roca del nivel nuevo se tiene proyectada hacerla al interior de la mina, en la actualidad esta trituración se hace en superficie en la planta de beneficio, como lo muestra la figura 23.
- La flotación primaria (en azul) corresponde a la flotación flash del numeral 3.2.1.2, la flotación primaria (en violeta) corresponde a la flotación rougher y scavenger, y la

flotación limpieza y barrido (en azul y violeta) corresponden a la flotación cleaner y recleaner del referido numeral.

Figura 23. Planta de concentración Colon



Fuente: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141058/Estandarizacion-del-proceso-planificacion-minera-del-presupuesto-revision-0-Division-El-Teniente-Codelco-Chile.pdf?sequence=1> .

La planta de concentración de El Teniente procesa actualmente 135.000 tpd de mineral, para producir anualmente 410.000 ton de cobre fino y 5.200 ton de molibdeno.

Este proyecto está integrado vertical y cuenta con una plata de fundición llamada Caletones donde se obtiene Cu refinado (ánodos de Cu), y subproductos como molibdeno y ácido sulfúrico.

Aunque los proyectos de aprovechamiento de cobre en operación o formulados en Colombia no contemplan obtener cobre refinado, se describirá de forma general el proceso para obtener cobre refinado en el proyecto El Teniente para tener una idea de las implicaciones que tiene realizar este tipo de aprovechamiento.

²⁰La planta de refinación de cobre Caletónes del proyecto El Teniente tiene como principal objetivo procesar y transformar los concentrados de cobre, para agregarle valor al mineral extraído en el proceso de minado y de concentración ya descritos, produciendo ánodos y barras de calidad anódicas de cobre que se comercializan en el mercado internacional, así como también ácido sulfúrico que resulta como subproducto que es comercializado en el mercado nacional].

²⁰ Adaptado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141058/Estandarizacion-del-proceso-planificacion-minera-del-presupuesto-revision-0-Division-El-Teniente-Codelco-Chile.pdf?sequence=1> .

Este proceso se divide en varias etapas:

- **Preparación de Carga:** Es donde se recibe, seca, prepara y dosifica el concentrado y otros materiales como cuarzo, carbón y carga fría, que constituyen la alimentación a los hornos de la fundición. Distribuye, además, combustibles, agua industrial, agua potable y greda previamente preparada.
- **Fusión/conversión:** Este proceso consiste en fundir y convertir los concentrados de cobre en cobre blister. El proceso se realiza en dos etapas: la primera es la fusión y conversión parcial de los concentrados a metal blanco, esta etapa se realiza por oxidación con aire enriquecido con oxígeno, en donde se obtienen como productos metal blanco (75% Cu), escoria (6- 10% de Cu) y una corriente gaseosa con alto contenido de SO₂ que es enviada a las plantas de limpieza de gases (PLGs) para producir ácido sulfúrico.

La segunda etapa, es la conversión total del metal blanco a cobre blístér, por medio de una oxidación con aire de baja presión. El cobre blister fundido es alimentado a los hornos de refinación.

La escoria generada en este proceso de fundición es sometida a un proceso de limpieza, en donde a través de un proceso de reducción y sedimentación se obtiene un producto de alta ley de cobre (70 a 75% de Cu), que regresa a la segunda etapa de conversión total, la escoria de descarte definitiva de este proceso contiene como máximo 1% de Cu. Este material hasta el año 2018 era llevado al proceso de concentración en la Planta Colon para recuperar el cobre remanente. Después del año 2018 se construyó una planta de flotación exclusiva para este material para reducir el impacto ambiental y obtener un mejor aprovechamiento del cobre.

- **Refinado y Moldeado:** La función de esta unidad es refinar el cobre blístér, produciendo ánodos de Cu que se moldean de acuerdo con los requerimientos comerciales de los clientes.
- **Limpieza de los Gases:** Es la última etapa del proceso de refinación, en donde se realiza la captación, acondicionamiento (enfriamiento y limpieza) y transporte de los gases producidos en los procesos de fusión y conversión hasta las plantas de limpieza de gases. El procesamiento de los gases permite producir ácido sulfúrico de calidad comercial (98,5%) y reducir significativamente el contenido de azufre de los gases remanentes que son evacuados de la fundición para el cumplimiento de la normatividad de emisiones chilena y lineamientos corporativos de sustentabilidad de la compañía.

En el año 2019 y bajo las características técnicas explicadas, este proyecto produjo 459,744 toneladas de cobre fino, 7,503 toneladas de molibdeno y 89,000 kilos de plata.

3.2.3.3. Colas del proceso de beneficio y refinación²¹: Los relaves (colas) producidos en estos procesos se manejan con método tradicional (slurries), pulpas cuyo contenido de material líquido (agua) y sólido partículas de roca, depende de criterios técnicos que garanticen la seguridad en el proceso, bajo impacto ambiental y disposición continua de este efluente.

El Teniente al ser un proyecto con más de 100 años de operación, tiene una amplia experiencia y conocimiento en el manejo de estos relaves (colas). Para construir este conocimiento en sus inicios se contó con el acompañamiento y experticia de extranjeros la mayoría de ellos americanos con amplia experiencia y el manejo y tratamiento de efluentes industriales.

Los relaves (colas) de la actividad minera de El Teniente son vertidos en un embalse artificial construido en una zona baja, plana y con deficiente capacidad de drenaje denominado Carén, ubicado a unos 85 kilómetros de la planta de concentración Colon.

Las colas del proceso de beneficio de la planta Colon, son transportadas al depósito de relaves (colas) Caren por gravedad por medio de un canal abierto de concreto 1.4 metros de ancho por 1.4 metros de alto, y una pendiente que varía entre 0.5 a 2%.

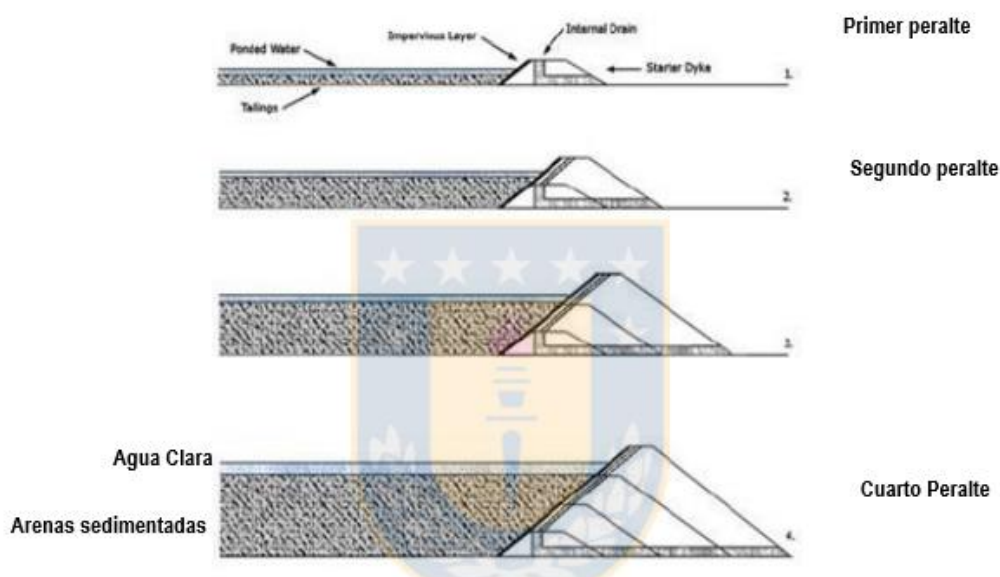
El embalse Caren tiene una capacidad de acumular 3,288 millones de toneladas de material, lo cual lo convierte en segundo embalse activo en Chile según la capacidad de almacenamiento de relaves y el primero en cuanto a la cantidad de material contenido con 1,843 millones de toneladas.

Dado el tamaño, complejidad en el manejo, las consecuencias ambientales y de seguridad que puede generar un manejo inadecuado de estos depósitos cuando están activos o cerrados, Chile tiene una importante trayectoria en reglamentación en torno a la operación, seguridad, ambiental y plan de cierre y abandono de los depósitos de relaves, que data de 1970.

El diseño del depósito Caren del proyecto El Teniente, considera un muro principal de 12 peraltes construido con la metodología agua abajo, como se muestra en la figura 24, este tipo de construcción tiene como principal ventaja que puede tener alturas sin restricciones, debido a que cada muro levantado es estructuralmente independiente de los relaves. La principal desventaja es el costo de levantar el terraplén, ya que se requieren grandes volúmenes de relleno, que aumentan exponencialmente a medida que aumenta la altura del terraplén, se necesita una gran área alrededor de la presa, y el pie de la presa se desplaza a medida que crece el muro (Álvarez, 2017).

²¹http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3592/4/Tesis_Nuevas_tecnologias_para_el_uso_y_disposicion_de_relaves.Image.Marked.pdf

Figura 24. Muro contención colas aguas abajo



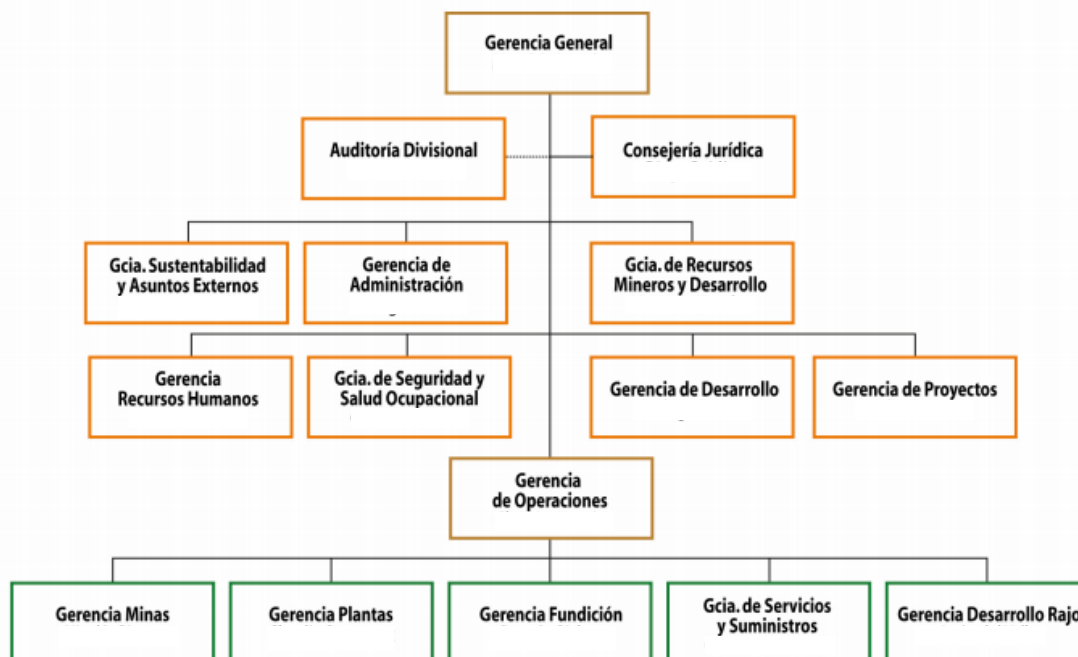
Fuente: http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3592/4/Tesis_Nuevas_tecnologias_para_el_uso_y_disposicion_de_relaves.Image.Marked.pdf

- 3.2.3.4. Costos de Operación:** En Chile los grandes proyectos se acogen a estándares internacionales para reportar sus costos, dentro de ellos se encuentra el costo denominado C1, que se definen como aquellos costos asociados al corto plazo que consideran todos los insumos directos del proceso productivo minero hasta la venta del producto comercializable, entre ellos se encuentra; proceso de mina, beneficio, fundición, refinación, gastos de comercialización y créditos por subproductos. Estos costos no consideran depreciación, amortización, intereses, impuestos, investigación y exploración.

Para 2018 el costo C1 para producir una libra de cobre, en el proyecto El Teniente se estimaron en 107 centavos de dólar por libra (c/lb), este costo se logra teniendo una productividad de 51.7 toneladas métricas de cobre fino por persona (tmf/pp), esta productividad se estima teniendo en cuenta los trabajadores vinculados directamente al proyecto como los contratistas.

- 3.2.3.5. Personal:** El proyecto el teniente para finales del año 2019 tenía vinculado en su operación de forma directa 4,058 personas, las que laboran bajo la estructura que se muestra en la figura 25.

Figura 25. Organigrama proyecto el Teniente.



3.2.4. Proyecto Chuquicamata: El complejo minero asociado a la División Codelco Norte. Chuquicamata es una mina de cobre, oro y molibdeno a cielo abierto, está ubicada a 15 km al norte de Calama, en la Región de Antofagasta y a 1.650 kilómetros al norte de la capital de Chile, a 2.870 metros sobre el nivel del mar aproximadamente.

Chuquicamata, es considerada la mina más grande del mundo en su tipo y después de 104 años de operación continua a cielo abierto, en agosto de 2019, dio paso a un importante proceso de transformación en un proyecto estructural llamado Chuquicamata Subterránea, que explota la gran reserva de mineral ubicada a poco más de un kilómetro de profundidad, bajo el actual yacimiento, lo que extendió por lo menos 40 años más la vida del proyecto.

Bajo la explotación a cielo abierto aún existen 4,200 millones de toneladas en recursos de mineral de cobre y molibdeno con un gran potencial de ser explotados mediante minería subterránea.

Bajo el Pit se han cuantificado cerca de 1,700 millones de toneladas en reservas de mineral de cobre (ley 0,7%) y molibdeno (502 ppm) que representan más del 60% de lo explotado en los últimos 90 años.

3.2.4.1. Operación Minera: En 2019 este proyecto produjo 385,309 toneladas métricas de cobre fino y 339,000 kilos de plata, entre otros subproductos. Con el sistema subterráneo se tiene calculada una tasa de producción de 140.000 toneladas de mineral por día (tpd), lo que significa una producción

de 366.000 toneladas de cobre fino y más de 18.000 toneladas de molibdeno fino al año.

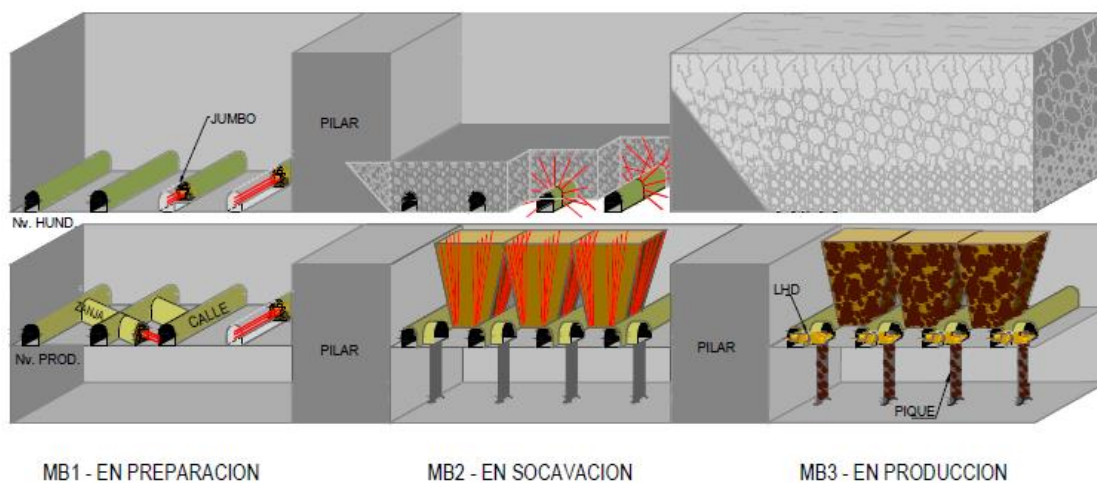
El método de explotación definido es el de Hundimiento por Bloques (Block Caving), distribuidos en cuatro niveles de explotación definidos en una configuración de macrobloques, nombre que se deriva del tamaño de los bloques diseñados, los que varían entre 2.2 y 5.5 ha, en una mina subterránea que comprende cuatro niveles de producción; un túnel de acceso principal de 7.5 kilómetros, otro túnel de transporte de mineral por banda de 6.3 kilómetros.

Este método masivo ofrece ventajas en costos y capacidades de producción, con una buena adaptación a las condiciones geotécnicas presentes.

Como contraparte, se sacrifican capacidades de selectividad de los minerales, incorporando mayor volumen de dilución en la producción, si se le compara con otros métodos selectivos de minería subterránea.

En la figura 26 se presenta un esquema del método de explotación aplicado en donde se presenta la división por bloques, la preparación del bloque y su explotación.

Figura 26. Método de explotación de hundimiento por bloques.



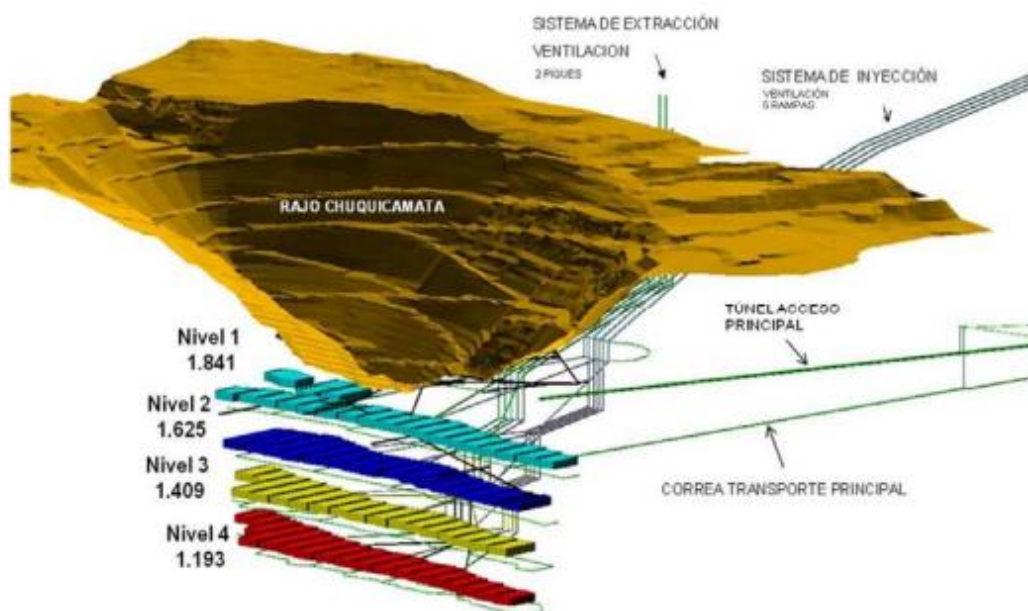
Fuente: https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110706/asocfile/20110706150616/informe_principales_decisiones_rev_p_25_03_2009.pdf

El proyecto minero está formulado a partir de cuatro niveles de explotación, los cuales se encuentran en los niveles de elevaciones 1,841 m, 1,625 m, 1,409 m y 1,193 m, generando 216 m de altura de columna media de mineral in situ entre niveles.

El nivel de explotación superior (1,841) presenta columnas de mineral in situ que varían entre 100 y 650 m, debido a la topografía resultante de la explotación a Cielo Abierto, en consecuencia, las columnas de reservas extraíbles asociadas en este nivel varían entre 100 y 400 m de altura, dejando mineral remanente que no se ha considerado en las cubicaciones ni en los planes de producción.

En la figura 27 se esquematiza los niveles y los bloques a explotar entre los niveles, y su posición frente al antiguo pit.

Figura 27. Reservas para extraer con relación al antiguo pit (rajo) y ubicación de los niveles.



Fuente: http://www.centromineria.pucv.cl/documentacion_pdf/Sr-Gonzalo-Lasagna-Proyecto-Mina-Chuquicamata-Subterr%C3%A1neo.pdf.

Para desarrollar el primer nivel de producción se requirió de 1,300 km de excavaciones horizontales y verticales, la extensión del área explotable es de unos 2,500 m en el eje Norte-Sur y 250 m en promedio en el eje Este-Oeste.

La macro secuencia de explotación del cuerpo, se inicia en el nivel superior y secuencialmente avanza en profundidad a los niveles siguientes. Cada nivel alcanzará su plan de producción estipulado, sin embargo, habrá períodos de transición en que la producción de 2 niveles deberá coexistir debido al agotamiento del nivel superior y crecimiento de producción del nivel inferior.

El arranque del mineral se realiza mediante la aplicación de dos procesos; primero se realiza hidrofracturamiento, inyectando agua a presión en macizo rocosa para crear fractura y facilitar el paso siguiente de perforación y voladura, con esto se favorece la estabilidad de la excavación y se logra un mejor fracturamiento de la roca, el cargue con cargadores, y el transporte hasta la cámara de trituración primaria se realiza por medio de banda transportadora, la mayoría de los equipos requeridos para realizar estas operaciones son operados a control remoto. El mineral triturado es llevado a superficie por una banda transportadora de 6.8 km.

Se establece un circuito de ventilación en donde el aire fresco entra por 5 excavaciones inclinadas que luego de recorrer los diferentes frentes de trabajo, sale como aire viciado por dos pozos (excavaciones verticales) a superficie (ver figura 26).

La infraestructura minera tiene una superficie de 26 hectáreas, en donde se destaca el campamento en el cual se pueden alojar 3,600 personas, oficinas con capacidad para 180 personas, comedor para 300 personas sentadas.

3.2.4.2. Beneficio: Este proceso comienza con la trituración primaria que se realiza al interior de la mina en el nivel más inferior, a través de una trituradora giratoria cónica con capacidad de procesamiento de 800 a 1,000 t/h, el tamaño máximo de la roca de alimentación es de 1.3 m y el tamaño de salida del proceso de trituración es 0.3 m.

Este material es transportado a superficie por medio de una banda transportadora donde se continua con la etapa de trituración secundaria y terciaria, las cuales se realizan en seco y circuito cerrado, el material que cumple con el tamaño requerido pasa al proceso de molienda.

La molienda es semi autógena, los cuerpos moledores son rocas y bolas, se realiza en húmedo y en circuito cerrado por hidrociclones, tiene una capacidad de procesamiento de 90,000 t/d, cuando el material cumple con las especificaciones de tamaño requeridos la pulpa formada pasa al proceso de flotación.

El proceso de flotación es convencional y se busca que la partícula de cobre sea hidrofóbica, para luego inyectar aire y esta se adhiera a las burbujas y flote para salir por el reboce de las celdas de flotación como concentrado de cobre, el cual pasa a los tanques espesadores.

Luego de las etapas de concentración y espesamiento la concentración de cobre pasa de estar cerca al 1% (tenor de cabeza a la entrada al proceso de trituración) a estar cerca del 33%.

El concentrado de cobre pasa al proceso de filtrado, para restarle humedad de acuerdo con las características requeridas para entrar a la fundición, en donde el concentrado se somete a una temperatura de 1,200 °C para separar el cobre del hierro y el azufre por medio de una especie de oxidación que ocurre dentro del horno que libera las partículas de cobre.

Después de este proceso la pureza del cobre es del 99.7%, las impurezas del 0.3% son de oro, plata y platino entre otros. En la fundición se obtiene ánodos de cobre que pesan 420 Kg, lo cuales son despachados en tren a la refinería en donde se somete al ánodo de cobre a un proceso de electro refinación para obtener un cátodo de cobre con pureza del 99.9%, producto final que cumple con las características para ser exportado.

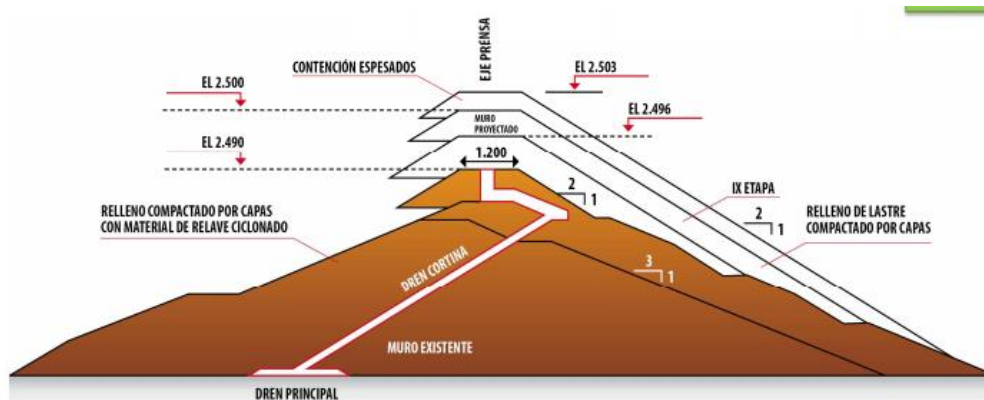
3.2.4.3. Colas del proceso de beneficio y refinación²²: El depósito de colas Talabre es una depresión natural formada por la meteorización del horizonte superior de caliza en cuyo fondo aparecen expuestos estratos impermeables de arcilla.

Esta estructura sirve de depósito de colas para tres proyectos mineros Chuquicamata, Ministro Hales y Radomiro Tomic, tiene una superficie ocupada de 62 Km², y una capacidad de almacenamiento de 2,060 millones de toneladas, se encuentra en operación desde 1952.

²² https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/tranque_relaves_talabre_codelco.pdf

Los muros de contención son construidos con la tecnología agua abajo, como lo muestra la figura 28.

Figura 28. Muro de contención depósito de colas mina Chuqicamata



Fuente: https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/tranque_relaves_talabre_codigo.pdf

Los muros de contención se construyen con un factor de seguridad (FS) de 1.32, la norma chilena exige para este tipo de estructuras un FS de 1.2. El depósito de colas tiene un monitoreo permanente de movimientos telúricos y estabilidad de los muros, para lo cual se tiene instalado tres (3) acelerógrafos, (sismógrafos de tecnología avanzada).

Para el control y monitoreo de infiltraciones y calidad del agua se tiene 47 pozos alrededor del depósito de colas, también se hace un monitoreo permanente de la calidad del agua de corrientes superficiales que están en el área de influencia del depósito de colas.

También se realizan controles de emisiones de material particulado, en donde se determina la cantidad y la clase de material particulado que se puede estar emitiendo a la atmósfera, hasta la fecha los monitoreos muestran que se está dentro de la norma chilena de emisiones.

3.2.4.4. **Costos de Operación:** No se dispone de información de costos de producción del proyecto Chuquicamata, sin embargo, Codelco en su informe de gestión anual para el año 2019 reporta los costos de producción promedio de los proyectos que esta empresa tiene de extracción de cobre en Chile. Para establecer este promedio se tiene en cuenta 9 proyectos, entre ellos Chuquicamata, estos proyectos produjeron 1,706,013 toneladas de cobre fino que representan el 29.58% del cobre producido en Chile. El Proyecto Chuquicamata representó el 22.59% de la producción de Codelco, y el 6.67% de la producción de cobre fino de Chile en el año 2019.

Se presenta los costos del referido informe asumiendo que estos representan en buena medida los costos de la producción de Chuquicamata, que es el segundo proyecto en producción de Codelco, después del Teniente.

Los costos y gastos totales de Codelco para el año 2019 bajaron un 4.3%, al pasar de 245.1 centavos de dólar por libra (c/lb) en 2018 a 233.5 c/lb en 2019. El costo neto de producción de cátodos de cobre bajo casi 3%, desde 230.5 c/lb a 224.1 c/lb en el mismo período. Los costos

directos (C1) llegó a 141.6 c/lb en 2019, cifra 1.8% superior a la de 2018 (139.1 C/lb), esto se debe, principalmente, a la menor producción.

Para tener un mejor entendimiento de cómo se reportan los costos de producción en la industria chilena del cobre, en la tabla 19 se presenta la forma de clasificar dichos costos.

Tabla 19. Clasificación de los costos de producción de cobre refinado en la industria chilena.

Costo de Operación	C1	C2	C3
Costo de Transporte			
Costo de Fundición, Refinado y Ventas			
Crédito por subproductos			
Depreciación y Amortización			
Gastos de Oficina Central			
Costos Indirectos			
Gastos Financieros Netos			

Fuente: Tesis de grado para optar al grado de Magister en gestión y dirección de empresas. Modelamiento de costos de la industria del cobre y estimación de efectos cíclicos y estructurales.

- 3.2.4.5. **Personal:** A diciembre de 2019 el proyecto Chuquicamata generó 7,706 empleos directos de los cuales 4,899 corresponden a empleados de la empresa y 2,807 a contratistas, con esta fuerza laboral se alcanza una productividad de 50 toneladas métricas de cobre fino por persona (tmf/pp).

3.3. COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS EXTRACTIVOS PARA MINERAL DE COBRE FORMULADOS EN COLOMBIA CON PROYECTOS REALIZADOS EN OTROS PAÍSES

Las técnicas aplicadas en los procesos de minado de cobre, beneficio y refinación dependen de las características geológicas del depósito que se pretende extraer, y se requieren de largos periodos de investigación y estudio para formular proyectos de aprovechamiento de este mineral bajo las condiciones que la minería moderna requiere, alta productividad, uso adecuado de los recursos, seguridad, bajo impacto ambiental y crecimiento social.

En Colombia por ejemplo el proyecto Quebradona, que es el primer proyecto de gran minería que se formula para aprovechar un depósito polimetálico cuyo metal principal es el cobre inicio su trabajo de investigación y estudio en el año 2004 para finalizar dicho proceso en año 2019 con la presentación del estudio de impacto ambiental, en Chile se estima que la etapa de estudio y preparación de un proyecto de extracción de cobre oscila entre 10 y 15 años, dependiendo de su complejidad y del nivel de encadenamiento que se pretenda lograr.

Comparar a Colombia con otros países donde se extrae mineral de cobre es un poco complejo debido a que en el país solo se tiene un proyecto de producción de cobre, El Roble, que a nivel

mundial es un proyecto de pequeña envergadura, para Colombia según el decreto 1666 del 21 de octubre de 2016 por medio del cual se reglamenta la clasificación minera, este proyecto es de mediana minería.

El proyecto Quebradona, diseñado para obtener un concentrado polimetálico, en el cual el principal metal es el cobre y que se encuentra en proceso de licenciamiento ambiental, según estudio de viabilidad técnica es un proyecto que en el contexto mundial por los niveles de producción alcanzados sería de mediana producción (teniendo en cuenta proyectos de producción subterráneas y cielo abierto), sin embargo al ser un proyecto de minería subterránea, (a nivel mundial hay pocos proyectos de importancia por su nivel de producción que se realicen con minería subterránea para aprovechar depósitos polimetálicos, uno en Rusia y dos en Chile) alcanza niveles producción importantes en contexto mundial, ya que se estima que se extraerá 17,000 t/d de material mineralizado, sin embargo esta producción es muy inferior a la alcanzada por los grandes proyectos de producción subterránea de cobre ubicados en Chile (El Teniente y Chuquicamata), los cuales producen de forma individual cerca 140,000 t/d de material mineralizado, estas minas son consideradas las más grandes en producción subterránea de mineral de cobre en el mundo.

Con la operación de la mina el Roble Colombia produce cerca de 40,000 toneladas de concentrado al año, de entrar en operación el proyecto Quebradona a esta producción se le sumaría aproximadamente 230,000 toneladas de concentrado por año.

Para lograr extraer las 17,000 t/d de material mineralizado, el proyecto Quebradona, tiene proyectado aplicar técnicas extractivas muy similares a las aplicadas en los grandes proyectos de minería subterránea (Chuquicamata y El Teniente), que luego de un proceso de transformación aplican tecnologías modernas de alta eficiencia, productividad y seguridad, ya que según lo que se tiene formulado en el proyecto de viabilidad técnica de Quebradona se aplicará el método de explotación de hundimiento de bloques por subniveles, alta mecanización y de alta tecnología (equipos operados a control remoto), maquinaria especializada para realizar excavaciones verticales y subverticales y alta seguridad en la operaciones mineras. Para Colombia aplicar estas técnicas significa un cambio representativo en la explotación subterráneas de depósitos polimetálicos, ya que se estaría aplicando tecnología de punta cumpliendo con los más altos estándares internacionales en el aprovechamiento de este tipo de depósitos.

Tradicionalmente el beneficio del material obtenido luego del proceso de minado se realiza en su totalidad en superficie, de esta forma lo hace la mina el Roble, los últimos avances tecnológicos, han llevado a que parte del beneficio se haga al interior de la mina, es así como en la última restructuración técnica de los proyectos Chuquicamata y El Teniente la trituration primaria del mineral pasó de realizarse en superficie al interior de la mina. El proyecto Quebradona dentro de la formulación técnica también tiene como propuesta realizar la trituration primaria a interior de la mina, con esto se logra mayor productividad y reducir el impacto ambiental del proyecto, ya que se reduce la emisión de ruido y material particulado a la atmósfera.

El beneficio del proyecto El Roble y según lo que se tiene diseñado para el proyecto Quebradona, busca obtener concentrado de cobre para ser vendido en el mercado internacional, a diferencia de los proyectos Chuquicamata y El Teniente que tiene una integración vertical y adicional al beneficio realizan el proceso de transformación para obtener cobre refinado el cual es vendido en el mercado internacional en laminas o alambra.

Para obtener el concentrado de cobre tanto los proyectos en Colombia como en Chile utilizan un proceso de concentración de flotación convencional, en el que se busca que la partícula de cobre sea hidrofóbica, para luego inyectar aire y esta se adhiera a las burbujas y flote para salir por el reboce de las celdas de flotación como concentrado de cobre.

El proyecto el Roble en Colombia maneja las colas del proceso de beneficio de forma similar a como se hace en los grandes proyectos en Chile, es decir formando depósitos o piscinas para depositar pulpa o lodos que resulta como desecho del proceso de beneficio, cuyo contenido de material líquido (agua) y sólido, partículas de roca, depende de criterios técnicos que garanticen la seguridad en el proceso y bajo impacto ambiental.

Con el diseño planteado en el proyecto Quebradona se logra un importante avance en el manejo de las colas o relaves, ya que se separan las colas que contienen pirita, debido a su potencial generador de aguas ácidas de las colas que contienen material inerte, para con este encapsular las colas con pirita y así eliminar todo riesgo de generación de aguas ácidas, para lograr una adecuado encapsulamiento de las colas con pirita se realiza un proceso que lo diferencia de la forma tradicional del manejo de las colas, ya que en el proyecto Quebradona se tiene proyectado someter la pulpa o los lodos sobrantes de la etapa de beneficio a un proceso de secado y filtrado para obtener un material sólido, lo que facilita su manejo, convirtiéndose casi en un depósito o botadero tradicional de roca estéril.

Con este manejo de las colas se requiere intervenir menos área y se mejora la seguridad, ya que se elimina el riesgo de generar una avalancha de alta dinámica como la que se genera con los lodos en caso de que la estructura falle.

4. PRINCIPALES IMPACTOS ECONÓMICOS CON EL APROVECHAMIENTO DE COBRE EN COLOMBIA

Para poder abordar este numeral se requiere revisar información sobre proyectos que estén en operación o que por lo menos hayan presentado estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental.

Según lo planteado en el capítulo anterior en Colombia solo se encuentra un proyecto que está en la etapa de operación (El Roble) y dos proyectos (Quebradona y Soto Norte) que tienen estudio de factibilidad, estos proyectos, como ya se describió aprovechan varios metales (cobre, oro y plata).

Debido a esta característica, para estimar los impactos económicos de este tipo de proyectos, no solo se debe realizar el análisis sobre la producción de cobre, sino de forma integral para todos los metales que se extraen, debido a que estos se encuentran en liga íntima, y solo es posible separarlos mediante un proceso de refinación, que hasta el momento en Colombia no se aplica o se tiene proyectado aplicar.

Para identificar los posibles impactos económicos que generan estos proyectos se describen los recursos e insumos que requieren en las diferentes etapas del proyecto.

4.1. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL PROYECTO QUEBRADONA²³

4.1.1. Producción y Vida Útil del Proyecto: Como se pudo ver en el capítulo anterior, la producción de la mina se estima en aproximadamente 6.2 millones de toneladas por año (Mtpa) de mineral, con ley promedio de 1.20 % de cobre. Las reservas de los minerales aprovechables técnica y económicamente se estiman en 109 millones de toneladas (Mt) con leyes promedio de 1.21 % Cu, 0.66 g/t de Au y 7.05 g/t de Ag. El proyecto se desarrollará en cuatro fases: Construcción y montaje, con una duración de 4 años; 21 años para extracción, 3 años de cierre y 10 de post-cierre.

La producción total de concentrado de la planta de beneficio será de 271,923 ton/año entre el año 1 y 6. Para los años 7 a 21 sería de 230,241. La producción de pirita se calcula en 544,138 ton/año entre el año 1 y 6 y de 268,409 en los años 7 a 21. Mientras tanto, la producción de relaves filtrados inertes de los primeros seis años sería de 5,383,412, y de 5,697,713 entre los años 7 y 21.

A continuación, se describen los principales recursos requeridos en este proyecto.

4.1.2. Empleo: En el numeral 3.2.1.5 se describe el personal requerido en cada una de las etapas del proyecto.

4.1.3. Insumos del Proyecto (Encadenamientos hacia Atrás): Los multiplicadores obtenidos de la consultoría realizada por la Universidad del Rosario para la UPME en 2014, a partir de la matriz insumo producto de los minerales, no son aplicables al cobre dado que este mineral tenía una participación muy pequeña en la producción en ese momento y por tanto fue agregado en la cuenta de mineral de hierro, aluminio y ferromanganeso (este último representaba el 96% de toda la cuenta agregada). Por lo tanto, los multiplicadores obtenidos no son representativos del cobre y por esta razón no deben ser considerados.

En consecuencia, no es posible estimar el valor generado en la economía como efecto de la puesta en marcha del proyecto Quebradona. Sin embargo, se presentan evidencias (a nivel cualitativo) de la existencia de encadenamientos hacia atrás, especialmente en materiales de construcción y montaje, energía, industria química y la de alimentos.

En la tabla 20 se describe la estimación que hizo la empresa de los volúmenes de insumos necesarios para la ejecución del proyecto, de acuerdo con los diseños mineros.

Se estima que en las compras locales directas serán del orden de entre 189.000 y 231.000 millones durante todo el proyecto²⁴, lo que da un promedio anual aproximado de 8,000 millones de pesos durante la vida del proyecto.

4.1.4. Inversión Requerida: A lo largo de su vida, Quebradona requerirá inversiones de capital por un monto de 1,364 millones de dólares de 2019. Con una tasa de cambio promedio de \$3,700 frente al dólar durante 2019, esta cifra alcanza los 5 billones de pesos, repartidos durante las diferentes etapas del proyecto. Los valores serán distribuidos según se muestra en la tabla 20, en donde se diferencia por etapas y por rubros.

²³ Toda la información proviene del documento de Evaluación de Impacto Ambiental elaborado por personal de la Mina Quebradona en 2019.

²⁴ <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/explotacion-minera-en-erico-pendiente-de-licencias-ambientales-540206>. 28 de septiembre de 2020.

Tabla 20. Principales insumos requeridos en el proyecto Quebradona

PRINCIPALES INSUMO REQUERIDOS EN EL PROYECTO			
INSUMO	CANTIDAD	USO	PROVEEDORES
Materiales de Construcción (Gravas, arenas y material seleccionado)	3.3 millones m3	Preparación de concretos, adecuación y construcción de vías, presas, obras de drenaje y de plataformas para la planta	Canteras de la región
Otros materiales de construcción: (cemento, acero, elementos prefabricados para cruces de las vías sobre cuerpos de agua, tuberías y accesorios convencionales de PVC, polietileno de alta densidad, ladrillos, tejas metálicas, tuberías de acero convencionales, estructuras metálicas de techos, plataformas, racks de servicios, tanques convencionales de acero al carbón, acero inoxidable, fibra de vidrio, tuberías y ductos de acero al carbón o de acero inoxidable para servicios, ductos de aire acondicionado, componentes generales de las instalaciones eléctricas como transformadores, aisladores, postes, herrajes, tableros eléctricos, cableado, motores, bombas y equipos mecánicos convencionales, entre otros.	Sin Información	Construcción capamento, plata, subestaciones eléctricas, polvorin, adecuación y construcción de vías, presas, obras de drenaje y de plataformas para la planta, etc.	Se priorizará su adquisición, en el mercado nacional y de no ser posible en el internacional. Por el volumen y las condiciones específicas es posible que se acuerde con algunos proveedores la producción de estos insumos directamente en el sitio del proyecto, como es el caso de los prefabricados de concreto, redes y racks de servicios, ensamble de equipos de gran tamaño, etc. .
Aceites, Grasas, combustible (ACPM) disolventes y Otros	ACPM: 3,700 galones/día. Aceite de motor: 980 galones/día. Aceite hidráulico: 4,750 galones/día. Grasas: 540 kilos	ACPM requerido para alimentar todos los equipos de construcción y operación. Aceite de motor para lubricar las partes móviles de los motores de los vehículos. Aceite hidráulico para lubricar los componentes móviles de la maquinaria como retroexcavadoras o martillos hidráulicos, frenos y sistemas de refrigeración. Grasas para los sistemas de transmisión, para disminuir la fricción generada en el contacto entre dispositivos o elementos mecánicos	En el mercado Nacional
Energía	Potencia requerida 58.24 MW para alimentar: - 10 subestaciones eléctricas, distribuidas en toda la planta de beneficio. - 2 subestaciones eléctricas ubicadas en el pórtico de entrada del túnel. - 14 subestaciones eléctricas para las facilidades adicionales como campamento, almacén de explosivos, talleres, bodegas y otras	Etapas de construcción y montaje se requieren circuitos de media tensión se solicitara conexión de redes electricas a EPM. Etapas de explotación el suministro de energía eléctrica se realizará mediante una conexión al Sistema de Transmisión Nacional (STN) con una línea a 230 kV en circuito sencillo. La mina contará con un sistema de respaldo de energía de plantas diésel para alimentar las cargas esenciales y de emergencia del Proyecto; estas plantas serán conectadas al barraje de distribución principal de 34.5 kV a través de transformadores elevadores 0.480/34.5 kV, ubicados en la subestación principal de 230/34.5 kV.	Las obras tendientes a la conexión del proyecto serán contratadas con un transmisor nacional, quien se encargará de hacer los diseños detallados, compras, trámites regulatorios y ambientales, servidumbres, ejecución de la obra, administración, operación, mantenimiento, cierre y pos-cierre de la infraestructura requerida para prestar el servicio de conexión a Quebradona.
Insumos Plata de beneficio			
Medios molidores			
Bolas de acero (60 mm de diametro)	6,970 t/año	Molino de bolas	Importado
Bolas de cerámica (3-5 mm de diametro)	63 t/año	Molino de remolienda	Importado
Cal	16,549 t/año	Corregir PH de la pulpa, deprimir pirita	Proveedor nacional
Colector de Cobre (Cytec A-3302)	196 t/año	Colector del cobre en la flotación	Importado
Promotor (Diésel)	56 t/año	Promotor que ayuda a la flotación de minerales	Mercado nacional
Colector de Pirita (Amil Xantato de Potasio – PAX)	156 t/año	Colector de pirita, en la flotación de pirita	Importado
Espumante (Metil Isobutil Carbinol – MIBC)	1,085 t/año	El espumante se utilizará para proporcionar una espuma estable en celdas de flotación, tanto de pirita como de cobre	Importado
Floculante.	131 t/año	El floculante se utilizará para mejorar la sedimentación en los espesadores	Importado
Depresor de Pirita (Benefloat)	1,650 t/año	El Benefloat se utilizará como depresor de la pirita desde la pulpa de concentrado en las etapas de flotación cleaner	Importado
Dispersante (MINDP 150)	1,650 t/año	se utilizará para depresar la pirita desde la pulpa de concentrado en las etapas de flotación cleaner	Importado

PRINCIPALES INSUMO REQUERIDOS EN EL PROYECTO			
INSUMO	CANTIDAD	USO	PROVEEDORES
Insumos Operación Mina			
Arranque			
Sustancia explosiva	585 toneladas promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de desarrollo	Importado
	1887 toneladas promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de explotación	Importado
Accesorios de voladura			
Iniciador (Booster)	120,123 unidades, promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de desarrollo	Importado
	21.429 unidades, promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de explotación	Importado
Detonadores	120,123 unidades, promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de desarrollo	Importado
	24,351 unidades, promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de explotación	Importado
Cordon detonante	114,727 metros promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de desarrollo	Importado
	129,873 metros promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de explotación	Importado
Mecha de seguridad	3,824 metros promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de desarrollo	Importado
	9,740 metros promedio anual vida del proyecto	Excavaciones de explotación	Importado
Sostenimiento			
Pernos	426,384 unidades	Estabilidad excavaciones	Importado
Malla	3,150,655 m2	Estabilidad excavaciones	Importado
Concreto lanzado	6,822 m3	Estabilidad excavaciones	Proveedor nacional

Fuente: Construcción UPME, Subdirección de minería, datos Estudio de impacto ambiental, proyecto Quebradona, Capítulo 3, descripción del proyecto. Noviembre de 2019.

Tabla 21. Inversión requerida durante la vida del proyecto.

Rubro	Millones de US\$
Construcción y Montaje	
Mina	301,77
Planta, infraestructura y otras facilidades	690,55
Total inversiones de capital de construcción	992,32
Explotación	
Inversiones de capital de sostenimiento	371,65
Total inversiones de capital – vida de la mina	1363,97

Fuente: Mina Quebradona, 2019. Dólares constantes de 2019.

4.2. CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS DEL PROYECTO SOTO NORTE²⁵

4.2.1. **Producción y Vida Útil del Proyecto:** El tiempo de vida estimado de la mina es de 25 años, incluyendo 4 años de preparación de infraestructura y desarrollo y 21 años

²⁵ Toda la información proviene del documento de Evaluación de Impacto Ambiental elaborado por la Sociedad Minera de Santander Minesa del Proyecto Soto norte en 2019. El cobre es un producto secundario de la producción de oro y plata en el proyecto.

de fase de explotación mediante la aplicación de un sistema subterráneo. El diseño de la mina prevé la extracción homogénea de material mineralizado, calculado en alrededor de 7,000 a 8,219 toneladas por día, totalizando entre 2.2 y 3 Mt año; es decir que, de acuerdo con la estimación de recursos realizada, se tendría una producción de entre 422,975 y 576,584 onzas troy de oro, entre 2.5 y 3.4 M de onzas troy de plata y entre 3,960 y 5,400 toneladas de cobre al año, basados en un tenor promedio de 5.98 g/t de oro, 35 g/t de plata y 0.18% de cobre.

4.2.2. Empleo: Conforme a las fases establecidas para los 25 años del proyecto, el número estimado de personas a emplear en cada año, incluidos empleados y contratistas son los que se muestran en la tabla 22. Como se puede apreciar, el empleo promedio anual es de 880 personas.

4.2.3. Insumos del Proyecto (Encadenamientos hacia Atrás): En la tabla 23 se presenta la cantidad de los principales insumos necesarios para la ejecución del Proyecto, de acuerdo con los diseños mineros.

Tabla 22. Empleo generado durante la vida del proyecto Sotonorte

AÑO	CANTIDAD DE EMPLEADOS Y CONTRATISTAS
1	507
2	1764
3	1532
4	987
5	860
6	866
7	866
8	866
9	866
10	887
11	866
12	887
13	887
14	866
15	866
16	866
17	866
18	861
19	816
20	814
21	795
22	772
23	791
24	568
25	481
PROMEDIO ANUAL	880

Fuente: de Evaluación de Impacto Ambiental elaborado por la Sociedad Minera de Santander Minesa del Proyecto Soto norte en 2019

Tabla 23. Principales insumos requeridos en el proyecto Soto Norte

PRINCIPALES INSUMO REQUERIDOS EN EL PROYECTO			
INSUMO	CANTIDAD	USO	PROVEEDORES
Materiales de Construcción (Gravas, arenas y triturado)	Gravas (m3): 22,358,385	Preparación de concretos, adecuación y construcción de vías, presas, obras de drenaje y de plataformas para la planta	Canteras de la región y material removido en la construcción de la infraestructura del proyecto apto para ser utilizado como material de construcción.
	Arena (m3): 193,539		
	Hierro (t) 9,264		
	Cemento (t): 2117,242		
	Geotextil (t): 810,960		
Grasas y combustible (ACPM)	ACPM: 52,734 millones de litros durante la vida del proyecto. Grasas: 2.59 millones de litros durante la vida del proyecto.	ACPM requerido para alimentar todos los equipos de construcción y operación. Grasas para los sistemas de transmisión, para disminuir la fricción generada en el contacto entre dispositivos o elementos mecánicos	En el mercado Nacional
Energía	Potencia requerida: 36,651 KW - Demanda máxima MVA: 29,023. - Demanda máxima KW : 26,214 - Factor de potencia: 0.9032	Se buscará conexión la Sitema Inteconectado Nacional.	Proveedor nacional, quien se encargará de hacer los diseños detallados, compras, trámites regulatorios y ambientales, servidumbres, ejecución de la obra, administración, operación, mantenimiento, cierre y pos-cierre de la infraestructura requerida para prestar el servicio de conexión a Quebradona.
Insumos Plata de beneficio			
Medios moledores			
Bolas de acero (60 mm de diametro)	6,970 t/año	Molino de bolas	Importado
Bolas de cerámica (3-5 mm de diametro)	63 t/año	Molino de remolienda	Importado
Aero 7249	365 canécas/año	Colector de cobre en la limpieza y relimpieza del concentrado de cobre y de pirita	Importado
Hexametáfosfato de sodio (Calgon)	9,490 bultos/año	Para la limpieza y relimpieza del concentrado de cobre y de pirita	Importado
Hidrosulfuro de sodio (NaHS)	11,680 canécas/año	Proceso primario de flotación y limpieza de pirita	Importado
Amil Xantato de Potasio (PAX)	2,920 canécas/año	Colector en la flotación de pirita	Importado
Cal viva	3.9 kg/tonelada procesada	Flotación primaria de cobre, limpieza y relimpiezadel concentrado de cobre y concentrado de pirita	Proveedor Nacional
Methyl isobutyl carbinol (MBC)	365 canécas/año	Flotación primaria de cobre, limpieza y relimpiezadel concentrado de cobre y concentrado de pirita	Importado
BASF Magnafloc 333	365 bultos/año	Floculante para espesamiento de cobre y de pirita	Importado
BASF Magnafloc 338	3,285 bultos/año	Floculante para espesamiento de relaves	Importado
Insumos Operación Mina			
Arranque			
Sustancia explosiva, será un compuesto nitrogenado del tipo emulsión	15,763 toneladas	Exacavaciones de desarrollo	Proveedor Nacional
	15,678 toneladas	Exacavaciones de explotación	Proveedor Nacional

Fuente: Construcción UPME, Subdirección de minería, datos Estudio de Impacto Ambiental -EIA- Proyecto de Explotación Subterránea De Minerales Auroargentíferos "Soto Norte". Capítulo 3. Enero de 2019

- 4.2.4. **Inversión Requerida:** Los costos de capital estimados del montaje, puesta en marcha y operación de la planta de beneficio de minerales y metalurgia, son los apropiados para la producción anual promedio de 410,0000 onzas de oro equivalente en concentrados polimetálicos y un procesamiento de hasta 3.0 millones de toneladas de mena. En la estimación de dichos costos se incluyen las actividades de la etapa preoperativa del proyecto como lo es el diseño de la planta. En el cálculo de los costos de inversión y operación se consideran los principales centros de costos asociados a las actividades.

- Costos de capital relacionados con el beneficio, la infraestructura de planta, metalurgia, facilidades, instalaciones industriales, edificios, energía y telecomunicaciones, rechazos, protección, y costos directos, indirectos y de propietario.
- Costos de capital asociados con el relave de la mina.
- Costos de capital asociados con materiales e insumos necesarios para la construcción de infraestructura incluyendo acceso, manejo de material, fuente de energía, instalaciones superficiales de mina, fuente de agua, costos indirectos y de propietario.
- Costos de capital relacionados con grandes rehabilitaciones, adquisición, reemplazamiento de equipos de planta, y capital de mantenimiento.

En la tabla 24 se resume el Capex del proyecto.

Tabla 24. Resumen del Capex del proyecto Soto Norte

DESCRIPCIÓN DE CENTRO DE COSTO	Antes de producción año cumplido capex (1)	Después de producción año cumplido (opex&sust capex) (1)	Total (US\$) Millones
Mina Capex	US\$398	Incluidos en gastos operacionales	398
Planta de procesos e infraestructura Capex	US\$409	Incluidos en gastos operacionales	409
Costos generales y administrativos Capex	US\$33	Incluidos en gastos operacionales	33
Costos de sostenibilidad	US\$38	US\$706	744
Costos preoperacionales y operacionales	US\$634	US\$4,807	5,441
TOTAL (millones US\$)	US\$1,512	US\$5,513	7,025

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental -EIA- Proyecto de Explotación Subterránea De Minerales Auroargentíferos "Soto Norte". Capítulo 3. Enero de 2019

Los costos antes de producción están representados principalmente en Capital de Inversión (CAPEX), Gastos Preoperacionales (Pre-Opex) y Gastos de Sostenibilidad.

- 4.2.5. **Costos de Operación:** Equivalen a los costos de producción, operación y extracción del concentrado que deben ser incurridos en un periodo contable. Incluyen minería, planta, infraestructura, exploración, plan de manejo ambiental, gastos generales y administrativos, mercadeo y logística y pago de derechos, los cuales se discriminan en la tabla 25.

Tabla 25. Desglose costos unitarios proyecto Soto Norte.

DESCRIPCIÓN DEL COSTO	US\$/t	PORCENTAJE
Minería	32.25	32.4
Beneficio	13.49	13.6
Exploración	0.96	1
Manejo ambiental	3.73	3.7
Gastos de administración en mina	4.43	5.5
Gastos de administración oficina	8.58	8.6
Otros	0.04	0
Inversión mandatoria ambiental	0.15	0.2
Regalías	7.11	7.1
Mercadeo	27.75	27.9

TOTAL (US\$/t)	99.49	100
----------------	-------	-----

Fuente: Estudio de Impacto Ambiental -EIA- Proyecto de Explotación Subterránea De Minerales Auroargentíferos "Soto Norte". Capítulo 3. Enero de 2019

4.3. CARACTERÍSTICA ECONÓMICAS DEL PROYECTO EL ROBLE

4.3.1. Producción y Vida Útil del Proyecto: La mina del proyecto el Roble está en operación desde 1990, de acuerdo con el nivel de producción reportado en el numeral 3.2.2 es un proyecto de mediana minería, según el decreto 1666 del 21 de octubre de 2016 por medio del cual se establece la clasificación minera, al alcanzar un nivel de producción de alrededor de las 280,000 toneladas anuales.

El proyecto cuenta con recursos medidos e indicados de 1,174,400 toneladas de roca mineralizada, con un tenor promedio de 4.3% de cobre y 2.33 g/t de oro; según el nivel de producción proyectado se estima que la vida útil del proyecto es hasta el año 2024.

Inversión Requerida: Se proyecta la inversión requerida desde finales de octubre de 2020 hasta 2024, año en el cual se espera extraer las reservas con las que cuenta el proyecto en la actualidad. Esta inversión incluye la construcción del depósito de relaves N° 5, el cierre del depósito de relaves N° 4, la implementación del proceso de filtrado de relaves, cierre de la mina y otras inversiones menores.

En caso de contar con nuevos recursos y reservas se requerirán inversiones adicionales enfocadas a actividades de desarrollo de la mina para acceder a esas nuevas reservas.

En la tabla 26 se muestra el monto de la inversión requerida de forma anual hasta el año 2024.

Tabla 26. Inversión requerida (US\$ en miles)

AÑO	2020*	2021	2022	2023	2024
INVERSIÓN	1,528	3,399	1,100	1,300	2,170

Fuente: ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021

*Inversión estimada entre octubre 1 y 31 de diciembre de 2020

Costos de Operación: Los costos de operación se muestran en la tabla 27 e incluyen un incremento anunciado del 8% en la energía, y una inflación proyectada para Colombia del 3.5%.

Tabla 27. Costos de operación (US miles)

Centro de Costo	2020*	2021	2022	2023	2024**
Mina	4,074	16,131	15,261	12,190	5,009
Beneficio	1,062	4,081	4,113	3,544	2,173
Servicios generales	1,147	4,035	4,036	3,632	1,625
Administrativos	694	2,444	2,450	2,199	1,183
Gastos operativos	1,544	6,022	6,056	5,717	4,813
TOTAL	8,521	32,713	31,916	27,282	14,803

Fuente: ATICO-TECHNICAL-REPORT-MINER-2021

*Considera los costos del 1 de abril a 31 de diciembre de 2020

**Considera los costos del 1 de enero a 31 de junio de 2024

Según lo presentado en la tabla 27, y de acuerdo con la producción de cobre contenido en concentrado, los costos de operación C1 del proyecto el Roble están en promedio alrededor de los 185 centavos de dólar por libra durante la vida estimada del proyecto.

4.4. IMPACTOS ECONÓMICOS PROYECTADOS ASOCIADOS A LOS PROYECTOS QUEBRADONA Y SOTONORTE

A partir de la información disponible y las proyecciones de precios y tasa de cambio, a continuación, en la tabla 28 se presentan los estimativos del impacto en el empleo y la renta minera (regalías e impuestos) para el caso de los proyectos Quebradona, el Roble y Sotonorte.

Tabla 28. Resumen comparativo impactos económicos

Rubro	Mineral	Proyecto		
		Quebradona	Sotonorte	El Roble
Inversión (Millones de dólares)		1.364	7.025	9.475
Empleo Promedio ponderado Anual		768	780	350
Producción (Anual)	Cobre (Ton)	75.020	4.680	26.843
	Oro (Onza troy)	131.561	499.780	32.611
	Plata (Onza troy)	1.405.309	2.950.000	N.D
Ingresos Estimados (dólares)	Cobre	667.678.000	41.652.000	238.902.700
	Oro	197.341.261	749.669.250	290.237.900
	Plata	28.106.180	59.000.000	N.D
Costos Estimados (Año)	Cobre (Ton)	212.456.640	13.253.760	99.319.100
	Oro (Onza)	122.351.582	464.794.935	30.328.230
	Plata (Onza)	22.484.944	47.200.000	N.D
Regalías Estimadas (Dólares Anuales)	Cobre	26.707.120	1.666.080	9.556.108
	Oro	6.314.920	23.989.416	9.287.613
	Plata	899.398	1.888.000	N.D
Renta Estimada (Dólares Anuales)	Cobre	150.223.049	9.371.419	46.062.588
	Oro	24.746.594	94.008.524	85.770.191
	Plata	1.855.008	3.894.000	N.D

Rubro	Mineral	Proyecto		
		Quebradona	Sotonorte	El Roble
Inversión (Millones de dólares)		1.364	7.025	9.475
Empleo Promedio ponderado Anual		768	780	350
Producción (Anual)	Cobre (Ton)	75.020	4.680	26.843
	Oro (Onza troy)	131.561	499.780	32.611
	Plata (Onza troy)	1.405.309	2.950.000	N.D
Ingresos Estimados (dólares)	Cobre	667.678.000	41.652.000	238.902.700
	Oro	197.341.261	749.669.250	290.237.900
	Plata	28.106.180	59.000.000	N.D
Costos Estimados (Año)	Cobre (Ton)	212.456.640	13.253.760	99.319.100
	Oro (Onza)	122.351.582	464.794.935	30.328.230
	Plata (Onza)	22.484.944	47.200.000	N.D
Regalías Estimadas (Dólares Anuales)	Cobre	26.707.120	1.666.080	9.556.108
	Oro	6.314.920	23.989.416	9.287.613
	Plata	899.398	1.888.000	N.D
Renta Estimada (Dólares Anuales)	Cobre	150.223.049	9.371.419	46.062.588
	Oro	24.746.594	94.008.524	85.770.191
	Plata	1.855.008	3.894.000	N.D

Fuente: Elaboración propia con base en supuestos e información consultada y estimada.

NOTAS: Costo estimado de producción de cobre (C1) para Quebradona y Sotonorte: 2,832 US\$/ton; para El Roble: 3,700 US\$/ton. Costo producción oro: 930 US\$/oz, Costo producción plata: 16 US\$/oz, Tasa de cambio: 3,400 COP\$/US\$.

Renta estimada aplicando el 33% a la diferencia entre los ingresos y los costos estimados.

Precios estimados a partir de las proyecciones del Banco Mundial

Tabla 29. Empleo anual comparativo

Total empleos país 2019	23,068,298
Total empleos minería	163,785
Quebradona	768
Sotonorte	780
El Roble	350

Según la información presentada sobre estos dos proyectos en relación con los aspectos económicos, se puede afirmar que sin duda estos tendrán un buen impacto económico en los municipios donde se desarrollarán. Por cada 10,000 empleos generados en el sector minero, los proyectos de Quebradona y Sotonorte generarían cerca de 95 empleos adicionales (entre los dos). Tendrán una vinculación de personal importante, se puede deducir que se requerirá un proceso de capacitación importante en actividades mineras para que el personal laboralmente activo del municipio, pueda participar en un porcentaje representativo en el proyecto, debido a la calificación y formación requerida. Por el lado de los encadenamientos, estos son importantes y muchos de ellos provienen de la industria química, de hidrocarburos y de la energía. Los principales encadenamientos hacia atrás estarán relacionados con la prestación de servicios con la industria de alimentos, construcción (construcción y mantenimiento de edificaciones), metalmecánica, mantenimiento de equipos, los cuales en su gran mayoría podrían provenir del mismo municipio o de otros aledaños.

5. ASPECTOS FAVORABLES Y DESFAVORABLES FRENTE AL POSIBLE APROVECHAMIENTO DE MINERAL DE COBRE.

Todas las evidencias muestran que Colombia posee unas ventajas comparativas que hacen que en el contexto nacional e internacional se perciba este territorio como una posible fuente importante de mineral de cobre, metal que según diferentes estudios va a tener una demanda creciente, ya que es necesaria su utilización dentro del proceso de transición energética hacia tecnologías de generación más limpia y un uso eficiente de la energía.

Colombia por su ubicación geográfica privilegiada, cuenta con amplias zonas costeras, sobre los dos océanos Atlántico y Pacífico, que facilitan la salida de sus productos a diferentes países del mundo, uno de estos productos podría ser el cobre, bien sea como concentrado o refinado.

Otra de las ventajas comparativas y una de las más importantes desde el punto de vista del aprovechamiento de minerales, es sus características geológicas que como se describió en el numeral 2.1 hacen que Colombia sea reconocido a nivel internacional como un país con un alto potencial en depósitos polimetálicos con contenido de cobre.

El conocimiento que hasta la fecha se tiene de las áreas con potencial en cobre en Colombia muestran, que también posee algunas desventajas comparativas si se compara con áreas o depósitos polimetálicos con contenido de cobre ubicados en otros países.

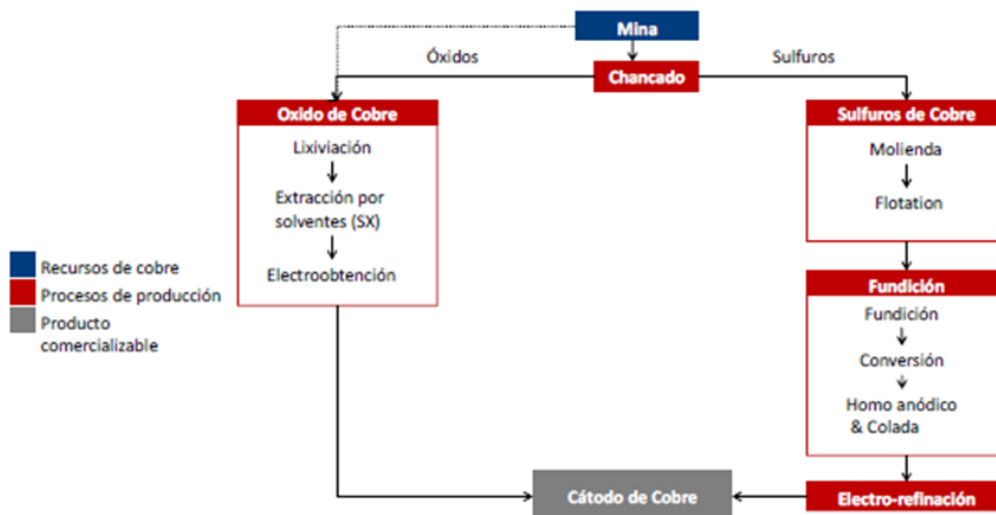
Hasta la fecha en Colombia no se ha identificado zonas de baja sulfuración u óxidos de cobre, en cantidades que permitan aprovechar este metal, este tipo de depósitos se forman a partir de la acción del clima y la meteorización de minerales menas de cobre como la calcopirita, bornita,

calcosina, entre otros sulfuros, que se oxidan para formar silicatos y óxidos de cobre. En condiciones reductoras el cobre se transforma en sulfuros secundarios (calcosina y covelina (CuS)) y puede llegar a aparecer cobre nativo.

Este tipo de depósitos (óxidos de cobre o cobre de baja sulfuración) requieren procesos industriales (beneficio y refinación) más sencillos, reducción de tamaño, lixiviación y refinación electrolítica, en algunos casos con ayudas de bacterias para obtener cobre refinado. En Colombia los depósitos de mayor potencial son de alta sulfuración, por tal motivo para obtener cobre refinado se debe pasar por procesos un poco más complejos, reducción de tamaño, concentración de minerales (flotación), fusión para mata, conversión y finalmente refinación térmica y electrolítica.

Esta puede ser una de las causas por la cuales los proyectos que hasta la fecha se han formulado en Colombia o que están en operación están diseñados para obtener concentrado de cobre por medios convencionales de flotación. En la figura 29 se presentan los flujogramas del proceso de obtención de cobre refinado a partir de menas óxidos y sulfuros en donde se puede apreciar la diferencia entre los dos procesos.

Figura 29. Obtención de cobre refinado a partir de óxidos y sulfuros



Fuente: Fuente: CRU para UPME (2018)

Colombia está trabajando para identificar el potencial en cobre desde la década de los 70s, sin embargo, los esfuerzos realizados para avanzar en la geología de detalle que lleve a modelar los depósitos geológicos iniciaron hace unos 20 años, investigaciones realizadas por inversionistas privados en áreas que se han identificado con potencial en Colombia.

Las áreas donde se han realizado estas investigaciones son relativamente pequeñas, por esta razón los recursos y reservas hasta ahora estimados en Colombia en los proyectos que tienen avances importantes en la modelación geológica de los depósitos muestran que están muy por debajo de los recursos y reservas de los estimados para los principales proyectos en operación en el mundo. El proyecto con mayores recursos y reservas estimado en Colombia es Quebradona, y en el mejor de los casos representa aproximadamente el 50% de los recursos y reservas de los principales proyectos en operación en el mundo.

El avance que a la fecha se tiene en la exploración de detalle de mineral de cobre ha sido uno de los impedimentos para que en el país se tenga en operación proyectos de gran minería, sin

embargo, esta situación llama la atención de los inversionistas, que ven este territorio prácticamente inexplorado a diferencia de los países vecinos (Chile y Perú) donde se ha podido configurar proyectos que hacen que Sur América sea la región que más cobre produce en el mundo. Este atractivo se incrementa cuando las investigaciones recientes en Colombia muestran que en el país se puede formular proyectos de talla mundial de extracción de polimetálicos (cobre y otros metales) como Quebradona y Soto Norte.

Los avances en los estudios de geología de detalle también muestran una característica que hace que los depósitos de mineral de cobre en Colombia se diferencien de los ubicados en otros países, que muy seguramente va influir para que el país sea visto como un territorio interesante para la inversión para el aprovechamiento de este mineral, son los contenidos de cobre en los proyectos en operación en Colombia (El Roble) y el proyecto con estudio de factibilidad técnica finalizado (Quebradona) cuyo metal principal es el cobre muestran tenores entre 1.2 y 3.6%, mientras que los principales proyectos en operación en el mundo muestran tenores por debajo de 1%, estando la mayoría alrededor del 0.8%, contenido que va disminuyendo a medida que se profundiza en el depósito.

Los estudios e investigaciones muestran que el país tiene un importante potencial en mineral de cobre, se debe trabajar para mejorar el nivel de inversión en exploración en temas como seguridad jurídica, mayor coordinación interinstitucional, relacionamiento Estado, inversionista y comunidades, infraestructura, agilidad en los tramites mineros y ambientales, temas que han sido identificados por la institucionalidad minera y en los cuales se ha venido trabajando en las últimas administraciones.

El estudio de factibilidad técnica y ambiental del proyecto Quebradona indica que, de realizarse este proyecto, sería de talla mundial por los volúmenes a extraer, la operación de extracción y beneficio se van a realizar con técnicas similares a proyectos reconocidos a nivel mundial por su técnica, volúmenes de producción y estabilidad en la operación (con más de 100 años de actividad), como los son los proyectos de Chuquicamata y El Teniente ambos en Chile.

Para realizar proyectos de tal envergadura Colombia debe mejorar el conocimiento del recurso humano, en temas como exploración de depósitos polimetálicos, procesos de minería subterránea de grandes volúmenes (hundimiento de bloques), procesos de beneficio de polimetálicos, manejo de los estériles y depósito de colas del proceso de beneficio, temas en los cuales se debe aprovechar la experiencia y el conocimiento de Chile, país con más de 100 años de estar aprovechando el mineral de cobre, logrando configurar una industria que ha llevado a Chile a ser el principal productor de cobre en el mundo.

Según los estudios de factibilidad presentados por los proyectos Quebradona y Soto Norte, se puede afirmar que sin duda estos tendrán un buen impacto económico en los municipios donde se desarrollarán. Tendrán una vinculación de personal importante, por el lado de los encadenamientos, estos son importantes y muchos de ellos provienen de la industria química, de hidrocarburos y de la energía.

6. CONCLUSIONES

- A nivel internacional el territorio colombiano es reconocido por su potencial en depósitos polimetálicos, ya que en él se ha identificado el cinturón metalogénico que hace presencia a lo largo de la cordillera de los Andes, en donde se han encontrado yacimientos de polimetálicos que han dado origen a grandes proyectos mineros en

países como Chile, Argentina, Perú, Ecuador, Panamá, México y EE. UU., que han llevado a Sur América a ser reconocida como la región con mayor cantidad de reservas y mayor producción de cobre en el mundo, siendo Chile el primero y Perú el segundo productor de este metal a nivel mundial.

- Las dificultades para realizar exploración en Colombia han limitado las posibilidades de cuantificar recursos y reservas de mineral de cobre, y son pocas las zonas del país que cuentan con una modelación geológica de detalle que permita hacer este tipo de estimaciones, los proyectos que tienen avances importantes en la exploración geológica de detalle tienen estimaciones muy por debajo de los recursos y reservas de los principales proyectos en operación en el mundo. El proyecto con mayores recursos y reservas de mineral de cobre estimadas en Colombia es Quebradona, que en el contexto internacional no alcanzaría a representar el 50% de las recursos y reservas estimadas entre los proyectos con mayor producción.
- Lo tenores de cobre que hasta la fecha se han identificado en Colombia en proyectos como el Roble (en operación), y Quebradona (con estudio de viabilidad técnica y ambiental) están entre 1.2 y 3.6%, superiores a los que registran los principales proyectos en operación en el mundo que muestran tenores por debajo de 1%, estando la mayoría alrededor del 0.8%, contenido que va disminuyendo a medida que se profundiza en el depósito.
- Los depósitos de polimetálicos con contenido de cobre en Colombia son alta sulfuración a diferencia de la mayoría de los principales proyectos que se encuentran en producción en el mundo, que también contienen óxidos de cobre y sulfuros de cobre de baja sulfuración, que facilita la obtención de cobre refinado a través de procesos de lixiviación con ácido.
- En los últimos años en Colombia solo se han estructurado dos proyectos de gran minería, para obtener un concentrado polimetálico (con contenidos de cobre, oro y plata) Quebradona y Soto Norte hasta llegar a presentar los estudios de factibilidad técnica y ambiental, el trabajo y las investigaciones realizadas para elaborar dichos estudios tratando de cumplir con las exigencias de la legislación colombiana y los requerimientos de la comunidad tomaron alrededor de 15 años.
- El proyecto Quebradona diseñado para una operación de minería subterránea, para obtener un concentrado polimetálico, cuyo principal metal es el cobre, según estudio de factibilidad técnica es un proyecto que en el contexto mundial por los niveles de producción alcanzados sería de mediana producción (teniendo en cuenta proyectos de producción subterráneas y cielo abierto), pero considerando que a nivel mundial hay pocos proyectos de importancia por su nivel de producción que se realicen con minería subterránea para aprovechar depósitos polimetálicos, uno (1) en Rusia y dos (2) en Chile, alcanza niveles producción importantes en contexto mundial, ya que se estima que se extraerá 17,000 t/d de material mineralizado, sin embargo esta producción es muy inferior a la alcanzada por los grandes proyectos de producción subterránea de cobre ubicados en Chile (El Teniente y Chuquibambilla), los cuales producen de forma individual cerca 140,000 t/d de material mineralizado, estas minas son consideradas las más grandes en producción subterránea de mineral de cobre en el mundo.

- En el caso que sea otorgada la licencia ambiental al proyecto Quebradona y este entre en operación la producción de concentrado de cobre en el país se multiplicaría casi por 6, actualmente en Colombia solo hay un proyecto, El Roble, que produce concentrado polimetálico, cuyo principal metal es cobre y alcanza una producción de alrededor de 40,000 toneladas de concentrado al año.
- El proyecto Quebradona está diseñado para aplicar técnicas extractivas muy similares a las aplicadas en los grandes proyectos de minería subterránea Chuquicamata y El Teniente, los cuales en la última década han enfrentado un proceso de transformación y aplican tecnologías modernas de alta eficiencia, productividad y seguridad, esto implica para Colombia un cambio representativo en la explotación subterráneas de depósitos polimetálicos, ya que se estaría aplicando tecnología de punta cumpliendo con los más altos estándares internacionales en el aprovechamiento de este tipo de depósitos.
- Los estudios de factibilidad para el aprovechamiento de los depósitos polimetálicos muestran que estos traen importantes beneficios al mejoramiento de las zonas de influencia directa en lo relacionado con la infraestructura, mejoramiento de vías, redes eléctricas y telecomunicaciones.
- Desde el punto de vista económico es indudable la importancia de la inversión requerida para realizar este tipo proyectos, los estudios de factibilidad técnica y ambiental de los dos proyectos formulados en Colombia para producir concentrados polimetálicos estiman un inversión durante la vida de los proyectos cercana a los 8,500 millones de dólares, el empleo directo promedio generado anualmente en ambos proyectos esta alrededor de los 1,550, se estima que estos proyectos aportaran 61.5 millones de dólares de regalías por año y por impuesto de renta 284.1 millones de dólares, más los encadenamientos que se generan en las regiones productoras.

7. RECOMENDACIONES

- Colombia debe realizar mayores esfuerzos para definir la cantidad de recursos y reservas que tiene de mineral de cobre, lo cual se logra incrementando la exploración en el país, por lo tanto, desde el Estado se deben establecer procedimientos claros para el desarrollo de la exploración, mejorar la seguridad jurídica, agilizar los trámites y permisos requeridos para el desarrollo de la exploración, mayor coordinación interinstitucional, sensibilizar a la comunidad en general para que haya un mejor entendimiento de la actividad exploratoria y las posibles repercusiones de esta actividad en los territorios.
- El Estado colombiano debe continuar con el programa de mejoramiento de la infraestructura, en especial en el mejoramiento de las líneas férreas, ya que este es el medio de transporte ideal para los concentrados de cobre, en este sentido se debe priorizar el mejoramiento de la Red Férrea del Pacífico, con la que se busca conectar el centro del país con el puerto de Buenaventura, que según la ANI requiere un fuerte trabajo de rehabilitación. El mantenimiento de esta línea férrea es importante en vista de que el cinturón metalogénico que ha dado origen a importantes depósitos

polimetálicos a lo largo de la cordillera de los Andes se presenta en Colombia en la parte sur y centro occidente del país, por lo que se facilita la exportación del concentrado de cobre por el Pacífico. Para la rehabilitación de esta red férrea el Estado debe promover alianzas publico privadas, y la figura de obras por impuestos.

- El Estado debe promover la capacitación del recurso humano, en temas como exploración de depósitos polimetálicos, procesos de minería subterránea de grandes volúmenes (hundimiento de bloques), procesos de beneficio de polimetálicos, manejo de los estériles y depósito de colas del proceso de beneficio, para que el aprovechamiento de los depósitos polimetálicos sea una verdadera fuente de empleo estable y de calidad para los colombianos y especial en las zonas de influencia directa de los proyectos. El Estado debe facilitar a través de convenios, la participación de Chile en este proceso de formación, para aprovechar la experiencia y el conocimiento que este país tiene, con más de 100 años de estar aprovechando el mineral de cobre, logrando configurar una industria que ha llevado a Chile a ser el principal productor de cobre en el mundo.
- En el aprovechamiento de yacimientos polimetálicos uno de los temas que se le debe prestar atención especial es el manejo de las colas o relaves debido a las implicaciones que un mal manejo de estos residuos puede generar desde el punto de vista de seguridad y ambiental tanto en la etapa de operación como la de cierre, por tal motivo el Estado debe generar una reglamentación que permita una adecuada gestión de los depósitos de colas o relaves, para ello se debe revisar y buscar alianzas y convenios con el gobierno chileno para que asesore al país en estos temas, de esta forma aprovechar la amplia trayectoria de este país, en lo referente a la reglamentación en torno a la operación, seguridad, ambiental y procesos de cierre y abandono de los depósitos de colas, la que data desde principios de los años 70.

BIBLIOGRAFIA

- <http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/inter-cobre.aspx>
- <https://www.nextsmallcap.com/asx-junior-mining-powerhouse-partnership-gears-drill-mcarthur-basin/>
- Servicio Geológico Colombiano, (2012), Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado, tomado de: <http://servicios.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/8566.pdf>
- USGS Assessment of Undiscovered Copper Resources of the World, 2015, Scientific Investigations Report 2018–5160 Version 1.1, May 24, 2019.
- <http://aticominer.com/resources/technical-reports/Atico-technical-report-2018-final.pdf>
- LECHNER J. Michel, et al. Amended Updated Mineral Resource Estimate El Roble Copper-Gold Project, Chocó Department, Colombia
- <https://www.anglogoldashantocolombia.com/home/quebradona/>
- <http://www.anla.gov.co/proyectos-anla/proyectos-de-interes-en-evaluacion-soto-norte>
- <http://liberocopper.com/resources/reports/TechnicalReportMocoaCu-MoDepositColombia150618.pdf>
- NI 43-101 Technical Report and Resource Estimate, San Matías Copper-Gold-Silver Project, Colombia. 2019
- <http://www.construccionminera.cl/wp-content/uploads/2014/04/elteniente.pdf>.
- <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141058/Estandarizacion-del-proceso-planificacion-minera-del-presupuesto-revision-0-Division-El-Teniente-Codelco-Chile.pdf?sequence=1>
- http://repositorio.udec.cl/jspui/bitstream/11594/3592/4/Tesis_Nuevas_tecnologias_para_el_uso_y_disposicion_de_relaves.Image.Marked.pdf
- http://www.centromineria.pucv.cl/documentacion_pdf/Sr-Gonzalo-Lasagna-Proyecto-Mina-Chuquicamata-Subterr%C3%A1nea.pdf.
- <https://www.eltiempo.com/economia/empresas/explotacion-minera-en-jerico-pendiente-de-licencias-ambientales-540206>
- Fundación Chile, 2018. Avances y Retos para la Gestión de Depósitos de Relaves en Chile.
- Universidad de Chile, 2017. Estimación del Potencial de Captura de Valor en el Negocio Minero de División El Teniente por Efecto del Fracturamiento Hidráulico.
- Codelco, 2017. Ficha Técnica Nuevo Nivel Mina El Teniente.
- Universidad de Chile, 2014. Evaluación Técnica – Económica de Depósito de Relleno en el Rajo de la Mina Chuquicamata Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.
- https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe_caracterizacion_de_los_costos.pdf
-

Cu

