

Guía de Buenas Prácticas

para la exploración y estimación de
recursos y reservas de depósitos
polimetálicos



CCRR
Colombian Commission of
Mineral Resources and Reserves

GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA LA EXPLORACIÓN Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS DE DEPÓSITOS POLIMETÁLICOS-GBPDPM-

Agencia Nacional de Minería

Lina Beatriz Franco Idárraga
Presidenta

Jimmy Soto Díaz (E)
Vicepresidente de Seguimiento, Control y Seguridad Minera

Fabio Antonio Gutiérrez Camacho
Coordinador Grupo de Evaluación de Estudios Técnicos

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales - CCRR®

Mónica Saldarriaga Echeverri
Presidente

AUTORES

Angélica Castaño López
Camila Savine Luengas Burgos
Cesar Mauricio Vega Díaz
Jhon Carol Manosalva Barrera
Diana Patricia Buitrago Henao
Juan Felipe Pineda Martínez
Wilson Ferney Vélez Giraldo
Gina Paola Mejía López

APORTES TÉCNICOS

Peter Bergsneider Serrano
Jaime Alberto Niño Cárdenas
Óscar Felipe Rodríguez Novoa
Óscar Manuel Morales Marrugo

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las empresas ARIS MINING y RIO TINTO GROUP por facilitar las imágenes que acompañan la guía.



Bogotá, septiembre 20 de 2025



Lina Beatriz Franco Idárraga

Presidenta Agencia Nacional de Minería

En la geopolítica global, los minerales polimetálicos han cobrado especial relevancia por ser fundamentales para sectores como la tecnología y la transición energética. Gracias a su geología, Colombia ha sido favorecida con depósitos polimetálicos de alta calidad y diversidad, lo que la posiciona como un actor con gran potencial en la producción de estos recursos. Para traducir esta riqueza geológica en desarrollo sostenible y valor para las regiones, resulta indispensable contar con herramientas técnicas y normativas que orienten una planificación minera eficiente y responsable.

Es por esta razón que la Agencia Nacional de Minería, en conjunto con la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, se complace en presentar la Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Depósitos Polimetálicos.

Este documento representa una declaración de compromiso con los más altos estándares internacionales. Basado en los lineamientos del estándar CRIRSCO (Comité Internacional para el Reporte de Recursos y Reservas), establece un marco metodológico que abarca desde las primeras fases de exploración hasta la estimación de recursos y reservas, garantizando decisiones informadas, confiables y transparentes.

La guía integra aspectos técnicos, legales, ambientales, sociales y económicos. Su aplicación

busca promover la sostenibilidad ambiental, el respeto por las comunidades locales y el aprovechamiento responsable del recurso, en línea con los compromisos de Colombia frente al cambio climático y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, pilares fundamentales para una minería con propósito.

Asimismo, responde a los desafíos técnicos que plantea la explotación de depósitos polimetálicos, como la complejidad de su composición mineralógica y la variabilidad geológica. Su implementación favorece el uso de tecnologías avanzadas, mejora la eficiencia operativa y posiciona a Colombia como un destino confiable para la inversión, gracias a un marco normativo sólido y predecible.

Este documento evidencia el compromiso del Gobierno nacional, a través de la ANM, con una minería con propósito: una minería que moderniza el sector, respeta el ambiente, protege a las comunidades y contribuye al desarrollo del país.

La correcta aplicación de esta guía permitirá que los recursos polimetálicos se conviertan en un instrumento clave para la transición energética, la reindustrialización del país y el bienestar de nuestras regiones.



Mónica Saldarriaga Echeverri

Presidenta Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales - CCRR®

Desde su constitución en el año 2018, la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR® ha realizado grandes esfuerzos por promover las buenas prácticas en la industria minera colombiana mediante diferentes iniciativas, dentro de las cuales se destaca la elaboración y publicación de las Guías de Buenas Prácticas (GBP) para diferentes tipos de minerales, realizadas en conjunto y bajo el liderazgo de la Agencia Nacional de Minería (ANM).

Las GBP tienen como objetivo brindar a los profesionales del sector, herramientas sobre la mejor forma de desarrollar las actividades propias de las etapas de exploración y estimación de recursos y reservas minerales, teniendo en cuenta las particularidades que se pueden presentar en los diferentes minerales y tipos de depósitos. La aplicación de las GBP, en conjunto con la implementación del Estándar Colombiano para el Reporte de Resultados de Exploración,

Recursos y Reservas Minerales (ECRR®) en la elaboración de reportes técnicos, genera confianza y estandarización en la información geológico-minera, mejora el conocimiento sobre los recursos y las reservas minerales que contiene el país y atrae capital para el desarrollo y el crecimiento del sector.

Colombia es un país privilegiado desde el punto de vista geológico, lo que significa que cuenta con un gran potencial de recursos minerales, especialmente metálicos. Los minerales polimetálicos tienen gran importancia en diferentes industrias y en la economía mundial y más en la actualidad dado su criticidad en la transición energética; por todo lo anterior, es con gran orgullo que se presenta esta Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Depósitos Polimetálicos (GBPDPM).

Tabla de Contenido

1.Introducción	11
2.Contexto de los Depósitos Polimetálicos en Colombia	12
3.Exploración	18
3.1.FASE 1: Planificación y Revisión Inicial.....	19
3.1.1.Recopilación y revisión de la información geológica existente.....	19
3.1.2.Definición del sistema de coordenadas y base cartográfica en la exploración minera.....	21
3.1.3.Planeación y Diseño del Programa de Exploración.....	22
3.1.4. Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (QA/QC).....	23
3.1.5.Aspectos legales y tenencia de la propiedad minera	24
3.2.FASE 2: Exploración Superficial	26
3.2.1.Cartografía geológica de superficie.....	27
3.2.2.Exploración geoquímica.....	28
3.2.3.Exploración geofísica	35
3.3.FASE 3: Exploración del Subsuelo	40
3.3.1.Planificación y Diseño del Programa de Perforación	40
3.3.2.Perforación Exploratoria y Control de Calidad (QA/QC).....	41
3.3.3.Ensayos Geoquímicos y Geofísicos.....	54
3.3.4.Bases de datos.....	58
3.3.5.Estudio geotécnico.....	59
3.3.6.Estudio Hidrológico	62
3.3.7.Estudio hidrogeológico.....	63
3.4.FASE 4: Modelos y Estimación de Recursos Minerales.....	67
3.4.1.Interpretación y modelamiento geológico.....	67

Tabla de Contenido

3.4.2.Dominios de estimación.....	68
3.4.3.Análisis exploratorio de datos	70
3.4.4.Valores atípicos	71
3.4.5.Técnicas y métodos de estimación	73
3.4.6.Categorización de Recursos Minerales.....	77
3.4.7.Declaración de recursos minerales	79
3.4.8.Revisión Por Pares	80
3.5.Aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en la Estimación de Recursos y Reservas Minerales	82
4.Factores Modificadores.....	84
4.1.Factores Técnicos.....	86
4.1.1.Factores Geológicos	86
4.1.2.Factor Geometalurgia	87
4.1.3.Factores Mineros	96
4.1.4.Factor modificador metalúrgico de beneficio	106
4.1.5.Factor modificador infraestructura	109
4.2.Factor modificador ambiental.....	110
4.2.1.Plan de cierre y abandono	110
4.3.Factor modificador social.....	112
4.4.Factor modificador legal y gubernamental	113
4.5.Factor modificador de mercado.....	114
4.6.Factor modificador económico.....	115
4.6.1.Tenor de corte (cut- off).....	115
4.6.2.Insumos para estimar el tenor de corte (cut- off)	117

Tabla de Contenido

4.6.3. Metales equivalentes y retorno neto de la fundición (NSR)	119
4.6.4. Análisis de sensibilidad	121
5. Estimación de Reservas Minerales.....	122
5.1. Proceso de estimación.....	122
5.2. Categorización	125
5.3. Validación	126
5.4. Evaluación de riesgos del proyecto	126
5.5. Revisiones hechas por pares.....	127
5.6. Documentación.....	127
5.7. Declaraciones de Reservas Minerales	128
5.8. Discusión de la confianza relativa	129
5.9. Reconciliación.....	129
6. Presentación de Informes	131
7. Bibliografía.....	134

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático que muestra las etapas en la evolución de un margen convergente y los depósitos minerales asociados: (A) subducción, (B) orogénesis y (C) extensión post-subducción.....	13
Figura 2. Clases de depósitos polimetálicos de Colombia	17
Figura 3. Exploración y descripción de afloramientos de rocas	20
Figura 4. Reconocimiento e identificación en campo de los objetivos de exploración	28
Figura 5. Muestra de roca.....	34
Figura 6. Descripción en núcleos de perforación.....	48
Figura 7. Testigo de perforación mineralizado.....	51
Figura 9. Ejemplo de la medición de la recuperación de la muestra en el núcleo de perforación.....	52
Figura 10. Marcado lateral y superior de las cajas de núcleo.....	53
Figura 11. Núcleo orientado preparado para ser muestreado.....	54
Figura 12. Método de perfiles	68
Figura 13. Ejemplo de Histograma antes y después de análisis estadístico de dominios.....	69
Figura 14. Dominios de estimación - Vetas y Cuerpos Mineralizados	70
Figura 15. Ejemplo de Capping para Cu_ppm.....	72
Figura 16. Método clásico - perfiles.....	73
Figura 17. Método clásico - Polígonos de Voronoi	74
Figura 18. Método clásico - Polígonos de Voronoi	74
Figura 19. Método clásico - isolíneas	75
Figura 20. Relación general entre los Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas Minerales	77
Figura 21. Clasificación de recursos en función del rango o alcance del variograma.....	78
Figura 22. Evolución de la inteligencia artificial.....	83
Figura 23. Factores Modificadores comunes en proyectos de depósitos polimetálicos.	84
Figura 24. Pasos recomendados para la definición de las opciones de procesamiento de cualquier depósito mineral	88
Figura 25. Parámetros geometalúrgicos claves.....	89
Figura 26. Pasos de un programa geometalúrgico.....	90

Tabla de Figuras

Figura 27. . Ejemplo de modelo de bloques geometalúrgico	93
Figura 28. . Ejemplo paso de dominios geológicos a dominios geometalúrgicos.....	93
Figura 29. Paso de dominios geológicos a dominios geometalúrgicos en un depósito mineral .	94
Figura 30. Ejemplo de modelo de composición química del mineral vs recuperación en proceso.	94
Figura 31. Pit Shell de Recursos y Reservas	97
Figura 32. Mina de Palabora	99
Figura 33. Método de cámaras y pilares.....	100
Figura 34. Método de corte y relleno.....	101
Figura 35. Método de hundimiento por subniveles (Sublevel Caving).	102
Figura 36. Método de Sublevel Open Stopping (SLOS).....	103
Figura 37. Diferenciación entre dilución planificada y dilución no planificada	105
Figura 38. Proceso de reconciliación.....	130

Lista de Tablas

Tabla 1.Principales métodos geofísicos empleados en exploración de depósitos polimetálicos.	36
Tabla 2.Diámetros de perforación.....	42
Tabla 3.Registros eléctricos empleados en exploración de depósitos polimetálicos.....	57
Tabla 4.Consideraciones al momento de definir las leyes o valores de corte dentro de las estimaciones de recursos minerales	79
Tabla 5.Ejemplo de Unidades Geológicas en un modelo de bloques.	91
Tabla 6.Ejemplos de ensayos de proceso	92
Tabla 7.Resumen de los costos de explotación habituales en el cálculo de tenor de corte (cut- off).....	118
Tabla 8.Resumen de los costos de explotación habituales en el cálculo de tenor de corte (cut- off).....	121

1. Introducción

La Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Depósitos Polimetálicos, desarrollada por la Agencia Nacional de Minería (ANM) y la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR®), representa un referente técnico y normativo para la industria minera en Colombia. Elaborada por profesionales expertos en recursos y reservas minerales, esta guía ofrece un conjunto de directrices precisas y fundamentadas que abordan desde la fase inicial de prospección hasta la estimación de reservas minerales, en alineación con los estándares internacionales reconocidos por CRIRSCO y ajustándose a la particular geología de los depósitos polimetálicos en el país. Este esfuerzo colaborativo refuerza el desarrollo minero nacional, brindando una base sólida de buenas prácticas, sostenibilidad y ética en cada proceso.

Estructurada de forma secuencial, la guía primero detalla el contexto geológico de los yacimientos polimetálicos en Colombia, proporcionando una visión profunda sobre su formación, características y distribución regional. A partir de ahí, abarca cada fase esencial de la exploración: desde la planificación cuidadosa y la investigación en superficie y subsuelo, hasta el modelado geológico y la precisa estimación de los recursos minerales. Cada sección incorpora no solo recomendaciones técnicas, sino también consideraciones ambientales y sociales, reafirmando el compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad social, elementos indispensables para el desarrollo balanceado del sector.

Entre sus puntos clave, se encuentra la inclusión de Factores Modificadores (FM) que abarcan aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales y legales. Estos

factores son cruciales para que la categorización de recursos y reservas sea no solo geológicamente válida, sino también económicamente viable y operativamente factible. Con este enfoque integral, se garantiza que los proyectos mineros se fundamenten en una evaluación completa y cuidadosa, reduciendo riesgos e incrementando la confiabilidad de las decisiones estratégicas. En el contexto de la transición energética global, los depósitos polimetálicos adquieren una relevancia especial, y esta guía facilita su explotación de manera responsable y competitiva.

Así, la guía se posiciona como una herramienta indispensable para elevar los estándares de calidad en la minería colombiana, orientando a los profesionales hacia prácticas coherentes y efectivas. La adopción de sus lineamientos no solo mejora la precisión y la calidad técnica de los proyectos, sino que fortalece la capacidad del sector para atraer inversiones, consolidándose como un actor confiable y sostenible en el mercado global. De esta forma, la guía no solo optimiza el proceso minero, sino que también enriquece el conocimiento técnico, impulsando la competitividad y asegurando un desarrollo que respete tanto el entorno como la sociedad.

“Una buena práctica no es tan sólo una práctica que se define buena en sí misma, sino que es una práctica que se ha demostrado que funciona bien y produce buenos resultados, y, por lo tanto, se recomienda como modelo. Se trata de una experiencia exitosa, que ha sido probada y validada, en un sentido amplio, que se ha repetido y que merece ser compartida con el fin de ser adoptada por el mayor número posible de personas”. FAO, (2013)

2. Contexto de los Depósitos Polimetálicos en Colombia

Colombia, ubicada en la esquina noroccidental de Sudamérica, es un país con un alto potencial minero debido a su compleja historia geológica. La convergencia de varias placas tectónicas ha generado una diversidad de ambientes geológicos, favoreciendo la formación de diversos yacimientos minerales. La tectónica de placas, a partir de la interacción entre la Placa Sudamericana, la Placa de Nazca y la Placa del Caribe, ha modelado tanto el relieve como la distribución de minerales en el país.

La tectónica de placas es un fenómeno geológico fundamental que permite comprender tanto la disposición de la corteza terrestre como su dinámica. En el caso de Colombia, el análisis de los movimientos tectónicos es crucial para entender la geografía y, en particular, la distribución de recursos minerales. Los minerales metálicos, que son vitales para la industria y la economía del país, están intrínsecamente ligados a estos procesos. La actividad magmática relacionada con la subducción de la Placa de Nazca, por ejemplo, es un factor determinante en la liberación de fluidos magmáticos-hidrotermales. Estos fluidos, al interactuar con diferentes tipos de rocas - ígneas, metamórficas y sedimentarias - pueden dar lugar a la formación de depósitos minerales significativos.

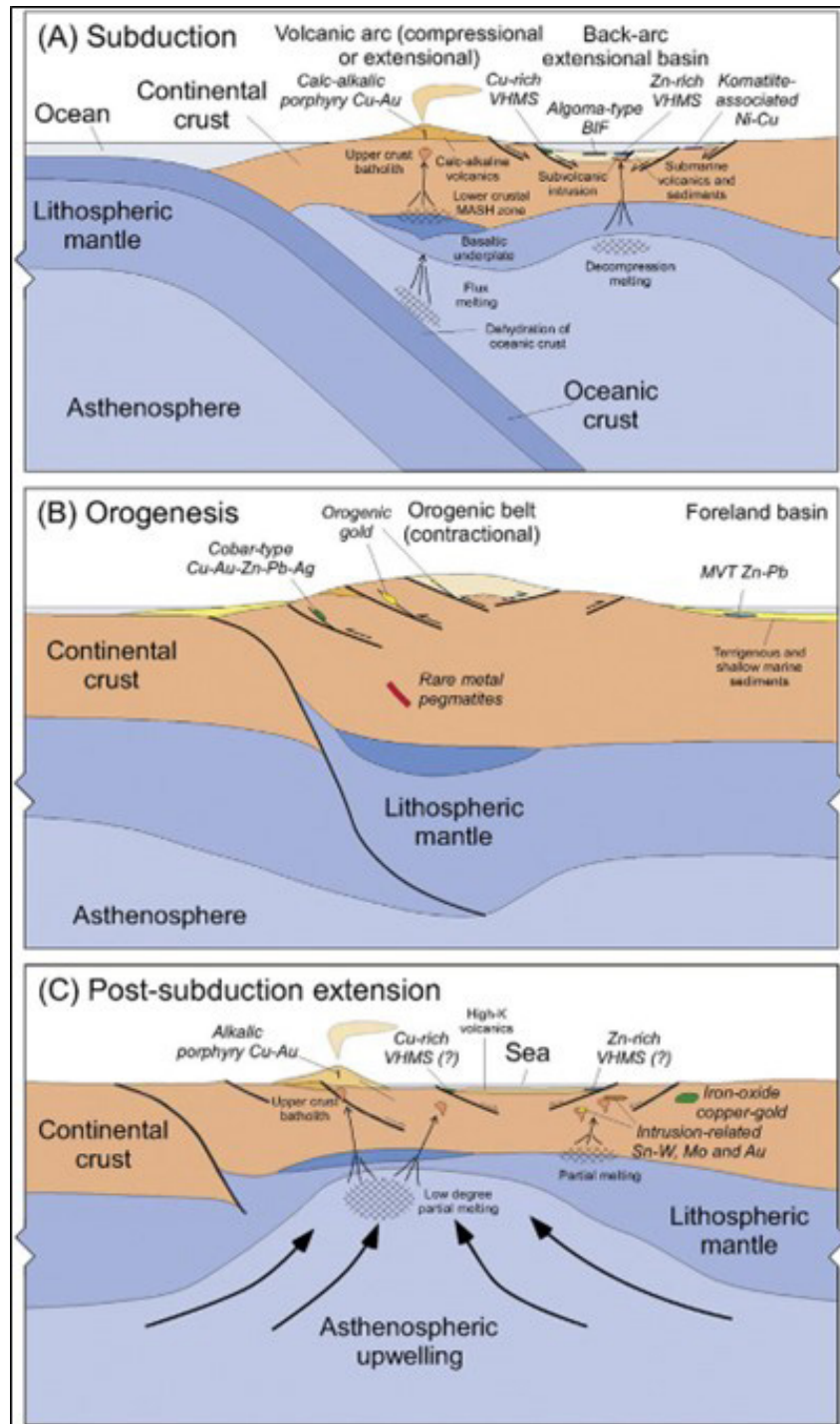
Esta relación entre tectónica y mineralización puede analizarse a través del ciclo orogénico, donde distintos procesos geodinámicos han dado origen a variados tipos de depósitos minerales en el territorio colombiano. En la Figura 1 se muestra la evolución de los ambientes tectónicos y su relación con la formación de depósitos minerales a lo largo de este ciclo. En la etapa de subducción, la deshidratación de la corteza oceánica subducida genera fusión parcial del manto suprayacente, dando lugar a arcos volcánicos con magmatismo calco-alcalino. Este entorno favorece la formación de depósitos de pórfidos de Cu-Au en los batolitos de la corte-

za superior y depósitos de sulfuros masivos volcánicos (VHMS) ricos en Cu y Zn en cuencas extensionales de retroarco. Además, las intrusiones subvolcánicas y los procesos de fusión por descompresión pueden dar origen a yacimientos de Ni-Cu asociados a komatitas y a depósitos de hierro de tipo Algoma-BIF.

Durante la orogénesis, el cierre de los océanos y la colisión continental generan cinturones orogénicos con intensa deformación y metamorfismo, dando lugar a depósitos de oro orogénico y mineralización tipo Cobar (Cu-Au-Zn-Pb-Ag) en zonas de cizalla profundas. Además, en los márgenes de las cuencas de antepaís pueden encontrarse depósitos sedimentarios de Zn-Pb tipo MVT. Finalmente, en la etapa de extensión post-subducción, el adelgazamiento litosférico y el ascenso de material astenosférico inducen una fusión parcial, generando magmatismo alcalino y calco-alcalino con depósitos de pórfidos de Cu-Au, intrusiones relacionadas con depósitos de Sn-W, Mo y Au, así como mineralizaciones de tipo hierro-óxido cobre-oro (IOCG).

Además, a lo largo de estos procesos tectónicos, la reactivación de fallas profundas y la migración de fluidos hidrotermales han desempeñado un papel clave en la concentración de minerales en diferentes niveles de la corteza. Estos fluidos, enriquecidos en metales, pueden movilizarse a través de fracturas y zonas de debilidad estructural, facilitando la precipitación de minerales en condiciones favorables de presión y temperatura. Así, se generan depósitos de vetas de oro y plata en sistemas epitermales, así como mineralizaciones de tierras raras en ambientes relacionados con magmatismo alcalino. La interacción entre estos procesos geológicos evidencia cómo la evolución tectónica no solo ha dado forma al relieve colombiano, sino que también ha determinado la ubicación y la riqueza de sus recursos minerales.

Figura 1. Diagrama esquemático que muestra las etapas en la evolución de un margen convergente y los depósitos minerales asociados: (A) subducción, (B) orogénesis y (C) extensión post-subducción.



Fuente: Tomado de Huston et al, 2016.

Particularmente en las regiones montañosas de Colombia, estos procesos han favorecido la formación de importantes depósitos de Au, Ag y Cu, que son representativos de la rica diversidad mineral del país. Estas áreas, marcadas por su compleja geología, se convierten en foco de exploración minera, ofreciendo oportunidades económicas y desarrollo industrial. La comprensión de la relación entre la tectónica de placas y la formación de yacimientos minerales no solo es esencial para la minería, sino que también proporciona un contexto geológico que puede guiar futuras investigaciones y prácticas sostenibles en la explotación de recursos naturales. De este modo, la geología colombiana y sus procesos tectónicos son pilares fundamentales en el desarrollo de la minería y en la economía del país.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha venido generado y actualizado el Mapa Metalogénico de Colombia, con el cual pretende mostrar la distribución geográfica y geológica de los recursos minerales del país. Este mapa proporciona una visión integral sobre las áreas con potencial mineral, clasifica y describe diferentes tipos de depósitos minerales, lo que permite a las empresas mineras e inversionistas identificar regiones específicas donde concentrar sus esfuerzos de exploración. Esta información es crucial para minimizar riesgos económicos en el sector y optimizar recursos en búsqueda de minerales estratégicos

Los recursos minerales en Colombia se agrupan según su proceso genético y contexto geológico. Entre las categorías principales se encuentran los minerales metálicos, donde se incluyen minerales preciosos como Au y Ag, así como metales base como el Cu, el Pb y el Zn. La clasificación de depósitos polimetálicos según el mapa metalogénico del SGC (López *et al* 2018) se basa en características geológicas y mineralógicas específicas, como se observa en la Figura 2. A continuación, se presenta una descripción general de las principales categorías:

1. Depósitos asociados con magmatismo.

Depósitos tipo pórfido: los depósitos tipo pórfido son uno de los tipos de yacimientos minerales más importantes a nivel mundial, especialmente por su asociación con metales como Cu, Au, molibdeno y otros elementos. Se forman a partir de la cristalización de grandes cuerpos intrusivos ígneos (pórfidos) y la posterior alteración hidrotermal de las rocas circundantes. Estos depósitos incluyen pórfidos calcoalcalinos de Au (As), Au, Cu (Ag-Zn-Mo), Cu-Au, Cu, Cu-Mo, Cu-Mo-Au, Mo-Cu, y pórfidos sin clasificar de Au y

Cu. En Colombia los principales depósitos están en: Acandí (Chocó), Murindó (Antioquia), Pantanos-Pegadorcito (Antioquia), Andágueda(Chocó), Piedrancha (Nariño), Andes (Tolima), Infierno-Chili (Tolima), Dolores (Tolima), Mocoa (Putumayo), La Colosa (Tolima), Quebradona (Antioquia), El Piso (Cauca), Piedrasentada-Dominical y Mazamorra (Nariño).

2. Otros depósitos asociados a intrusivos: estos depósitos incluyen mineralizaciones de Au, Mo, Cu, Ag, Nb, W, Ti, y fluorita. En esta categoría se encuentra clasificado el depósito IOCG (“Iron Oxide-Copper-Gold”).

Depósitos Óxidos de Fe, Cu y Au - IOGC: son un tipo de yacimiento mineral caracterizado por la presencia de óxidos de Fe, Cu, Au y, a menudo, otros elementos como U y tierras raras. Estos depósitos se forman en ambientes geológicos complejos, asociados a procesos magmáticos y tectónicos. La formación de estos depósitos involucra fuentes fluidas como magmas, aguas meteóricas y marinas, estos fluidos hidrotermales son transportados a altas presiones y temperaturas. Algunos de los yacimientos IOCG más grandes del mundo se encuentran en Australia, Chile y Brasil. En Colombia el único yacimiento de este tipo reportado es el proyecto Alacrán (Córdoba).

3. Depósitos epitermales: incluyen depósitos epitermales de baja, intermedia y alta sulfuración con Au (Ag-Cu-Pb- Zn-Mo-As-Sb), Hg, y sin clasificar de Au, Hg, Cu, Sb (Zn-Cu-Pb-Fe).

Alta sulfuración: los depósitos de Au-Ag-Cu de alta sulfuración tienen una gran importancia económica debido a su contenido de metales preciosos y base, se encuentran principalmente en venas, vetillas y brechas emplazadas en rocas metamórficas e ígneas, con forma tabular relleno de fracturas. En Colombia estos depósitos se localizan en Gilgal – Unguía (Chocó) y Angostura – Vetas, California en el departamento de Santander.

Intermedia sulfuración: caracterizado por una mineralización compleja en la que predominan los sulfuros de Ag, Pb y Au, y una alteración hidrotermal de intensidad intermedia. Son principalmente venas, vetillas y brechas emplazadas en rocas metamórficas e ígneas, con forma tabular relleno de fracturas. En Colombia estos depósitos se localizan en Echandía (Caldas), Buriticá (Antioquia) y Suárez (Cauca).

Baja sulfuración: son un tipo de yacimiento mineral formado a partir de fluidos hidrotermales relativamente fríos y de baja salinidad (Au-Ag). Son principalmente venas, vetillas y brechas emplazadas en rocas metamórficas e ígneas, con forma tabular rellenando fracturas. En Colombia estos depósitos se localizan en Jerez (Bolívar), El Zancudo (Antioquia), Marmato (Caldas) y El Cafetal (Antioquia).

4. Depósitos Volcanogénicos: son depósitos volcanogénicos tipo Chipre, Beshi y Kuroko (Cu y yeso), y sin clasificar de Au y Cu.

Tipo Chipre: son una fuente importante de Cu y, en menor medida, Zn y otros metales base. Estos yacimientos se caracterizan por la formación de concentraciones masivas, de forma podiforme (lenticular) y estratoligada, compuestas principalmente por sulfuros, como calcopirita y piritita. Están emplazados en sucesiones volcanosedimentarias de origen oceánico y están típicamente asociados con basaltos toleíticos y lavas almohadilladas formadas en ambientes de dorsal oceánica o cuencas de trasarco. Este ambiente de formación está relacionado con procesos hidrotermales activos en el fondo del océano, donde los fluidos ricos en metales se precipitan al enfriarse en contacto con el agua de mar. En Colombia estos depósitos se localizan en El Carmen de Atrato en el proyecto El Roble (Chocó).

Tipo Kuroko: son un tipo distintivo de yacimiento mineral que se forman en ambientes marinos asociados a la actividad volcánica submarina, pero su particularidad radica en su relación con rocas volcánicas intermedias a félsicas, como andesitas, dacitas y riolitas. Se caracterizan por la presencia de sulfuros masivos compuestos por Cu, Zn, Pb, así como cantidades significativas de metales preciosos como Au y Ag. A diferencia de los depósitos tipo Chipre, los Kuroko están relacionados con ambientes tectónicos más complejos, como cuencas de arco volcánico, donde la interacción entre procesos volcánicos y sedimentarios favorece una mineralización más diversa. El término “Kuroko” proviene de Japón, donde estos depósitos fueron descritos originalmente. En Colombia estos depósitos se localizan en Anzá (Antioquia) en el proyecto La Pastorera-Aragón II (Antioquia).

Tipo Beshi: se forman en ambientes marinos asociados a la actividad volcánica submarina, pero tienen una fuerte relación con rocas volcánicas máficas, como basaltos y gabros. Al igual que los depósitos Chipre, están asocia-

dos con sucesiones volcanosedimentarias de origen oceánico, en particular con lavas almohadilladas. Sin embargo, se diferencian en su composición mineralógica, ya que los depósitos Beshi se caracterizan por sulfuros masivos ricos en Cu, Fe y Zn, con una presencia significativa de pirrotita y esfalerita. El término “Beshi” proviene de la localidad tipo en Japón, donde estos depósitos fueron descritos inicialmente. En Colombia estos depósitos se localizan Guadalupe – Santa Elena – Azufral.

5. Depósitos tipo Skarn: son depósitos formados por la interacción de rocas carbonatadas (como calizas o dolomitas) con intrusiones ígneas. Esta interacción genera una serie de reacciones químicas que producen minerales metálicos valiosos, como Fe, Cu, Zn, Pb, tungsteno y molibdeno. La formación de este tipo de depósitos implica varios procesos:

- Intrusión ígnea: un magma caliente se intruye en rocas carbonatadas, liberando fluidos hidrotermales ricos en metales.
- Metamorfismo de contacto: el calor del magma transforma la roca carbonatada en una roca metamórfica llamada skarn.
- Depositación de minerales: los fluidos hidrotermales reaccionan con la roca skarn, depositando minerales metálicos en zonas de alta permeabilidad.

En Colombia estos depósitos incluyen mármol y mineralizaciones de Cu-Au-Ag (Zn-Pb-Fe-Mo-W).

6. Depósitos orogénicos: estos depósitos incluyen mineralizaciones de Au, Ag y Cu.

Orogénico ofiolítico: son un tipo de yacimiento mineral donde el Au se encuentra asociado a zonas de deformación intensa, típicamente en cinturones orogénicos o montañas formadas por la colisión de placas tectónicas. Estos depósitos se caracterizan por:

- Mineralización diseminada: el Au se encuentra finamente diseminado en cuarzo y otros minerales, a lo largo de vetas, venillas y zonas de cizalla.
- Alteración hidrotermal: se asocian a una alteración hidrotermal característica, con minerales como cuarzo, sericita y carbonatos.

- **Control estructural:** la mineralización está estrechamente controlada por estructuras tectónicas, como fallas y zonas de cizalla.

Se presenta como Au nativo en venas masivas de cuarzo encajadas en rocas ígneas y sedimentarias de sucesiones ofiolíticas. En Colombia se encuentra en el proyecto El Retiro (Valle del Cauca).

Orogénico vetas: son uno de los tipos de yacimientos auríferos más conocidos y explotados a lo largo de la historia. Estos depósitos se caracterizan por la presencia de Au nativo y otros minerales asociados, alojados dentro de fracturas o fisuras en las rocas, formando lo que se conoce como vetas. Se presenta como Au nativo en venas masivas de cuarzo encajadas en rocas ígneas y metamórficas. En Colombia se encuentra en el proyecto Cueva Loca (Valle del Cauca).

7. Depósitos epigenéticos hospedados en sedimentos: son aquellos en los que la mineralización de interés (como Au, Cu, Zn, Pb, etc.) se ha formado posteriormente a la depositación de los sedimentos que los albergan. Es decir, los minerales valiosos no estaban presentes en los sedimentos originales, sino que fueron introducidos más tarde por fluidos mineralizantes que circularon a través de las rocas sedimentarias, estos depósitos incluyen mineralizaciones de Cu y Pb, y tipo *Mississippi Valley* (Zn).

8. Depósitos estratoligados hospedados en sedimentos: los depósitos estratoligados son de gran importancia económica, ya que albergan una variedad de metales base y preciosos. Estos depósitos son una fuente importante de Cu, Zn, Pb y U.

9. Depósitos de tipo residual oxidado: son yacimientos minerales que se forman a partir de la meteorización y alteración de rocas preexistentes, ricas en minerales metá-

licos, estos depósitos incluyen concentraciones de Ni y Al en lateritas.

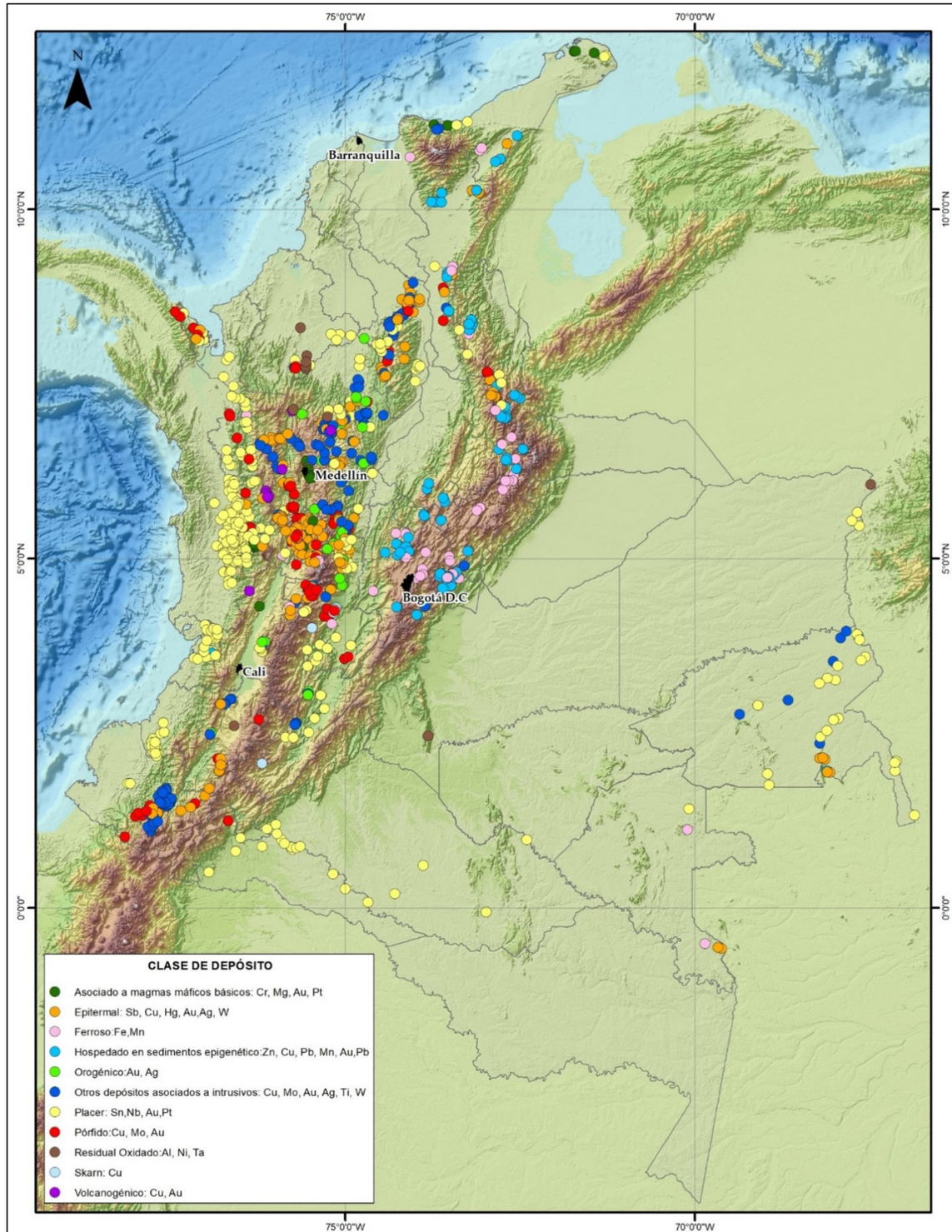
10. Níquel en lateritas: lateritas con minerales de Ni desarrolladas a partir de rocas ultramáficas (dunitas y peridotitas) meteorizadas. En Colombia el ejemplo de este depósito se encuentra en Cerro Matoso (Córdoba), Magambo (Córdoba) y Morro Pelón (Antioquia).

11. Depósitos de Uranio: estos depósitos incluyen acumulación de U. En Colombia, este tipo de depósito se encuentra en San José del Guaviare (Guaviare) y en Samaná (Caldas).

12. Depósitos de placer – paleoplacer aluvial: son yacimientos minerales formados por la concentración natural de partículas como Au, Pt, entre otros, en sedimentos sueltos. Estos depósitos se originan a partir de la erosión de rocas que contienen estos minerales, seguidos de su transporte y concentración por agentes como el agua (ríos, corrientes), el viento o el hielo. En Colombia estos depósitos incluyen concentraciones de Au, Pt y Ti. Se encuentran distribuidos por los ríos San Juan, Atrato, Dagua, Iró, Sipi, Condoto, (Chocó), Río Cauca (Bolívar, Antioquia, Caldas, Risaralda y Valle del Cauca), caño Chaquita y Río Naquen, caño Bocón (Guanía), río Anchicayá (Valle del Cauca), río Buriticá (Magdalena), río Nechí (Antioquia), entre otros.

La influencia de la actividad tectónica del país en la formación de yacimientos minerales no solo es importante desde una perspectiva geológica, sino también económica. La minería ha sido históricamente un pilar fundamental de la economía colombiana, con grandes inversiones nacionales y extranjeras en la exploración y extracción de estos recursos. Sin embargo, esta riqueza mineral también plantea desafíos significativos, incluidos problemas ambientales y sociales que deben ser cuidadosamente gestionados.

Figura 2. Clases de depósitos polimetálicos de Colombia



Fuente: Modificado de López et al., 2018.

3. Exploración

La exploración minera es un proceso crucial para identificar y evaluar la presencia de recursos minerales en una región determinada. Este proceso es especialmente relevante en los depósitos polimetálicos, que contienen una combinación de metales como Au, Cu, Pb, Zn, Ag, Sn, W, entre otros. La exploración de estos depósitos sigue un enfoque sistemático que implica la recolección de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos de alta precisión. Cada fase de la exploración está orientada hacia un objetivo específico, comenzando con la planificación y recopilación de información existente, y culminando con la definición del depósito y la evaluación de su viabilidad económica. Un enfoque estructurado y progresivo es clave para reducir la incertidumbre geológica y minimizar los riesgos técnicos y financieros asociados al proyecto.

El proceso de exploración mineral se divide generalmente en cuatro (4) fases principales: Fase 1: Planificación y Revisión Inicial; Fase 2: Exploración Superficial; Fase 3: Exploración del Subsuelo y Fase 4: Modelos y Estimación de Recursos Minerales. Cada fase se apoya en los resultados obtenidos en la anterior, permitiendo una comprensión más detallada y profunda del depósito mineral. Desde la planificación inicial, que se centra en la revisión de datos geológicos previos, hasta la perforación profunda y los estudios detallados, el objetivo final es desarrollar un modelo geológico robusto que cuantifique con precisión los recursos minerales. Este enfoque permite una toma de decisiones informada en cada etapa del proceso, asegurando que las actividades exploratorias se basen en datos confiables y optimizando el uso de recursos financieros y técnicos, lo que aumenta la probabilidad de éxito del proyecto.

3.1. FASE 1: Planificación y Revisión Inicial

La primera fase es un paso fundamental en el proceso de exploración minera, ya que establece las bases estratégicas y operativas necesarias para el desarrollo exitoso de un programa de exploración polimetálica. Durante esta fase, se lleva a cabo la recopilación y revisión de la información geológica existente, lo que implica analizar informes técnicos, mapas geológicos, imágenes de sensores remotos y datos geoquímicos y geofísicos. Este análisis detallado permite identificar vacíos en la información y priorizar áreas para estudios adicionales, creando así una línea base de exploración que sirve como referencia clave para las fases posteriores del programa. Además, la definición del sistema de coordenadas y la base cartográfica son cruciales, ya que garantizan la coherencia y precisión en la representación geoespacial de los datos, facilitando la integración y el análisis posterior de la información (CIM, 2018).

Un componente crítico que debe ser implementado desde esta fase es el programa de Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (QA/QC). Este programa es esencial para garantizar que los datos recolectados sean precisos y confiables, minimizando así los riesgos asociados a las incertidumbres geológicas y asegurando que las decisiones tomadas en las fases posteriores se basen en información de alta calidad. Además, la obtención de permisos legales y ambientales es un paso indispensable antes de iniciar cualquier actividad de campo. Esta gestión no solo asegura el cumplimiento normativo, sino que también establece relaciones constructivas con las comunidades locales, lo que es fundamental para facilitar el acceso al área de exploración. La meticulosidad en estas etapas iniciales es crucial, ya que el éxito de las fases posteriores

dependerá en gran medida de la calidad de la información y la planificación realizada en la Fase 1 (Haldar, 2018; Edwards & Atkinson, 1986).

3.1.1. Recopilación y revisión de la información geológica existente

La fase inicial de todo programa de exploración minera requiere una revisión exhaustiva y la recopilación de la información geológica disponible del área de interés. Esta etapa es fundamental, ya que sienta las bases para las fases de exploración en campo. Durante esta fase, se recopilan diversos datos, como informes técnicos, mapas geológicos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, datos geoquímicos y geofísicos. Las fuentes de información son variadas, incluyendo el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), publicaciones académicas y registros históricos de exploraciones previas. El objetivo principal de esta etapa es construir una base de conocimiento sólida que permita una toma de decisiones durante el proceso de exploración. (Edwards & Atkinson, 1986; Marjoribanks, 2010).

Un aspecto crucial de esta recopilación de datos es la evaluación crítica de la cobertura y calidad de los estudios existentes. Esta evaluación permite identificar vacíos en la información y áreas donde los datos pueden ser incompletos o desactualizados. Al analizar detalladamente la información disponible, se pueden definir áreas prioritarias para nuevos estudios y establecer una línea base de explora-

ción. Esta línea base se convierte en un referente clave para comparar y validar los datos obtenidos en actividades futuras. Además, ayuda a mitigar riesgos relacionados con la incertidumbre y heterogeneidad geológica y optimizar la estrategia de exploración, maximizando así la eficiencia en el uso de recursos (Moon et al., 2006; CIM, 2018).

La línea base de exploración es un componente esencial en la planificación de cualquier programa de exploración. Establecer esta línea base implica realizar un análisis detallado de la relación entre costos, beneficios y tiempos de ejecución para todas las actividades de exploración a llevar a cabo. Este enfoque permite a las compañías definir un marco claro que guiará las decisiones a lo largo del proceso exploratorio, asegurando que cada fase esté respaldada por información precisa y actualizada (Edwards & Atkinson, 1986; Haldar, 2018).

Dentro de este contexto, es importante considerar las diversas técnicas de exploración que se emplearán. Por ejemplo, los programas de muestreo de sedimentos se utilizan para identificar y validar anomalías geoquímicas, ofreciendo la ventaja de cubrir grandes extensiones de área de manera eficiente y proporcionando resultados confiables en campo. La elaboración de una cartografía geológica detallada, a nivel de superficie y de carácter local, es esencial para describir

estructuras, alteraciones hidrotermales y mineralizaciones, y debe actualizarse a medida que avanza la exploración. Asimismo, es prioridad realizar un levantamiento de una base topográfica consistente y detallada, que resalte todos los detalles y aspectos geomorfológicos del área de interés. Una vez consolidada la información geológica y cartográfica, el siguiente paso es llevar a cabo un análisis preliminar del área de interés. Este análisis tiene como objetivo identificar las zonas con mayor potencial para contener mineralizaciones económicas, lo que es esencial en la exploración de minerales polimetálicos (ver Figura 3). La atención debe centrarse en la evaluación de estructuras geológicas, como fallas, pliegues y contactos litológicos, así como en las zonas de alteración hidrotermal que puedan estar asociadas a la mineralización (Haldar, 2018).

Además, se deben revisar los datos geoquímicos y geofísicos disponibles en la región para identificar anomalías que justifiquen una exploración más detallada. Las anomalías observadas, combinadas con el análisis estructural, permitirán priorizar las áreas de interés y asegurar que los recursos se utilicen de manera eficiente en las fases posteriores del programa. Este enfoque dirigido es vital, ya que define los objetivos específicos del programa de exploración, permitiendo que las actividades se concentren en las zonas que presentan las mejores perspectivas geológicas.

Figura 3. Exploración y descripción de afloramientos de rocas



Fuente: Cortesía Aris Mining Corp.

3.1.2. Definición del sistema de coordenadas y base cartográfica en la exploración minera

En el contexto de un programa de exploración minera avanzado, la definición precisa del sistema de coordenadas y la elaboración de una base cartográfica detallada constituyen un paso crucial para asegurar la integridad y coherencia espacial de los datos geológicos y topográficos a lo largo de todas las fases del proyecto. La correcta georreferenciación no solo facilita la integración y análisis de datos, sino que también garantiza que los productos técnicos, como mapas, perfiles geológicos y modelos tridimensionales, estén alineados de manera consistente y precisa, lo que es esencial para la toma de decisiones fundamentadas en todas las etapas de la exploración.

► Importancia de la georreferenciación y el sistema de coordenadas

En los proyectos de exploración de depósitos minerales en Colombia, la definición del sistema de coordenadas es fundamental para asegurar la precisión y coherencia de los datos geológicos, geoquímicos, geofísicos y estructurales. Actualmente, se utiliza el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, basado en el Marco de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). Este sistema ha sido adoptado como estándar oficial y proporciona un marco geodésico preciso, compatible con tecnologías modernas de posicionamiento y adaptado a las características geográficas nacionales. Al georreferenciar todos los datos dentro de este sistema, se garantiza que la información recopilada en campo y la procedente de estudios previos se alineen en un sistema común, facilitando así la comparación y el análisis de los datos.

La adopción de la proyección CTM-12 u Origen Nacional no solo asegura la correcta ubicación de los puntos de interés, sino que también permite la interoperabilidad entre diferentes bases de datos y plataformas tecnológicas, como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y software de modelado geológico. Es esencial que cualquier estudio técnico o mapa generado en proyecciones anteriores, como PSAD56, sea transformado adecuadamente al sistema Magna Sirgas para mantener la coherencia en todos los productos técnicos del proyecto. Esta conversión es particularmente crítica en las primeras fases de exploración, ya que evita problemas de comparación entre datos antiguos y nuevos, minimizando el riesgo de errores de posicionamiento

en operaciones de campo, como perforaciones o muestreos.

► Elaboración de la base cartográfica detallada

La elaboración de una base cartográfica detallada es fundamental para garantizar la precisión y calidad de las operaciones mineras. En minería, la base topográfica proporciona la representación precisa del terreno, necesaria para planificar, diseñar y ejecutar todas las actividades, desde la exploración inicial hasta la fase de explotación. Una base bien elaborada permite identificar la geomorfología del área, incluidos elementos clave como las curvas de nivel, los puntos críticos de altitud y otros factores que afectan la logística y el diseño de operaciones (Edwards & Atkinson, 1986; Moon et al., 2006).

Los avances tecnológicos en la adquisición de datos, como el uso de drones, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y LIDAR, han permitido mejorar significativamente la precisión y eficiencia de los levantamientos topográficos. Estas herramientas permiten generar mapas detallados que no solo ayudan a planificar rutas y accesos, sino que también facilitan la integración de otros datos geológicos y geofísicos, asegurando la precisión en la ubicación de puntos de perforación y muestreo (Haldar, 2018). Además, la representación del relieve mediante curvas de nivel, ajustada a las necesidades operativas, es esencial. En escalas regionales (1:25.000) las curvas pueden espaciarse entre 20-50 metros, mientras que en escalas más detalladas (1:5.000 a 1:10.000) las curvas de 5-10 metros son necesarias para capturar los detalles topográficos más importantes (CIM, 2018).

Es esencial que la infraestructura existente esté representada con precisión. La red vial, los caminos de acceso y la proximidad a instalaciones y servicios son factores clave que influyen en la logística del proyecto. Una base cartográfica que incluya estos elementos permite optimizar los tiempos y costos asociados con el transporte de equipos y personal, mejorando la eficiencia de las operaciones (Marjoribanks, 2010). Además, la cartografía debe incluir detalles sobre la hidrografía del área, ya que los ríos, arroyos y cuerpos de agua afectan tanto la planificación logística como los estudios ambientales. Es fundamental identificar incluso los pequeños cursos de agua y las zonas susceptibles de inundación en escalas detalladas, ya que estos elementos pueden influir en las actividades de perforación y en la instalación de infraestructura (Edwards & Atkinson, 1986).

La delimitación de límites geográficos y administrativos también es un componente crucial en la elaboración de la base cartográfica. La precisión en la representación de concesiones mineras, propiedades privadas y áreas protegidas garantiza que las operaciones se realicen dentro de los márgenes legales establecidos, evitando conflictos y asegurando el cumplimiento normativo (Moon et al., 2006). Finalmente, otro factor de importancia es la selección de la escala adecuada en cartografía, dicho factor es esencial para la exploración minera, ya que determina el nivel de detalle que se puede visualizar. A continuación, se presentan diversas escalas y sus correspondientes unidades mínimas cartografiables:

- **Escala Regional (1:100.000):** con unidades mínimas de aproximadamente 1.000.000 m² (1 km²), esta escala es ideal para estudios de gran extensión que brindan una visión general del área y ayudan a identificar tendencias regionales.
- **Escala Intermedia (1:25.000):** las unidades mínimas son de 500 m², lo que permite un análisis más detallado del potencial mineral y la identificación de características geológicas clave.
- **Escala Detallada (1:5.000):** las unidades mínimas en esta escala son de 50 m², lo que facilita levantamientos geológicos precisos en áreas de interés crítico, permitiendo decisiones informadas sobre actividades de perforación y muestreo.
- **Escala de Proyecto (1:2.000):** con unidades mínimas de 1 m², esta escala es utilizada para la planificación de infraestructura minera y la representación de detalles constructivos críticos en el terreno.
- **Escala Detallada de Túneles (1:1.000 a ≤1:500):** con unidades mínimas cartografiables de 10 m², esta escala permite un análisis geológico y geomecánico preciso del macizo rocoso, identificando estructuras de discontinuidad, zonas de debilidad, variaciones litológicas y presencia de aguas subterráneas. Es fundamental para la selección de métodos de excavación, diseño de sistemas de soporte y planificación de medidas de estabilidad, garantizando la seguridad y eficiencia en el desarrollo del túnel.

La selección de estas escalas y sus correspondientes unidades mínimas son fundamentales para garantizar que la información cartográfica sea útil en la planificación y ejecución de actividades exploratorias. Parámetros como la resolución

espacial y el nivel de detalle requerido aseguran que los mapas sean precisos y relevantes para la toma de decisiones durante las diversas fases del programa de exploración. Una cartografía bien elaborada proporciona una base sólida para la identificación de zonas con alto potencial mineral y facilita la optimización de recursos en el proceso de exploración.

3.1.3. Planeación y Diseño del Programa de Exploración

Una vez recopilada y revisada la información geológica del área de interés, se procede a realizar un análisis preliminar enfocado en identificar zonas con mayor potencial mineral. Este análisis se basa en la evaluación de estructuras geológicas, zonas de alteración hidrotermal y anomalías geoquímicas observadas en estudios previos. Los resultados obtenidos guiarán las primeras etapas de prospección y exploración, facilitando la definición de áreas prospectivas y objetivos específicos para el programa (Haldar, 2018; Marjoribanks, 2010).

La planificación de esta fase es un proceso meticuloso que involucra la colaboración de un equipo interdisciplinario de expertos, incluyendo geólogos, geoquímicos, geofísicos y topógrafos. Es esencial que este equipo esté liderado por un profesional con experiencia en la exploración de depósitos polimetálicos y un sólido entendimiento del entorno geológico. Durante esta etapa, se deben establecer objetivos claros para el proyecto, asignar los perfiles profesionales necesarios, identificar los recursos logísticos requeridos y elaborar un cronograma de actividades que contemple la flexibilidad necesaria para adaptarse a los hallazgos en campo (CIM, 2018; Moon et al., 2006).

Asimismo, es fundamental documentar rigurosamente todo el proceso de análisis. Esto asegura la trazabilidad de las fuentes consultadas y genera una base de datos geológica consolidada que sirva como referencia para las fases posteriores. El uso de herramientas tecnológicas, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), es crucial para gestionar y analizar los datos recopilados de manera eficiente. La disponibilidad de mapas geológicos detallados y bases topográficas, junto con imágenes de sensores remotos, complementa la revisión y facilita la identificación de zonas

prioritarias para las actividades iniciales de reconocimiento geológico y muestreo (Edwards & Atkinson, 1986). El cronograma debe ser lo suficientemente detallado para dividir las actividades en fases específicas y asignar responsabilidades a cada equipo. Además, debe tener la flexibilidad necesaria para adaptarse a los resultados obtenidos en el campo, permitiendo ajustes en función de los hallazgos geológicos y las condiciones logísticas.

Antes de llevar a cabo las actividades exploratorias en campo, se recomienda realizar una reunión técnica para definir la planeación y preparación de la campaña de exploración geológica. Este encuentro debe establecer claramente los objetivos principales a alcanzar en cada etapa de la exploración, lo que permitirá definir los recursos e insumos necesarios, incluyendo personal capacitado, logística, permisos y otros elementos esenciales. Se sugiere elaborar un “Proyecto de Exploración Minero” debidamente documentado, con roles, responsabilidades y alcances bien definidos. Con el análisis geológico preliminar completo, se debe diseñar un plan detallado de exploración que incluya las actividades a realizar en cada fase, los recursos humanos y técnicos necesarios, y los tiempos estimados para la finalización de cada etapa. Por último, es imprescindible incluir un presupuesto que contemple todos los aspectos del programa, desde la prospección inicial hasta la perforación y la estimación de recursos, asegurando así la viabilidad financiera del proyecto.

3.1.4. Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (QA/QC)

Un componente crítico que debe implementarse desde la fase inicial de un programa de exploración minera es el Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (QA/QC). Este programa es fundamental para garantizar la confiabilidad y precisión de los datos recolectados, aspectos que son esenciales para las etapas posteriores de evaluación de recursos y reservas. La implementación efectiva del QA/QC contribuye a minimizar riesgos asociados a las incertidumbres geológicas y asegura que las decisiones que se tomen en fases posteriores del proyecto estén basadas en datos de alta calidad (CIM, 2018; Haldar, 2018).

El QA/QC abarca todas las actividades de muestreo, análisis y procesamiento de datos, y debe ser diseñado de manera

integral desde el inicio del programa de exploración. Las principales actividades incluyen la definición de protocolos de muestreo, el uso de estándares certificados y muestras en blanco, la realización de duplicados y reanálisis, y la documentación exhaustiva de todos los procedimientos.

- **Definición de protocolos de muestreo:** se deben establecer procedimientos rigurosos para garantizar que las muestras de sedimentos, suelos, rocas y perforaciones sean representativas y recolectadas de manera uniforme y adecuada. Esto es esencial para obtener resultados que reflejen con precisión las condiciones del terreno y la distribución de los minerales.
- **Estándares:** la utilización de estándares certificados es vital para verificar y garantizar la exactitud de los resultados obtenidos en los laboratorios. Estos elementos ayudan a verificar la calibración de los equipos y asegurar que cualquier desviación en los resultados pueda ser identificada y corregida.
- **Blancos:** el uso de muestras blanco permite monitorear posibles contaminaciones durante la preparación y análisis de las muestras en el laboratorio.
- **Duplicados:** son muestras adicionales que se toman o preparan con el fin de verificar la precisión y consistencia de los resultados obtenidos en el análisis geoquímico. Su objetivo es detectar variaciones en los procedimientos de recolección, preparación y análisis. Se clasifican en dos tipos principales:
 - » Duplicados de campo: se obtienen tomando dos (2) muestras del mismo sitio o material geológico en el terreno, lo que permite verificar la consistencia de la recolección y la homogeneidad de las muestras.
 - » Duplicados de preparación: se generan al dividir una misma muestra durante su preparación en el laboratorio, evaluando así la precisión del proceso analítico y la reproducibilidad del análisis en condiciones controladas. El uso de duplicados es esencial para asegurar que los resultados obtenidos sean consistentes y precisos, permitiendo identificar posibles variaciones en las etapas de muestreo y análisis.
- **Verificación externa:** la planificación del reanálisis de muestras en laboratorios independientes es una práctica recomendada para garantizar la consistencia de los

resultados. Este enfoque proporciona una capa adicional de verificación que refuerza la confianza en los datos obtenidos.

- Documentación exhaustiva: todos los procedimientos y actividades deben ser documentados meticulosamente para asegurar la trazabilidad y evitar errores durante el procesamiento de los datos. La documentación adecuada no solo es crucial para la validación de los resultados, sino que también facilita la revisión y auditoría de los procesos implementados.

► **Importancia de relacionar el QA/QC con varias fases del programa de exploración**

El Programa de Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad debe ser considerado a lo largo de todas las fases del programa de exploración. En la Fase 1: Planificación y Revisión Inicial, el QA/QC se enfoca en establecer protocolos y procedimientos para el muestreo, asegurando que la base de datos inicial sea confiable. Durante la Fase 2: Exploración Superficial, se aplica el QA/QC en la recolección de datos geológicos y geoquímicos, así como en el análisis de resultados. Por último, en la Fase 3: Exploración del Subsuelo, el programa continúa siendo esencial al guiar el muestreo y análisis de perforaciones, garantizando que la información sobre recursos y reservas sea precisa y verificable.

Al relacionar el QA/QC con diversas fases del programa de exploración, se establece un enfoque sistemático que fortalece la integridad de los datos y aumenta la probabilidad de éxito en la identificación de depósitos polimetálicos. Esta perspectiva no solo protege la inversión de recursos, sino que también mejora la credibilidad del proyecto ante inversores y autoridades reguladoras, elementos clave para el avance exitoso de cualquier iniciativa minera (Edwards & Atkinson, 1986; Marjoribanks, 2010).

Por lo tanto, el QA/QC es un componente esencial que debe ser implementado desde el inicio del programa de exploración en depósitos polimetálicos. A través de prácticas rigurosas de muestreo, análisis y documentación, se garantiza que los datos recolectados sean precisos y confiables, minimizando así los riesgos asociados a las incertidumbres geológicas. La integración del QA/QC a lo largo de múltiples fases del programa refuerza la calidad de la información y proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en las etapas posteriores del proyecto.

El profesional responsable del proyecto minero deberá realizar una revisión exhaustiva de la normativa legal vigente y aplicable al título minero correspondiente. Dada la relevancia de la actividad minera, es fundamental que la Persona Competente o el profesional encargado analice de manera detallada toda la información legal relacionada con el título minero, incluyendo licencias, permisos, requisitos técnicos y obligaciones contractuales. Asimismo, el profesional debe mantenerse actualizado sobre la normatividad vigente en el país y contar con la capacidad de consultar plataformas oficiales y otras fuentes confiables habilitadas por las autoridades competentes. Esto le permitirá guiar y acompañar de manera efectiva a los diferentes actores involucrados en el proyecto minero durante los procesos administrativos, técnicos o legales requeridos por la autoridad minera, asegurando el cumplimiento normativo y la sostenibilidad del proyecto.

3.1.5. Aspectos legales y tenencia de la propiedad minera

Se deberá tener en cuenta los siguientes aspectos considerando la etapa en la que se encuentre el proyecto:

- Definir el tipo de derecho minero que cubre el título, la legislación correspondiente y la etapa en la que se encuentre el desarrollo minero.
- Naturaleza de los derechos obtenidos (exploración, construcción y montaje, explotación).
- Derecho de uso y/o propiedad del suelo.
- Principales términos y condiciones de los acuerdos existentes.

La persona a cargo del proyecto minero deberá estar al tanto del estado de todos los impuestos, contraprestaciones económicas y regalías que se pagan con respecto a cada propiedad.

► **Recomendaciones: planificación y revisión inicial**

- ✓ Establecer objetivos precisos y medibles que guiarán el programa de exploración, como identificar áreas con alta probabilidad de mineralización o definir la extensión del depósito mineral.

- ✓ Realizar un análisis exhaustivo para identificar y documentar vacíos en la información geológica existente. Esto incluye revisar datos históricos y actuales para determinar áreas que requieren estudios adicionales.
- ✓ Implementar un sistema para la gestión de datos que incluya:
 - Crear una base de datos donde se registre toda la información geológica recopilada, facilitando el acceso y análisis posterior.
 - Mantener un registro de cualquier cambio en la metodología o en los datos recopilados.
- ✓ Establecer hitos claros y un cronograma para monitorear el progreso del proyecto, incluyendo revisiones periódicas para ajustar la planificación en función de los hallazgos.
- ✓ Realizar un inventario detallado de los recursos logísticos y humanos necesarios. En primer lugar, se debe identificar y asegurar el equipo adecuado para el muestreo. Esto incluye herramientas como perforadoras, sistemas de muestreo de sedimentos y equipos de laboratorio, que son fundamentales para garantizar la precisión y la eficiencia de los análisis. Además, es crucial especificar el número y tipo de personal requerido para las actividades de campo. Esto abarcará a profesionales de ciencias de la Tierra, quienes desempeñan un papel vital en la recolección y análisis de datos geológicos, así como al personal de apoyo logístico, que asegurará que todas las operaciones se desarrollen sin contratiempos. La adecuada planificación y asignación de estos recursos permitirá optimizar el proceso de exploración y facilitará la toma de decisiones informadas en las etapas siguientes del proyecto.
- ✓ Establecer un plan de comunicación con las comunidades locales y partes interesadas para:
 - **Informar sobre actividades:** Mantener a las comunidades informadas sobre las actividades planificadas y la importancia del proyecto.
 - **Recopilación de retroalimentación:** Crear canales para recibir comentarios y preocupaciones de las comunidades.
- ✓ Realizar una evaluación inicial del impacto ambiental (EIA) para identificar posibles efectos negativos de las actividades de exploración y proponer mitigaciones adecuadas desde el inicio del proyecto.

✓ Más información

- **Bertoli, F. (2020).** *Geology and Exploration of Mineral Deposits: A Critical Review of Current Methods.* *Minerals*, 10(8), 681.
- **Cameron, E. N., & D. C. H. (1998).** *Mineral Exploration: Principles and Applications.* New York: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. pp. 50-70.
- **Froidevaux, J. (2009).** *Geological Mapping in Mineral Exploration: Methods and Techniques.* Geological Society of America, Special Paper 462, Boulder, CO. pp. 105-128.
- **Ley 685 de 2001** “por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones”. Agencia Nacional de Minería - Normatividad, artículo 58 de la Constitución Política de Colombia.
- **Kerrich, R., & Yang, J. (2018).** *Geology of ore deposits: A 21st-century perspective.* *Minerals*, 8(8), 375.
- **Petersen, U. E., & Schirmer, U. (2015).** *Applied Geochemistry in Mineral Exploration.* Berlin: Springer. pp. 150-175.
- **Thompson, A. B., & Walsh, J. (2005).** *The Role of Geochemical Analysis in Mineral Exploration.* *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 5(3), 195-206.
- **Rao, A. R., & Kamat, V. (2021).** *Integrating geological and geochemical data for mineral exploration: Case studies from various environments.* *Geoscience Frontiers*, 12(3), 100-110.
- **Young, C. A. (2017).** *Geostatistics for Environmental and Geological Applications.* New York: John Wiley & Sons. pp. 1-25.

3.2. FASE 2: Exploración Superficial

La exploración superficial constituye un pilar esencial en la exploración de depósitos polimetálicos, ya que permite identificar indicios preliminares de mineralización en la superficie antes de proceder a estudios más profundos. En esta etapa, se emplean diversas técnicas para recopilar datos geológicos, geoquímicos y geofísicos, los cuales se integran para construir un modelo preliminar del subsuelo. Las principales etapas incluyen la cartografía geológica, que proporciona un marco estructural del terreno, la exploración geoquímica, que detecta anomalías en la concentración de elementos químicos en el suelo y las rocas, y la exploración geofísica, que ayuda a mapear las propiedades físicas del subsuelo sin realizar perforaciones (Moon *et al.*, 2006; Haldar, 2018).

La cartografía geológica superficial es una actividad crucial en esta etapa y en las siguientes. Mediante el análisis y representación gráfica de las unidades litológicas y estructuras geológicas superficiales, los geólogos pueden identificar áreas con potencial mineralizado. Se presta especial atención a las zonas de alteración hidrotermal, ya que estas suelen estar asociadas con procesos mineralizadores de interés económico. Además, la cartografía incluye el uso de métodos modernos como la interpretación de imágenes de

sensores remotos, que permiten un reconocimiento inicial de patrones geológicos a través de imágenes aéreas y satelitales, complementada con trabajo de campo para identificar detalles más finos que no son visibles a gran escala (Moon *et al.*, 2006; Haldar, 2018). Este enfoque integrado establece las bases para definir áreas prioritarias que avanzarán a las siguientes fases de exploración.

Por otro lado, la exploración geoquímica se enfoca en la recolección sistemática de muestras de suelos, sedimentos y rocas para su análisis químico en laboratorio. El objetivo es identificar anomalías en la concentración de elementos traza, lo que puede indicar la presencia de depósitos polimetálicos en el subsuelo (Marjoribanks, 2010). Estos estudios se combinan con los datos de exploración geofísica, que incluyen técnicas como la magnetometría y la gravimetría, las cuales revelan anomalías físicas que podrían estar asociadas a cuerpos mineralizados (Gadallah & Fisher, 2009). La información obtenida se integra y evalúa mediante herramientas de modelado geofísico y geoquímico, permitiendo una selección precisa de las áreas con mayor potencial para futuras actividades de perforación y excavación exploratoria (Telford *et al.*, 1990; Brown & Clark, 2020).

3.2.1. Cartografía geológica de superficie

La cartografía geológica es una etapa fundamental dentro de la fase de exploración superficial de un proyecto minero, pues proporciona la base esencial para la identificación y caracterización de las unidades litológicas, estructuras geológicas y alteraciones hidrotermales presentes en el área de estudio. El objetivo primordial de este proceso es delimitar áreas potencialmente mineralizadas, orientando de manera efectiva las actividades de muestreo y exploración que se llevarán a cabo en etapas posteriores. Aunque este trabajo es preliminar, es decisivo para la toma de decisiones estratégicas, ya que la información geológica superficial permite inferir, en muchos casos, la disposición y naturaleza de las estructuras en profundidad.

El proceso de cartografía geológica implica la representación gráfica de las observaciones geológicas en un mapa, que generalmente se elabora sobre una base topográfica previamente preparada. En el trabajo de campo, los datos se registran meticulosamente mediante la identificación de distintas unidades litológicas, que son los tipos de rocas presentes en el área, y las estructuras geológicas asociadas, como fallas, pliegues, fracturas y zonas de cizalla. Todos estos elementos son clave en la identificación de áreas con potencial mineral. Se presta especial atención a las zonas de alteración hidrotermal, que son indicadoras de procesos mineralizadores y resultan de la interacción de fluidos hidrotermales con las formaciones rocosas, lo que puede estar íntimamente ligado a la formación de depósitos minerales (Moon *et al.*, 2006; Haldar, 2018).

La utilización de escalas es crucial en la cartografía geológica, como se indicó en la Fase 1, ya que define el nivel de detalle que se puede representar en el mapa. Para trabajos iniciales de reconocimiento, se suelen emplear escalas de

1:25.000 o 1:10.000, que permiten obtener una visión general del área de estudio, identificando las unidades litológicas más grandes y las principales estructuras tectónicas. Sin embargo, conforme se avanza en el estudio y se requiere mayor detalle, se pueden usar escalas más finas, como 1:5.000 o incluso 1:2.000. Estas escalas permiten una cartografía más exhaustiva de las formaciones geológicas y estructuras menores, como fracturas y vetillas mineralizadas, que pueden no ser visibles a escalas más generales. Esta mayor precisión es particularmente útil en áreas donde se ha identificado una alta concentración de alteración hidrotermal o estructuras mineralizadas (Haldar, 2018).

► Métodos cartográficos

La exploración geológica moderna se beneficia significativamente de diversas técnicas de cartografía que permiten la identificación y caracterización de rasgos geológicos en diferentes escalas (ver Figura 4). Entre estas técnicas, la fotointerpretación destaca por su capacidad para utilizar imágenes aéreas y satelitales, facilitando la identificación de patrones geológicos sin requerir trabajo de campo extensivo, lo que mejora la eficiencia del proceso exploratorio (Moon *et al.*, 2006). Sin embargo, dado que la fotointerpretación tiene limitaciones en la captura de detalles finos, es crucial complementarla con cartografía detallada y otros métodos, como el Método Anaconda, que integra observación en campo con herramientas geofísicas y geoquímicas para ofrecer una evaluación más completa del área. A través de esta combinación de métodos de cartografía regional y detallada, se logra una comprensión integral de la geología, permitiendo la identificación efectiva de recursos minerales y zonas de interés económico

Figura 4. Reconocimiento e identificación en campo de los objetivos de exploración



Fuente: Cortesía Aris Mining Corp

- **Método cartográfico por fotointerpretación:** esta técnica utiliza imágenes aéreas y satelitales para identificar características geológicas sin necesidad de un trabajo de campo extensivo, lo que mejora la eficiencia en la identificación de patrones geológicos (Moon *et al.*, 2006). Sin embargo, la fotointerpretación tiene limitaciones en estudios de detalle, ya que puede no capturar pequeñas estructuras o variaciones litológicas que requieren observación directa. Por ello, se complementa con trabajo de campo detallado a escalas más finas, como 1:5.000 o 1:2.000.
- **Método cartográfico regional y detallado:** la cartografía regional busca cubrir áreas extensas a escalas generales (1:100.000 o mayores) para proporcionar una visión global de la geología del terreno, identificando tendencias geológicas generales (Haldar, 2018). Sin embargo, la identificación de recursos minerales requiere avanzar hacia la cartografía detallada, que es indispensable en zonas con alta concentración de alteración hidrotermal o mineralización. A escalas menores, se pueden identificar estructuras menores y vetillas que indican cuerpos mineralizados en profundidad (Edwards & Atkinson, 1986).
- **Método Anaconda:** este es uno de los métodos más utilizados en la industria minera, combina observación en campo con herramientas geofísicas y geoquímicas, permitiendo una evaluación integral de las características geológicas del área. Se aplica principalmente en la cartografía de superficie y es versátil para integrarse en fases más avanzadas del proyecto, enfatizando la cartografía de unidades litológicas a escalas de 1:10.000 o más detalladas (Einaudi, 1997). Este método es particularmente eficaz para identificar zonas de alteración hidrotermal, lo que es crucial para detectar áreas con mineralización oculta.

3.2.2. Exploración geoquímica

La exploración geoquímica es una etapa fundamental dentro del proceso de exploración minera, especialmente en la Fase 2: Exploración Superficial. Esta fase involucra diversos estudios y actividades destinadas a identificar anomalías geoquímicas, que son concentraciones inusuales de elementos químicos que podrían estar relacionadas

con depósitos minerales. Mediante la implementación de metodologías detalladas y sistemáticas para muestrear suelos, sedimentos y rocas, se busca definir las características químicas de una región y determinar su potencial mineral. Estas actividades no solo son cruciales para el reconocimiento inicial de recursos, sino que también establecen las bases para decisiones estratégicas en las etapas posteriores de exploración (Marjoribanks, 2010).

El objetivo principal de la exploración geoquímica es identificar y definir las características geoquímicas de un área al detectar concentraciones anómalas de elementos metálicos o no metálicos. Para lograr esto, se recolectan muestras representativas que se analizan en laboratorio, permitiendo determinar su contenido químico. El hallazgo de anomalías puede indicar la presencia de zonas mineralizadas, lo que justifica la priorización de estas áreas para estudios más detallados, como la perforación. Además, la exploración geoquímica busca identificar elementos guía o “*pathfinder*”, que son aquellos elementos químicos que tienden a asociarse con otros minerales de interés económico. Estos elementos son particularmente útiles para ubicar depósitos minerales, incluso en regiones donde la mineralización principal no es visible de forma directa (Haldar, 2018).

Un paso clave en la planificación de campañas de muestreo, es la elección del método geoquímico, ya que influye directamente en la efectividad de los resultados. Esta selección debe basarse en factores esenciales, como la escala del objetivo, la fiabilidad del método elegido y los costos implicados. Tras la recolección y análisis de las muestras, los datos obtenidos se utilizan para crear mapas geoquímicos que representan la distribución de los elementos químicos en la zona de estudio. Estos mapas son herramientas fundamentales para identificar áreas con concentraciones anómalas y relacionarlas con características geológicas, como fallas o estructuras mineralizadas. Diferenciar entre mineralizaciones primarias y secundarias es crucial para orientar correctamente las actividades futuras de exploración, asegurando así que los esfuerzos se concentren de manera eficiente en la identificación de recursos minerales (Potts, 1987).

► Estudios de Orientación Geoquímica

Antes de llevar a cabo un muestreo a gran escala en un área, es común implementar estudios de orientación geoquímica. Estos estudios son esenciales para evaluar la

viabilidad y efectividad de los métodos de muestreo, ayudando a determinar cuál es el más adecuado para las condiciones geológicas y ambientales específicas del área de interés (Marjoribanks, 2010).

Uno de los principales objetivos de los estudios de orientación es la evaluación de diferentes métodos de muestreo. Se realizan pruebas comparativas que analizan la eficiencia, representatividad y capacidad para detectar anomalías de varios enfoques de muestreo. Esto puede incluir la prueba de distintos intervalos de muestreo, como, por ejemplo, mallas de 50x50 metros frente a mallas de 25x25 metros, así como la recolección de diferentes tipos de muestras, que abarcan suelos, sedimentos y rocas (Thompson & Walsh, 1983).

Un aspecto crítico de estos estudios es la determinación del umbral geoquímico, también conocido como “*background*”. Este valor de referencia es fundamental, ya que proporciona un contexto para identificar concentraciones anómalas en los datos obtenidos. La identificación de valores que superan este umbral es clave para detectar posibles zonas de mineralización, lo que facilita la priorización de áreas para el muestreo adicional (Haldar, 2018).

Posteriormente, los datos recolectados durante los estudios de orientación son analizados para evaluar la distribución de los elementos y correlacionarlos con características geológicas. Este análisis es crucial, ya que ayuda a refinar la estrategia de muestreo en las etapas posteriores, asegurando que el programa de exploración sea lo más efectivo y eficiente posible.

Finalmente, los datos recolectados durante los estudios de orientación son analizados para evaluar la distribución de los elementos y correlacionarlos con características geológicas.

► Selección del Método Geoquímico

La selección del método geoquímico adecuado es un paso fundamental en cualquier programa de exploración mineral, ya que tiene un impacto significativo en la efectividad y eficiencia de las campañas de muestreo. Esta elección no se realiza de manera arbitraria; en su lugar, depende de varios factores críticos que deben ser considerados cuidadosamente. Entre estos factores se encuentran el tamaño del objetivo, la confiabilidad del método y los costos asociados a la exploración.

El tamaño del objetivo se refiere a la extensión del área que se desea muestrear. Cuando se aborda un objetivo grande, es posible que se necesite un enfoque de muestreo menos denso, mientras que un objetivo más pequeño o específico podría requerir un muestreo más detallado y exhaustivo. Por ejemplo, en áreas amplias donde se presume que la mineralización es difusa, podría ser más eficiente realizar muestreos en tramos o secciones específicas, seleccionando ubicaciones representativas en lugar de aplicar un diseño uniforme (Haldar, 2018). En contraste, para depósitos más concentrados, como vetas o cuerpos mineralizados bien definidos, se recomienda un muestreo más denso. En estos casos, establecer estaciones de muestreo a intervalos cortos, como cada 10 o 15 metros, aumenta la probabilidad de detectar anomalías geológicas y mineralógicas relevantes, mejorando la evaluación de la mineralización y permitiendo la identificación de patrones geológicos más claros (Marjoribanks, 2010).

La confiabilidad del método es otro aspecto crítico en la selección de técnicas geoquímicas. Este concepto se relaciona directamente con la precisión y exactitud de los datos obtenidos. Es esencial que el método seleccionado no solo identifique adecuadamente las anomalías geoquímicas, sino que también minimice las falsas anomalías, que pueden llevar a decisiones incorrectas, como inversiones inapropiadas o la desestimación de áreas con verdadero potencial mineral (Thompson & Walsh, 1983). Para garantizar la confiabilidad, un programa geoquímico efectivo debe incluir controles de calidad rigurosos y procedimientos de verificación que aseguren que los datos reflejan con fidelidad las condiciones del terreno y las características de los depósitos minerales.

Por último, los costos asociados deben ser cuidadosamente estimados, tomando en cuenta no solo el área a cubrir, sino también los métodos de muestreo y análisis, así como las condiciones del terreno. Factores como el acceso a las áreas de muestreo, la disponibilidad de equipos, y la mano de obra necesaria influyen significativamente en el costo total del programa. Un presupuesto detallado y bien planificado es crucial para asegurar que el programa de exploración sea eficiente y financieramente sostenible (Potts, 1987). Además, la planificación de los costos permite la flexibilidad necesaria para adaptarse a diferentes escenarios y contingencias que pueden surgir durante el proceso de exploración.

En conclusión, la selección del método geoquímico adecuado es un proceso integral que requiere la consideración de

múltiples factores, incluyendo el tamaño del objetivo, la confiabilidad del método y los costos asociados. Un enfoque bien fundamentado en esta selección no solo mejora la efectividad de la exploración, sino que también optimiza el uso de los recursos disponibles, lo cual es esencial en el competitivo campo de la minería y la exploración de recursos.

► Técnicas Analíticas

Las técnicas analíticas aplicadas en la exploración geoquímica son fundamentales para obtener datos precisos sobre la composición química de las muestras recolectadas, ya sean de sedimentos, suelos o rocas. Estas técnicas permiten la identificación de concentraciones anómalas de elementos traza, que pueden indicar la presencia de mineralización económicamente viable. A continuación, se detallan los principales métodos analíticos utilizados en esta fase, explicando su importancia, limitaciones y aplicaciones, orientadas a un contexto de alta precisión en exploración mineral. Una vez recolectadas las muestras, se envían a laboratorios especializados donde se analizan utilizando diferentes técnicas analíticas. Estas técnicas incluyen:

- **La espectrometría de masas (MS):** es una técnica analítica altamente efectiva que se emplea para identificar y cuantificar compuestos químicos mediante la medición de la relación masa/carga de los iones generados a partir de las muestras. En el ámbito de la exploración geoquímica, la espectrometría de masas es particularmente relevante, ya que permite la detección de elementos en concentraciones extremadamente bajas. Esto resulta esencial para identificar anomalías geoquímicas asociadas con depósitos minerales, así como para el análisis de elementos traza y “*pathfinders*”, que juegan un papel crucial en el reconocimiento de áreas mineralizadas (Potts, 1987).

Las técnicas asociadas a la espectrometría de masas, como la Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), son igualmente importantes. La ICP-OES permite la detección simultánea de múltiples elementos, ofreciendo una gran versatilidad en el análisis de muestras de suelos, sedimentos y rocas. Por su parte, la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) destaca por su sensibilidad superior, lo que facilita la determinación de isótopos y trazas de elementos en los mismos tipos de matrices. Adicionalmente, el uso

de HR-ICP-MS proporciona alta resolución, mientras que la SF-ICP-MS se enfoca en análisis detallados, ambas convirtiéndose en herramientas esenciales en la exploración mineral.

Estas técnicas permiten obtener datos confiables sobre una amplia gama de elementos, incluidos metales como Cu, Zn, Pb, Ni y Co (Thompson & Walsh, 1983). Uno de los principales beneficios de la ICP-OES es su capacidad para manejar una variedad de matrices complejas, lo que la hace indispensable en programas de exploración. Sin embargo, la precisión de los resultados analíticos depende en gran medida de la correcta preparación de las muestras, ya que las interferencias espectrales pueden comprometer el rendimiento de la técnica (Weiss, 2005).

- **Fluorescencia de Rayos X (XRF):** es una técnica no destructiva utilizada para determinar la composición elemental de las muestras. Es especialmente útil para el análisis de elementos pesados como Pb, Zn, Cu, Fe y otros metales base (Jenkins, 1999). La XRF funciona excitando los átomos presentes en la muestra con rayos X, lo que hace que los átomos emitan su propia radiación característica, que luego es medida para identificar y cuantificar los elementos presentes. Una de las principales ventajas del análisis por XRF es que puede aplicarse directamente a muestras sin preparación compleja, y es particularmente útil en el campo para obtener resultados preliminares rápidos (Klockenkämper, 2014). Esta técnica es muy empleada en la identificación de metales en suelos y sedimentos, proporcionando información crítica sobre la distribución de elementos en tiempo real. No obstante, su sensibilidad para detectar elementos en bajas concentraciones es limitada en comparación con la ICP-OES, lo que puede requerir análisis complementarios para elementos traza.
- **Ensayos al Fuego:** son un método tradicional, pero altamente confiable utilizado principalmente para la detección de metales preciosos, como el Au y la Ag. Este procedimiento consiste en fundir la muestra a altas temperaturas junto con reactivos que ayudan a separar los metales preciosos del resto de la matriz rocosa (Crissman, 2004). Tras el proceso de fusión y separación, los metales se concentran y se someten a un análisis químico detallado para determinar su contenido exacto. El ensayo al fuego es extremadamente

preciso y es considerado el estándar para el análisis de Au y Ag en la exploración mineral. Si bien es un proceso que requiere tiempo y recursos, la capacidad de detectar trazas de metales preciosos en concentraciones extremadamente bajas lo convierte en una técnica crítica en programas de exploración avanzada. La principal limitación de esta técnica es que se aplica de manera específica para metales preciosos, por lo que no es adecuada para la detección de otros elementos químicos (Gill, 1997).

- **Absorción Atómica:** es una técnica analítica fundamental utilizada para la cuantificación de elementos metálicos en diversas matrices, incluidas muestras de rocas, suelos, sedimentos y aguas. Existen varios métodos de absorción atómica, entre los cuales se destacan la Espectroscopía de Absorción Atómica (AA), que mide la luz absorbida por los átomos en estado gaseoso; la Espectroscopía de Absorción Atómica con Llama (FAAS), que utiliza una llama para atomizar la muestra y es ideal para analizar metales en soluciones líquidas; y la Espectroscopía de Absorción Atómica por Horno de Grafito (GFAAS), que permite la detección de metales en concentraciones mucho más bajas al utilizar un horno de grafito para atomización. Otro método menos común es la Espectroscopía de Absorción Atómica por Atomización por Microondas (MAA), que emplea energía de microondas para atomizar la muestra. La elección del método depende de la naturaleza de la muestra, la concentración de los analitos y la sensibilidad requerida, lo que hace de la absorción atómica una herramienta clave en la química analítica y la exploración mineral (Thompson & Walsh, 1983).
- **Inclusiones Fluidas:** el análisis de inclusiones fluidas se utiliza para interpretar las condiciones de formación de los depósitos minerales. Esta técnica implica el estudio de pequeñas burbujas de fluidos atrapadas en los minerales durante su formación, proporcionando datos sobre temperatura y presión en el momento de la cristalización. La información obtenida a partir de las inclusiones fluidas es crucial para entender la evolución geológica y la génesis de los depósitos minerales, permitiendo hacer inferencias sobre las condiciones de formación y los procesos hidrotermales involucrados. Es importante destacar que el análisis e interpretación de inclusiones fluidas debe estar pre-

cedido por estudios petrográficos y metalográficos, ya que estos permiten identificar las fases minerales, texturas y relaciones paragenéticas necesarias para contextualizar correctamente los resultados. Estos análisis son particularmente útiles en la FASE 3: EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO, especialmente en la exploración geoquímica, proporcionando información clave sobre los fluidos mineralizadores y su evolución. Asimismo, contribuyen a la evaluación de las características metalúrgicas del depósito, facilitando la optimización de los procesos de beneficio y extracción en etapas posteriores.. (Roedder, 1984).

- **Densidad Aparente:** la densidad aparente mide la densidad de un material, considerando tanto su masa como su volumen, incluidos los espacios porosos. Aunque este análisis no se considera una técnica analítica en el sentido tradicional, es relevante para evaluar la calidad de los minerales. La densidad aparente puede influir en el procesamiento de minerales y en la determinación de la viabilidad económica de un depósito, ayudando a los geólogos a entender mejor las propiedades físicas de los materiales analizados (Baba et al., 2013).

La correcta selección de la técnica analítica depende de los objetivos del programa de exploración y del tipo de mineralización que se espera encontrar. En la exploración geoquímica, es común utilizar combinaciones de técnicas para obtener un perfil geoquímico completo y confiable. Por ejemplo, la ICP-OES es preferida para la detección de elementos traza en matrices complejas, mientras que la XRF es ideal para un análisis preliminar rápido en campo. Los ensayos al fuego son indispensables para el análisis detallado de metales preciosos cuando se han identificado anomalías geoquímicas preliminares que sugieren la presencia de estos metales.

► Protocolos en el muestreo

El éxito de la exploración geoquímica está intrínsecamente ligado a la implementación rigurosa de protocolos de muestreo bien definidos. Para garantizar la calidad y la validez de los resultados obtenidos, es fundamental que las muestras recolectadas sean representativas del área de estudio y estén completamente libres de contaminación. Esto implica que cada paso del proceso, desde la recolección hasta el transporte, debe seguir estrictas normas de seguridad y calidad.

El entrenamiento adecuado del personal de campo es crucial para el cumplimiento de estos protocolos. Los técnicos deben estar capacitados para identificar las áreas de muestreo, asegurando que se seleccionen los puntos correctos para la recolección de muestras. Además, deben ser conscientes de los riesgos potenciales y de los procedimientos necesarios para evitar errores que puedan comprometer la integridad de los resultados. Un muestreo inadecuado puede llevar a interpretaciones erróneas y decisiones de exploración fallidas.

Cada muestra debe ser etiquetada de manera clara y precisa, y empaquetada para su transporte de forma segura. Esta documentación es vital para garantizar la trazabilidad, lo que permite a los investigadores rastrear el origen de cada muestra y correlacionar los resultados analíticos con ubicaciones específicas de muestreo. La falta de un etiquetado adecuado puede resultar en confusiones que afecten la validez de los análisis realizados en el laboratorio.

El resultado final de un programa de exploración geoquímica bien ejecutado es la generación de mapas geoquímicos detallados que ilustran las áreas con anomalías significativas. Estas anomalías son indicativas de posibles concentraciones de mineralización y serán priorizadas para una evaluación más exhaustiva. Esta evaluación adicional puede incluir estudios geofísicos, perforación y muestreo complementario para confirmar la presencia de recursos minerales. La identificación precisa de áreas con alto potencial mineral es fundamental, ya que estas decisiones guiarán las estrategias en las etapas posteriores de la exploración. Por lo tanto, seguir protocolos de muestreo rigurosos no solo mejora la calidad de los datos obtenidos, sino que también optimiza el uso de recursos en el campo de la exploración minera, asegurando que los esfuerzos sean eficientes y sostenibles.

► Metodología de Muestreo

El muestreo geoquímico tiene como base la implementación de mallas sistemáticas, cuyo espaciado depende de las características del depósito potencial. Estas mallas se diseñan para obtener una representación geológicamente significativa del terreno. Para depósitos diseminados, que suelen abarcar grandes áreas con mineralización difusa, se utilizan mallas de 50x50 metros. En cambio, en zonas con mineralización más concentrada, como vetas, el espaciado se reduce a 25x25 metros, lo que permite una mayor resolución en la detección de concentraciones

de metales (Marjoribanks, 2010).

El diseño de estas mallas depende de varios factores, como la geología regional, la geomorfología del terreno y su accesibilidad. En áreas con escasez de afloramientos o donde estos son inaccesibles, el muestreo de suelos resulta especialmente útil, ya que permite recolectar muestras representativas de los elementos metálicos que se acumulan en los horizontes del suelo, sin necesidad de excavar hasta el material parental (Haldar, 2018).

El muestreo geoquímico en la Fase 2: Exploración Superficial es esencial para identificar áreas con alto potencial mineral mediante la recolección sistemática de sedimentos activos, suelos y rocas. A continuación, se describen las principales técnicas de muestreo, con un enfoque en la relevancia de cada método y sus aplicaciones:

- **Muestreo de sedimentos activos:** en la exploración superficial, el muestreo de sedimentos activos es fundamental para identificar anomalías geoquímicas en áreas donde la prospección directa o la perforación aún no son factibles. Esta técnica consiste en recolectar sedimentos transportados por ríos o quebradas, que reflejan la composición mineralógica de las rocas aguas arriba en la cuenca hidrográfica. Los sedimentos recolectados (normalmente arenas y limos) permiten detectar concentraciones anómalas de metales como Cu, Pb, Zn, Au y Ag, lo cual es esencial para priorizar áreas de mayor potencial mineral (Moon et al., 2006).

El muestreo se realiza en puntos estratégicos dentro del cauce, como barras de arena y zonas de acumulación de sedimentos, donde se retienen partículas finas que pueden concentrar metales traza. Es crucial evitar la contaminación de las muestras utilizando herramientas adecuadas, como palas libres de metales, y almacenar las muestras en bolsas limpias y etiquetadas correctamente. Una vez recolectadas, las muestras se preparan para el análisis mediante procesos como el secado y la molienda, lo que facilita su homogeneización y posterior análisis en el laboratorio (Haldar, 2018).

- **Muestreo de suelos:** el muestreo de suelos es uno de los métodos más efectivos en áreas donde los afloramientos rocosos son escasos o están cubiertos por vegetación. Este tipo de muestreo se centra en reco-

lectar muestras de los horizontes C y D del perfil del suelo, donde los elementos metálicos liberados por las rocas subyacentes tienden a acumularse debido a los procesos de meteorización. Estos horizontes profundos son preferidos porque ofrecen una señal geoquímica más estable y representativa del subsuelo (Haldar, 2018). Las técnicas de muestreo de suelos son las siguientes:

Trincheras y Zanjas: estas excavaciones son transversales a las estructuras mineralizadas y permiten exponer el suelo a mayor profundidad, lo que facilita la toma de muestras más representativas del horizonte profundo. Las trincheras también son útiles para estudiar la continuidad lateral de un depósito.

Calicatas y Apiques: en terrenos inclinados o donde se requiere una mayor profundidad, se emplean calicatas (excavaciones rectangulares) o apiques (excavaciones verticales) para acceder a capas más profundas del suelo. Estas estructuras son ideales para investigar áreas con cobertura espesa o donde el material superficial dificulta el acceso al subsuelo (Moon et al., 2006).

- **Muestreo de roca:** el muestreo de roca es crucial para obtener información directa sobre las propiedades físicas y químicas de las rocas madre y las estructuras mineralizadas. Permite estudiar la litología, la mineralogía y las alteraciones hidrotermales que son fundamentales para caracterizar los depósitos (ver Figura 5). Este tipo de muestreo se realiza generalmente en afloramientos, taludes o cortes de carretera, donde la roca es accesible y visible. Dependiendo de las condiciones geológicas, se emplean varias técnicas:

1. Muestreo en Afloramientos: ofrecen una oportunidad ideal para obtener muestras frescas de las rocas. Es importante limpiar cualquier óxido o material superficial antes de recolectar las muestras, asegurando que se obtenga roca fresca y no alterada. Dentro de los afloramientos se pueden utilizar varias técnicas:

Muestreo en canal: consiste en cortar un canal continuo y perpendicular a una estructura mineralizada, como vetas o cuerpos de alteración. Este método permite obtener una muestra representativa de toda la sección de la mineralización, capturando tanto el material mineralizado como el estéril. Es útil para estudiar la continuidad y la geometría de la mineralización.

Muestreo en panel: en áreas donde la mineralización no sigue un patrón estructural claro, se utiliza esta técnica, que consiste en recolectar fragmentos de roca de un área rectangular o cuadrada, generalmente de 2x2 metros. Es útil para obtener una visión general de la alteración en afloramientos difusos.

Esquirlas de muestreo (Chip samples): se recolectan pequeños fragmentos de roca a lo largo de una estruc-

tura geológica, siguiendo una dirección específica. Esta técnica es ideal para estudios preliminares, donde se requiere una evaluación rápida del área o donde la exposición de la roca es limitada (Marjoribanks, 2010).

2. Muestreo de Cantos Rodados: es una técnica útil en áreas donde los afloramientos no son visibles o accesibles, pero existen grandes bloques de roca

Figura 5. Muestra de roca



Fuente: Cortesía Aris Mining Corp

transportados por ríos o quebradas. Estos fragmentos han sido desplazados mínimamente desde su fuente y pueden proporcionar información valiosa sobre la mineralización en áreas cercanas. El análisis de los cantos rodados puede revelar la composición mineralógica del área de origen, ayudando a identificar posibles zonas mineralizadas. Esta técnica es particularmente útil en regiones montañosas o áreas con alta erosión, donde la exposición directa de la roca madre es limitada.

► Interpretación de Datos Geoquímicos

Una vez que se han recopilado y analizado las muestras durante la fase de exploración geoquímica, el siguiente paso es la interpretación de los datos geoquímicos. Este proceso implica el procesamiento de la información obtenida para generar mapas geoquímicos que ilustran la distribución espacial de los elementos químicos en el área de estudio. Estos mapas son herramientas fundamentales que permiten visualizar áreas con concentraciones anómalas de metales, así como correlacionar estas anomalías con

características geológicas conocidas, como fallas o estructuras mineralizadas (Haldar, 2018).

La identificación de anomalías significativas es un aspecto central de esta interpretación, ya que estas anomalías pueden estar asociadas tanto a la mineralización primaria, que proviene de procesos geológicos, como a la mineralización secundaria, que puede resultar de procesos de alteración y concentración de metales en condiciones ambientales específicas. La capacidad para discernir entre estos tipos de mineralización es esencial para dirigir las futuras actividades de exploración, como la perforación y el muestreo adicional en áreas de interés (Marjoribanks, 2010).

Un desafío importante en la interpretación de datos geoquímicos es la identificación de falsas anomalías. Estas pueden surgir de errores en el muestreo, contaminación ambiental o efectos provocados por factores topográficos y climáticos. Por lo tanto, es esencial aplicar controles de calidad durante la recolección de muestras y en el análisis de laboratorio para minimizar estos riesgos. Un análisis cuidadoso y crítico de los datos recopilados ayudará a asegurar que las decisiones tomadas sobre la base de estos datos sean precisas y bien fundamentadas.

La interpretación de datos geoquímicos no solo se limita a la fase de exploración superficial; también se relaciona estrechamente con etapas posteriores de la exploración de depósitos polimetálicos. Los mapas geoquímicos generados son utilizados para planificar actividades de perforación y muestreo adicional y se tratará con mayor detalle en fases posteriores, lo que puede incluir la identificación de zonas específicas que requieren más investigación geológica o geofísica. Además, estos datos pueden ser integrados en modelos 3D que permiten a los geólogos visualizar la relación espacial entre diferentes variables geológicas y mineralógicas, facilitando así la comprensión del sistema mineral en su totalidad (Potts, 1987).

3.2.3. Exploración geofísica

La exploración geofísica es una herramienta crucial en la búsqueda de depósitos minerales, ya que permite detectar anomalías en el subsuelo que pueden estar asociadas con mineralización. A través de métodos geofísicos, se pueden

identificar variaciones en las propiedades físicas de las rocas sin necesidad de un contacto directo, lo que resulta en un menor impacto ambiental y una mayor cobertura de área a un costo relativamente bajo (Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007). Entre los métodos más comunes utilizados en esta disciplina se encuentran la magnetometría, gravimetría, polarización inducida (IP) y resistividad. Cada uno de estos métodos proporciona información valiosa sobre la estructura y composición del subsuelo, lo que ayuda a los geólogos a identificar prospectos de interés económico.

Los levantamientos magnetométricos y gravimétricos son fundamentales para identificar estructuras geológicas y cuerpos de roca que podrían contener mineralización. La magnetometría mide las anomalías del campo magnético de la Tierra, revelando la presencia de minerales y estructuras magnéticas que podrían estar relacionadas con depósitos mineralizados (Marjoribanks, 2010). La gravimetría, por su parte, mide las variaciones del campo gravitacional, lo que permite localizar estructuras geológicas y determinar diferencias de densidad asociadas con formaciones mineralizadas.

Adicionalmente, los métodos eléctricos como la polarización inducida (IP) y la resistividad son utilizados para detectar la presencia de mineralización diseminada o masiva, dado que las rocas mineralizadas presentan propiedades de carga y resistividad diferentes a las rocas encajantes (Gadallah & Fisher, 2009).

El resultado de estas actividades geofísicas se traduce en la generación de mapas geofísicos que indican la ubicación de posibles cuerpos mineralizados y estructuras geológicas relevantes. Esta información es esencial para guiar futuras actividades de exploración, como perforación y muestreo adicional. Por ejemplo, los mapas resultantes pueden ayudar a identificar zonas de interés que requieren una evaluación más detallada, lo que contribuye a optimizar los recursos y los esfuerzos en la exploración mineral. La interpretación de estos datos no solo es relevante en la etapa de exploración superficial, sino que también se utiliza para planificar y dirigir estudios más avanzados en la búsqueda de recursos polimetálicos (Dentith & Mudge, 2014).

En la Tabla 1 se resumen los métodos geofísicos usados comúnmente en la exploración de depósitos polimetálicos, donde se presenta el parámetro medido, la propiedad física y la principal aplicación.

MÉTODOS ELÉCTRICOS

Método	Parámetro medido	Propiedad física	Principal aplicación
Potencial espontáneo (SP)	Mide las diferencias del potencial natural, resultante de las reacciones electroquímicas del subsuelo	Anomalías del potencial espontáneo	Identificación de un cuerpo mineralizado si está ubicado entre la zona de oxidación y sobre el nivel freático.
Resistividad eléctrica	Mide las diferencias de potencial resultante, luego de introducir corrientes eléctricas artificiales en el subsuelo (flujo de corriente entre dos electrodos)	Resistividad eléctrica en el suelo, la roca y los fluidos en los poros	Modelos 2D y 3D de las estructuras del subsuelo que permiten identificar estructuras geológicas y límite litológicos.
Polaridad inducida (IP)	Mide la cargabilidad eléctrica del subsuelo (capacidad temporal de retener la carga eléctrica)	Cargabilidad: habilidad de acumular la carga	Identificar arcillas, grafito y sulfuros que tienen alta cargabilidad. Permite la localización de contactos y estructuras, la detección de sulfuros diseminados y zonas de alteración hidrotermal.

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

Método	Parámetro medido	Propiedad física	Principal aplicación
Radiometría	Medición de los rayos gamma que emiten isótopos de U, Th y K al desintegrarse	Reconocer diferentes tipos de roca a partir de su firma radioactiva distintiva	Se aplica en la búsqueda de minerales radioactivos. También es muy útil para discriminar unidades volcánicas y vulcano-sedimentarias. También se usa para identificar zonas con alteración argílica a través del contenido de K y para identificar yacimientos de tierras raras si existen altos contenidos de Th

Fuente: Kearey et al., 2002; Lowrie, 2007; Gadallah & Fisher, 2009; Dentith & Mudge, 2014

► Interpretación de resultados y selección de áreas prioritarias

La interpretación de resultados y selección de áreas prioritarias es un paso clave en el proceso de exploración de depósitos polimetálicos, ya que permite integrar los diferentes tipos de datos obtenidos, como información geológica, geoquímica y geofísica, con el fin de identificar las

zonas con mayor potencial mineral. Este proceso se enmarca en un enfoque multidisciplinario que busca reducir la incertidumbre geológica y optimizar la toma de decisiones para las siguientes fases de exploración (Smith, 2019; Brown y Clark, 2020).

El objetivo principal de esta etapa es consolidar toda la información recopilada en fases anteriores para definir áreas prioritarias que justifiquen un estudio más detallado. Al

combinar la cartografía geológica con los estudios geoquímicos y geofísicos, se crea un modelo más preciso del subsuelo, permitiendo identificar anomalías o concentraciones de metales que son indicativas de la presencia de un depósito polimetálico (Telford et al., 1990). Este paso está estrechamente relacionado con las fases previas, como la Fase 2: Exploración Superficial, donde la cartografía y el muestreo geoquímico permiten detectar las primeras señales de mineralización en la superficie (Evans, 1997). Los datos obtenidos en esta fase alimentan directamente el proceso de integración que se realiza en la interpretación de resultados.

Entre las actividades fundamentales, la integración de datos juega un rol central. Los estudios de cartografía geológica proporcionan un marco espacial y estructural del terreno, mientras que los datos geoquímicos revelan la concentración de metales en el suelo, permitiendo detectar áreas de enriquecimiento mineral (Smith, 2019). A su vez, los estudios geofísicos ofrecen información sobre las propiedades físicas del subsuelo, como la susceptibilidad magnética, densidad y conductividad, lo que facilita la identificación de estructuras favorables para la acumulación de minerales (Brown y Clark, 2020). Esta actividad se relaciona directamente con la Fase 3: Exploración del Subsuelo, ya que las áreas priorizadas durante la interpretación de resultados son las que serán sometidas a estudios más detallados, como la perforación exploratoria profunda (Dobrin y Savit, 1988).

La realización de un análisis preliminar es crucial para identificar las áreas de mayor interés que avanzarán a la siguiente fase de exploración. En este punto, se evalúan las anomalías geoquímicas y geofísicas en combinación con la geología local para descartar áreas sin potencial y priorizar las zonas más prometedoras (Evans, 1997). Este análisis se realiza utilizando herramientas de modelado geofísico en 2D y 3D, así como técnicas estadísticas avanzadas que permiten definir el tamaño y extensión de las anomalías detectadas (Telford et al., 1990). Este tipo de análisis es esencial para la Fase 4: Modelos y Estimación de Recursos Minerales, donde se busca una estimación más precisa del volumen y calidad de los recursos minerales, integrando ya la información proveniente de las perforaciones.

El resultado esperado de esta fase es la elaboración de un informe exhaustivo de interpretación y priorización. Este informe selecciona las áreas con mayor potencial, basándose en un análisis técnico riguroso que incorpora toda la

información disponible (Moon et al., 2006). Las áreas elegidas serán candidatas para actividades de perforación exploratoria o excavaciones adicionales, permitiendo pasar a las fases más avanzadas de exploración (Telford et al., 1990). El informe es vital para tomar decisiones informadas sobre dónde concentrar los recursos financieros y técnicos, minimizando los riesgos y maximizando el éxito del proyecto exploratorio (Moon et al., 2006).

► **Recomendaciones: exploración superficial**

- ✓ Implementar un enfoque sistemático para validar la información de cartografía a través de revisiones cruzadas con expertos y métodos de verificación. Esto asegura la fiabilidad de los datos recopilados.
- ✓ Fomentar la cooperación desde el inicio del proyecto entre geólogos, ingenieros y especialistas ambientales. Esta colaboración enriquecerá la comprensión de las características geológicas y su interacción con factores sociales y ambientales.
- ✓ Actualización Continua de Métodos: Establecer un protocolo de revisión constante que incorpore nuevos hallazgos y avances tecnológicos en la cartografía, asegurando así un proceso efectivo para identificar áreas mineralizadas.
- ✓ Proporcionar formación continua para el personal encargado de la recolección y análisis de muestras geoquímicas, garantizando el conocimiento de las mejores prácticas y técnicas analíticas, así como aspectos de seguridad y manejo de muestras (Potts, 1987).
- ✓ Realizar comparativas de métodos de muestreo para determinar cuál es el más adecuado para las condiciones geológicas específicas del área, optimizando la estrategia de muestreo y garantizando resultados representativos (Haldar, 2018).
- ✓ Desarrollar estrictos protocolos para minimizar la contaminación durante la recolección de muestras, utilizando herramientas limpias y capacitando al personal en el manejo adecuado de las muestras (Marjoribanks, 2010).
- ✓ Implementar un enfoque de muestreo adaptativo que ajuste la malla y estrategia en función de los resultados

preliminares. Esto permite comenzar con un muestreo más amplio y, al detectar anomalías, realizar muestreos más densos en áreas específicas (Haldar, 2018).

- ✓ Técnicas de Muestreo No Convencionales: Considerar el uso de técnicas no convencionales, como el muestreo de biota y aguas superficiales, para complementar los métodos tradicionales y enriquecer los datos geoquímicos.
- ✓ Establecer un sistema de monitoreo de datos en tiempo real durante las actividades de exploración geofísica. La utilización de tecnologías avanzadas, como sensores, permite identificar anomalías y ajustar metodologías instantáneamente (Kearey et al., 2002).
- ✓ Promover el uso combinado de técnicas geofísicas, como magnetometría, gravimetría y métodos eléctricos, para obtener una visión más completa del subsuelo y mejorar la interpretación geológica (Gadallah & Fisher, 2009).
- ✓ Crear un protocolo de validación de resultados geofísicos que incluya revisiones por parte de expertos y comparación con datos de perforación previos, asegurando la precisión y fiabilidad de los resultados.
- ✓ Establecer un proceso de revisión por pares en la interpretación de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos. Esto ayuda a identificar sesgos y mejora la calidad del análisis (Smith, 2019).
- ✓ Generar mapas que visualicen áreas con potencial mineral, considerando no solo la probabilidad de mineralización, sino también factores de riesgo como geología complicada y acceso logístico (Brown y Clark, 2020).
- ✓ Implementar un sistema para la actualización continua de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos. Esto facilitará la adaptación de modelos interpretativos a medida que avanza el proyecto (Telford et al., 1990).

Más información

- **Einaudi, M. T. (1997).** *Geology and Genesis of Ore Deposits. En: Economic Geology: Principles and Practice.* Geological Society of America. Boulder, CO. pp. 100-150.
- **Simmons, S. F., & Christenson, B. W. (1994).** *Geothermal Energy and the Future of Mining.* Geothermal Resources Council Transactions, 18, 511-516.
- **Dahlin, T. (2000).** *2D Resistivity Surveying for Environmental and Engineering Applications.* Geophysical Prospecting, 48(2), 85-98.
- **Klein, C., & Hurlbut, C. S. (1993).** *Manual of Mineral Science (23rd ed.).* Wiley. Nueva York, NY. pp. 300-350.
- **Dahlin, T., & Loke, M. H. (2002).** *Invited Review: A review of resistivity methods for environmental and engineering studies.* Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 7(2), 75-88)

Recursos en Línea

- **USGS (United States Geological Survey). (2023).** *Mineral Resources Online Spatial Data.* Recuperado de: <https://mrdata.usgs.gov>. Plataforma para acceder a datos espaciales sobre recursos minerales, incluyendo métodos de exploración.
- **Geological Society of America. (2022).** *Guide to Geologic Mapping and Fieldwork.* Recuperado de: <https://www.geosociety.org>. Proporciona recursos sobre técnicas de mapeo geológico y procedimientos de campo.
- **International Society for Geostatistics. (2023).** *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Engineering.* Recuperado de: <https://www.geostatistics.org>. Este recurso se centra en la aplicación de la geoestadística en la exploración geológica.

3.3. FASE 3: Exploración del Subsuelo

La Fase 3 de la exploración minera es crucial para definir con precisión la geometría, extensión y viabilidad de los depósitos polimetálicos. Esta etapa involucra una planificación detallada del programa de perforación, con énfasis en la selección de técnicas como la perforación diamantina, que permite obtener núcleos de alta calidad. Los núcleos perforados proporcionan información esencial para el análisis geológico y geotécnico, facilitando la construcción de modelos tridimensionales del yacimiento y optimizando la toma de decisiones estratégicas para las siguientes fases de desarrollo.

Durante esta fase, el control de calidad (QA/QC) adquiere una importancia central. La implementación de protocolos rigurosos, tanto en el muestreo como en el análisis geoquímico, asegura que los datos obtenidos sean fiables y precisos. Esto incluye la inserción de estándares certificados, duplicados y blancos, además del uso de técnicas geofísicas avanzadas, como la polarización inducida y la resistividad eléctrica. Estos métodos son clave para delimitar zonas de mineralización en profundidad y para integrar los resultados en modelos geológicos que permitan prever de manera más certera la continuidad de los recursos.

Asimismo, los estudios geotécnicos e hidrológicos juegan un papel fundamental en esta etapa. Estos análisis permiten evaluar la estabilidad del macizo rocoso, identificar zonas de riesgo y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos. La modelización hidrogeológica tridimensional, junto con estudios de permeabilidad y pruebas de bombeo, proporciona un conocimiento detallado del comportamiento del agua subterránea y su interacción con las formaciones geológicas. Esta información es crucial para garantizar

la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo, contribuyendo a la reducción de riesgos y optimización de la explotación del yacimiento.

3.3.1. Planificación y Diseño del Programa de Perforación

La planificación y diseño del programa de perforación es una etapa fundamental dentro de la Fase 3: Exploración del Subsuelo en programas de exploración minera, ya que establece la base para el éxito en la obtención de información crítica sobre la continuidad, geometría y calidad del depósito mineral. En esta fase, se utilizan los datos obtenidos en las fases superficiales, incluyendo estudios geoquímicos, geofísicos y cartográficos, para identificar las áreas prioritarias para perforación. Estos estudios permiten seleccionar las zonas con mayor potencial de mineralización y definir el diseño óptimo de la perforación, asegurando que se obtenga la información más representativa y precisa posible (Gadallah & Fisher, 2009).

El proceso de planificación implica seleccionar los tipos de perforación más adecuados para cada objetivo. Los dos principales métodos utilizados en esta fase son la perforación diamantina (DDH) y la perforación de circulación inversa (RC). La perforación diamantina es altamente valorada por su capacidad para obtener testigos de roca intactos, lo que permite un análisis detallado de la litología, las estructuras geológicas y la mineralización. Este método es ideal para estudios de alta resolución estructural, aunque

es más costoso y lento en comparación con otros métodos. Por otro lado, la perforación RC es más rápida y económica, pero proporciona fragmentos de roca más pequeños, lo que limita la resolución de la información estructural (Marjoribanks, 2010; Halder, 2018).

El diseño del programa de perforación debe considerar una serie de factores clave, como la geometría del cuerpo mineralizado, la morfología del terreno y las características geológicas del área. El espaciado entre perforaciones varía dependiendo del tipo de mineralización; en general, para depósitos diseminados o de gran extensión, se recomienda un espaciado de entre 50 a 100 metros, mientras que, en cuerpos más concentrados, como vetas o zonas de alta mineralización, se utilizan mallas más cerradas (Moon *et al.*, 2006). La correcta definición del espaciado es crucial para dimensionar la extensión lateral y vertical del depósito y para calcular el volumen del mineral, lo que en última instancia determinará si el proyecto es económicamente viable (Edwards & Atkinson, 1986; CIM, 2018).

La perforación es también el principal método para obtener información geológica tridimensional del yacimiento, permitiendo definir la tercera dimensión del depósito y su geometría en el subsuelo. El análisis detallado de los testigos de perforación y los resultados de los análisis químicos de las muestras extraídas permiten calcular la ley media del depósito, lo que es esencial para la evaluación económica final del proyecto. Así, la precisión en el diseño y ejecución del programa de perforación tiene un impacto directo en la toma de decisiones para el desarrollo futuro del yacimiento (Marjoribanks, 2010).

3.3.2. Perforación Exploratoria y Control de Calidad (QA/QC)

La perforación exploratoria es una de las actividades centrales dentro de la Fase 3: Exploración del Subsuelo, ya que permite obtener datos directos de la mineralización en profundidad. Este proceso involucra la ejecución de perforaciones en mallas cerradas o amplias, dependiendo de la extensión y tipo de depósito polimetálico. Las perforaciones pueden alcanzar profundidades de entre 200 y 600 metros, y proporcionan información clave sobre la continuidad y geometría del depósito (Dentith & Mudge, 2014)

El control de calidad y aseguramiento de la calidad (QA/QC) es fundamental durante esta etapa, garantizando la fiabilidad de los datos obtenidos. Para lograrlo, se implementan rigurosos protocolos de muestreo, que incluyen la recolección de duplicados de muestras, el uso de estándares y la inclusión de blancos en los lotes de muestras enviadas al laboratorio. Los geólogos desempeñan un papel esencial en esta fase, supervisando las perforaciones y asegurándose de que los testigos de perforación o fragmentos de roca se recuperen, registren y analicen adecuadamente, evitando cualquier tipo de contaminación o error en el proceso (Gadallah & Fisher, 2009).

► Perforación Diamantina

La perforación diamantina, también conocida como perforación “corazonada”, es ampliamente reconocida en la exploración de depósitos polimetálicos por su capacidad para obtener testigos sólidos de roca, lo que permite realizar un análisis geológico preciso tanto a nivel litológico como estructural. Este método utiliza una broca diamantada, que gira a alta velocidad en el extremo de la tubería de perforación, cortando un núcleo cilíndrico sólido de roca. Este núcleo es transportado hacia la superficie dentro de un tubo interior llamado barrenos. El barrenos retiene el núcleo durante la perforación y, una vez extraído, se procede a su registro y análisis (Halder, 2018).

Uno de los aspectos más destacados de la perforación diamantina es la capacidad de obtener testigos que mantienen la integridad estructural de las rocas, lo que permite a los geólogos observar de manera directa las fracturas, vetas, alteraciones hidrotermales y contactos litológicos. Esto es particularmente importante en la exploración de depósitos polimetálicos, donde la distribución espacial de los minerales está controlada en gran medida por estructuras geológicas complejas, como vetas, pliegues y fallas. Esta capacidad de la perforación diamantina es crucial para desarrollar modelos geológicos tridimensionales y estimar con precisión la continuidad de los cuerpos mineralizados en profundidad (Marjoribanks, 2010).

El tamaño del testigo puede variar según el diámetro de la broca utilizada, y se elige en función de los objetivos del programa de exploración y el tipo de mineralización que se busca. Los diámetros más comunes son:

- **BQ (36.4 mm):** utilizado principalmente en perforaciones preliminares y de reconocimiento inicial. Debido a

su menor tamaño, es ideal para identificar las primeras indicaciones de mineralización, aunque proporciona menos información estructural detallada que los diámetros mayores.

- **NQ (47.6 mm):** es el tamaño de testigo más utilizado en programas de exploración y estimación de recursos, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre costo y calidad de los datos geológicos. El diámetro NQ es lo suficientemente grande como para proporcionar testigos que permitan realizar análisis geotécnicos y geoquímicos detallados, manteniendo costos relativamente bajos.
- **HQ (63.5 mm):** recomendado en zonas de mineralización compleja o cuando se requiere un análisis estructural más detallado. El mayor diámetro del testigo HQ facilita el análisis de fracturamientos y alteraciones

que pueden ser difíciles de observar en testigos más pequeños. También es adecuado para áreas donde la competencia de la roca es baja, permitiendo una mejor recuperación del núcleo.

- **PQ (85 mm):** este diámetro más amplio se utiliza principalmente para obtener muestras metalúrgicas representativas, esenciales para estudios de procesabilidad de minerales en etapas avanzadas de la exploración y desarrollo de un proyecto minero (Moon et al., 2006).

La tabla 2 resume las medidas de los diferentes diámetros de perforación disponibles. Para exploración y estimación de recursos polimetálicos, el diámetro recomendado es NQ y HQ, también se usan diámetros BQ en casos excepcionales de perforaciones de reconocimiento iniciales, y diámetros PQ para tomar muestras de metalurgia.

Tabla 2. Diámetros de perforación.

Tamaño	Diámetro interior o del Testigo (mm)	Diámetro exterior o del pozo (mm)
AQTK	35,5	48
BQ	36,4	60
BQTK	40,7	60
NQ	47,6	75,7
NQTK (NQ2")	50,6	75,7
NQ3	45	75,7
HQ	63,5	96
HQ3	61,1	96
PQ	85	122,6
PQ3	83	122,6

Fuente: Autores.

La recuperación, los testigos de roca se someten a limpieza, clasificación y registro. Un geólogo describe sus características litológicas, estructurales y mineralógicas, como vetas mineralizadas y alteraciones hidrotermales. Luego, los testigos se cortan longitudinalmente: una mitad se guarda como referencia y la otra se envía al laboratorio para análisis geoquímico, donde se determinan las leyes de los metales y minerales asociados (Haldar, 2018).

La perforación diamantina es ideal para exploración en profundidad y áreas geológicamente complejas, ya que permite obtener núcleos que conservan contactos litológicos y detalles estructurales, esenciales para la modelización geológica tridimensional. Aunque es más costosa y lenta que otros métodos como la perforación de circulación inversa, sigue siendo irremplazable por la calidad de información que proporciona (Gadallah & Fisher, 2009).

La perforación diamantina orientada no solo ofrece un control preciso sobre la trayectoria del pozo, sino que también incorpora una metodología clave basada en el uso de núcleos orientados. Esta técnica permite registrar la orientación espacial exacta de las estructuras geológicas, como vetas, fracturas, foliaciones y planos de falla, proporcionando información esencial para la interpretación estructural del depósito (Dentith & Mudge, 2014). Los núcleos orientados se obtienen mediante herramientas especializadas que marcan un punto de referencia en el núcleo durante su extracción, facilitando su posterior análisis en laboratorio y en estudios detallados de las muestras. Este enfoque permite correlacionar de manera eficiente los datos obtenidos en subsuelo con los modelos geológicos tridimensionales, mejorando la precisión en la identificación y evaluación de zonas mineralizadas. Este tipo de metodología también es fundamental para la evaluación de la geometría de los cuerpos mineralizados y las características estructurales subyacentes, ayudando a detectar posibles patrones que puedan influir en la distribución de los recursos.

La implementación de esta metodología requiere una planificación meticulosa y la capacitación del personal para garantizar una correcta manipulación de los núcleos orientados, así como el uso de software especializado para la integración y análisis de datos (Marjoribanks, 2010). El proceso de orientación de los núcleos se lleva a cabo mediante herramientas como el orientador de perforación, que utiliza un dispositivo de marcaje en el núcleo, permitiendo determinar su azimut y ángulo de inclinación en el momento de la extracción. Esta información es fundamental para

el posterior análisis estructural y la correlación con la geometría de las formaciones geológicas. Además, el uso de software especializado, que integra datos geoespaciales y de perforación, permite crear modelos tridimensionales precisos que optimizan la estimación de recursos, generando una visión más clara de la distribución de los minerales. Aunque su aplicación inicial puede implicar un incremento en los costos del programa de exploración, los beneficios a largo plazo incluyen una mayor precisión en la identificación de áreas mineralizadas y un mejor diseño de perforaciones, lo que puede resultar en un ahorro significativo de recursos a largo plazo.

Los núcleos orientados permiten una mejor interpretación de la geología en tres dimensiones, proporcionando datos cruciales que contribuyen a la mejora de la precisión en la estimación de recursos y en la planificación de perforaciones. Además, el uso de esta técnica facilita la optimización de las campañas de perforación, al permitir un ajuste dinámico de la trayectoria de los pozos con base en información geológica más precisa y detallada. Este enfoque resulta especialmente valioso en terrenos complejos, donde las estructuras geológicas pueden ser irregulares o difíciles de predecir. La precisión obtenida mediante los núcleos orientados permite reducir los riesgos operacionales asociados con perforaciones no dirigidas o mal orientadas, y mejora la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, desde la exploración inicial hasta las fases de explotación. A medida que la geología se va conociendo con mayor exactitud, se pueden implementar estrategias más efectivas para el manejo de recursos, reduciendo costos y maximizando el retorno sobre la inversión.

► Perforación de Circulación Inversa (RC)

Es un método fundamental en la exploración minera, especialmente en las fases tempranas de evaluación de depósitos minerales superficiales. A diferencia de la perforación diamantina, que extrae un núcleo sólido de roca, la RC genera fragmentos de roca, también conocidos como ripios o “chips”, que son transportados rápidamente desde el subsuelo a la superficie utilizando aire comprimido. Esta técnica utiliza barras de perforación de doble pared: el aire comprimido se inyecta por el espacio entre las paredes y, a medida que el aire asciende por el conducto central, arrastra consigo los fragmentos de roca generados en el proceso de perforación. Este diseño permite que los ripios sean expulsados de manera continua, lo que acelera significativamente el proceso de perforación.

Los fragmentos de roca obtenidos en la perforación con circulación reversa (RC) se recogen en un ciclón, un dispositivo diseñado para disminuir la velocidad del flujo de aire y permitir la recolección eficiente de los ripios. La mayor parte de las barras de perforación empleadas en RC tienen un diámetro estándar de 15,2 cm, aunque algunas pueden alcanzar diámetros mayores, como 20,3 cm. Todas poseen longitudes estándar de 6,096 metros. Debido a estas dimensiones y al peso considerable de las barras, es necesario el uso de maquinaria especializada, como grúas o “*winch*”, para su manipulación correcta y para evitar daños durante el proceso.

El ciclón dirige los fragmentos de roca hacia compartimientos especiales llamados bandejas de ripios, donde los geólogos examinan cuidadosamente la composición mineralógica y litológica de los fragmentos. Aunque este método no permite obtener información estructural detallada, como la orientación y geometría de las vetas minerales (como sí lo hace la perforación diamantina), la perforación de circulación inversa proporciona datos valiosos sobre la mineralización superficial, permitiendo a los geólogos identificar áreas de interés para estudios más detallados.

La perforación de circulación inversa se emplea con frecuencia en depósitos someros, con profundidades que suelen oscilar entre 30 y 50 metros, especialmente en proyectos de minería a cielo abierto y en la exploración inicial de depósitos sedimentarios o metálicos. Su velocidad, eficiencia y menor costo en comparación con otros métodos la convierten en una opción preferida para programas exploratorios de gran escala. Además, es particularmente útil en terrenos con suelos húmedos, lodos y arcillas, donde otros métodos pueden resultar ineficaces o más costosos (Gadallah & Fisher, 2009). En estos casos, la RC ofrece un equilibrio entre eficiencia y representatividad geológica, permitiendo realizar análisis rápidos en suelos difíciles.

Una de las principales ventajas de la RC es su capacidad para manejar grandes volúmenes de perforación en poco tiempo, lo que la convierte en una técnica popular para el control de leyes en minas a cielo abierto y para la evaluación inicial de depósitos someros. Sin embargo, debido a la naturaleza fragmentada de los ripios, los detalles estructurales, como la orientación de vetas o fallas, no pueden obtenerse directamente. Aun así, los ripios permiten realizar análisis como pruebas de efervescencia con ácidos para detectar carbonatos o el uso de lupas binoculares para examinar texturas finas y detalles litológicos (Dentith & Mudge, 2014).

En conclusión, la perforación de circulación inversa (RC) es una técnica eficiente, rápida y económica que proporciona información crítica sobre la mineralización en etapas tempranas de la exploración minera. Si bien no ofrece la resolución estructural de la perforación diamantina, su capacidad para cubrir grandes áreas y generar datos rápidos la hace indispensable en proyectos de exploración a cielo abierto y control de ley en minas activas.

► **Aseguramiento de Calidad y Control de Calidad (QA/QC)**

El Aseguramiento de la Calidad (QA) y el Control de Calidad (QC) son pilares esenciales en la exploración minera, diseñados para garantizar que los datos recolectados a lo largo del ciclo del proyecto sean precisos, representativos y confiables. Estos programas no solo deben implementarse desde las fases iniciales, sino mantenerse y ajustarse continuamente durante todas las etapas del proceso de exploración, que incluyen el muestreo, análisis de laboratorio y la interpretación de resultados. La importancia de un programa robusto de QA/QC radica en su capacidad para minimizar errores inherentes al muestreo, mejorar la consistencia de los datos y asegurar que la información obtenida sea útil y confiable para la evaluación de recursos, y crucial para la toma de decisiones futuras (Simón, 2011).

El papel del QA/QC se intensifica en la Fase 3: Exploración del Subsuelo, donde la precisión en la recolección y análisis de datos es crítica para evaluar la calidad, extensión y viabilidad económica de los recursos minerales en profundidad. En esta fase, las actividades de muestreo son más específicas y requieren un control más riguroso, dado que las decisiones tomadas a partir de los resultados afectan de manera directa la planificación de perforaciones y estudios de reservas. Un programa de QA/QC bien estructurado supervisa y valida todas las operaciones, desde la toma de muestras de roca, suelo y sedimentos en el campo, hasta su procesamiento en el laboratorio. Este enfoque meticuloso se centra en minimizar errores comunes en la cadena de muestreo, embalaje, transporte y análisis geoquímico de elementos traza como Cu, Pb, Zn y Au (Stanley & Smee, 2007; Abzalov, 2008; Sans & Trotet, 2010; CIM, 2019).

Además, la correcta implementación de la cadena de custodia es clave para garantizar que la trazabilidad y seguridad de las muestras y los datos se mantengan intactos. Este sistema asegura que cada paso del proceso, desde la

recolección de la muestra en el campo hasta su análisis final, se realice bajo estrictas medidas de control. De esta manera, los datos pueden ser auditados y utilizados de forma confiable para evaluar recursos, planificar perforaciones y tomar decisiones críticas en las fases posteriores del proyecto minero.

El Aseguramiento de la Calidad (QA): el Aseguramiento de la Calidad (QA) en la exploración minera es un enfoque sistemático y preventivo que busca evitar errores en cada etapa del proceso, desde la planificación inicial hasta el análisis final de las muestras. El objetivo es garantizar que las operaciones se realicen correctamente desde el inicio, evitando que problemas de calidad comprometan la integridad de los datos en fases posteriores del proyecto. Para lograrlo, se implementa un sistema integral de control que aborda aspectos clave de prevención, estandarización y formación del personal, asegurando la consistencia y confiabilidad de los resultados a lo largo del ciclo de vida de la exploración. A continuación, se destacan los elementos esenciales de este enfoque:

- **Prevención de errores:** en la fase de planificación inicial, se identifican de manera proactiva las áreas críticas donde pueden surgir errores, tales como la ubicación inexacta de los puntos de muestreo, la manipulación y transporte inadecuados de las muestras, y las posibles interferencias químicas que pueden surgir durante los análisis en el laboratorio. Esta identificación temprana de fuentes de error es crucial, ya que permite la implementación de medidas correctivas antes de que los errores se acumulen y comprometan la calidad de los datos. La planificación anticipada garantiza que las actividades de exploración se realicen con un alto grado de precisión y control, minimizando la posibilidad de errores sistemáticos y aleatorios a lo largo del proyecto (Stanley & Smee, 2007).
- **Protocolos estandarizados:** la estandarización de los procedimientos es uno de los pilares fundamentales del QA. El éxito de un programa de aseguramiento de la calidad depende en gran medida de la adopción de protocolos de trabajo bien definidos y documentados, los cuales deben cubrir todas las actividades relacionadas con la exploración. Estos protocolos incluyen la recolección de muestras, el transporte y almacenamiento, la preparación en laboratorio, y el análisis final de las mismas. La documentación precisa asegura que cada fase del proceso se ejecute de manera consis-

tente y reproducible, lo que es clave para garantizar la comparabilidad de los datos en diferentes momentos del proyecto (Haldar, 2018). La correcta selección de los puntos de muestreo, el uso apropiado de los equipos y el manejo seguro de las muestras son aspectos críticos que deben estar claramente definidos en estos protocolos. Además, cualquier desviación en los procedimientos debe ser documentada y abordada de inmediato mediante la implementación de acciones correctivas que restablezcan la consistencia y confiabilidad del proceso.

- **Capacitación continua:** el éxito de un sistema de QA no solo depende de la implementación de protocolos, sino también de la capacidad del personal para seguirlos correctamente. Para asegurar la correcta ejecución de los procedimientos, es fundamental que los geólogos, técnicos y personal de laboratorio reciban una capacitación continua en las mejores prácticas y tecnologías más avanzadas aplicadas a la exploración minera. Esta formación debe abarcar tanto los procedimientos operacionales como las técnicas de muestreo y análisis, además de incorporar actualizaciones sobre las normativas internacionales y los avances tecnológicos en el control de calidad (Potts, 1987). El objetivo de la capacitación continua es reducir el riesgo de errores humanos, que son una de las principales causas de inconsistencias en los datos recolectados. La inversión en la formación del personal no solo garantiza una mayor precisión en el trabajo de campo y laboratorio, sino que también contribuye a la mejora continua del sistema QA/QC.
- **Enfoque integral y resultados:** un enfoque integral del QA implica que cada una de las actividades del proyecto esté alineada con la visión de calidad desde el inicio, permitiendo el control estricto de los datos recolectados en cada etapa. La integración de las mejores prácticas, junto con la aplicación de tecnologías avanzadas y la estandarización de los procesos, asegura que la calidad de los datos se mantenga a lo largo de todo el proyecto. Esto no solo mejora la precisión y representatividad de los resultados, sino que también fortalece la toma de decisiones estratégicas, proporcionando a los tomadores de decisiones una base sólida de datos confiables y validados para la evaluación de recursos minerales y el desarrollo de las fases posteriores del proyecto (CIM, 2019).

Control de Calidad (QC): el Control de Calidad (QC) en un programa de exploración minera desempeña un papel crucial para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos a lo largo de todo el proceso de muestreo y análisis. Su objetivo principal es detectar y corregir defectos o variaciones en los resultados, asegurando que los datos sean representativos y válidos para la toma de decisiones en las siguientes fases del proyecto. El QC se implementa mediante la comparación de los resultados con estándares predefinidos y la inserción sistemática de muestras de control en diferentes etapas del proceso, desde la recolección de muestras en el campo hasta el análisis en el laboratorio (Stanley & Smee, 2007; Abzalov, 2011).

- **Inserción de muestras de control:** un programa efectivo de control de calidad en la exploración de depósitos polimetálicos incluye la inserción de tres (3) tipos principales de muestras de control: estándares, blancos y duplicados (Simón, 2011). Estos tipos de muestras se introducen a lo largo del proceso para validar la exactitud, precisión y consistencia de los resultados, y cada uno cumple un papel específico en el control de los errores.

1. Muestras Estándar: las muestras estándar son materiales de referencia certificados que tienen un tenor conocido y comprobado. Su función es monitorear la exactitud de los análisis realizados en el laboratorio. En exploración minera, es crucial seleccionar al menos tres (3) tipos de estándares que representen alta, media y baja ley, abarcando así un rango completo de tenores del depósito en estudio (Stanley & Smee, 2007; Percy, 2014). Estos estándares deben ser representativos de la mineralización del depósito y deben seguir los mismos procesos de digestión y análisis que las muestras recolectadas en campo para asegurar una comparación válida.

2. Blancos: las muestras blancas o estériles no contienen el elemento o metal de interés y se utilizan para detectar posibles contaminaciones durante las diferentes etapas de preparación y análisis de las muestras en el laboratorio. Los “blancos gruesos” se insertan para monitorear la contaminación durante el proceso de trituración, mientras que los “blancos finos” verifican la contaminación durante el análisis químico (Geboy & Engle, 2011). Estas muestras deben insertarse de manera estratégica, especialmente después de muestras de alta ley, para asegurarse de que el equipo utilizado

no contamine las siguientes muestras. Un blanco limpio y bien insertado debe mostrar valores cercanos a cero (0), lo que indicaría que no ha habido contaminación.

3. Duplicados: Las muestras duplicadas son una herramienta crítica para evaluar la precisión del muestreo y el análisis, tanto en campo como en laboratorio. Los duplicados de campo se toman en el mismo sitio que las muestras originales para evaluar la variabilidad natural del terreno, mientras que los duplicados de laboratorio se utilizan para verificar la precisión en las fases de preparación y análisis de la muestra (Abzalov, 2008). La comparación entre el duplicado y la muestra original proporciona información sobre la consistencia del proceso y ayuda a identificar posibles problemas en la toma de muestras o en el tratamiento en laboratorio.

Tasa de inserción: aunque no existe un consenso universal sobre la tasa exacta de inserción de muestras de control, la industria minera generalmente recomienda que aproximadamente el 20 % de las muestras totales correspondan a muestras de control, incluyendo estándares, blancos y duplicados. Esta tasa de inserción es suficiente para garantizar la robustez estadística en la validación de los resultados (Simón, 2011). En lotes pequeños de datos, la inserción de muestras de control puede aumentar para garantizar un control de calidad adecuado, ya que un mayor número de muestras de control ayuda a obtener métricas más confiables sobre la calidad del muestreo y del procesamiento.

- **Proceso de validación:** el proceso de validación de los resultados dentro del programa de QC implica la revisión inmediata de cada lote de datos analizados en el laboratorio. Los resultados deben ser comparados con los criterios predefinidos en los protocolos de control de calidad. Si se detectan discrepancias o anomalías, se deben aplicar medidas correctivas que pueden incluir la repetición de análisis, la inserción de nuevos controles o, en algunos casos, el remuestreo del área afectada.

Además, es recomendable incluir una verificación externa de los resultados mediante el envío de muestras de control a laboratorios independientes, lo que añade una capa adicional de validación y refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos (Percy, 2014). Esta práctica, conocida como “verificación cruzada”, es par-

tualmente valiosa cuando se toman decisiones críticas, como la estimación de recursos minerales.

Cadena de custodia: la cadena de custodia en el sector minero es un conjunto de procedimientos controlados y rigurosamente vigilados que aseguran la trazabilidad de las muestras y datos recolectados durante todo el ciclo de exploración, desde la concepción hasta los resultados finales. Este sistema es fundamental para mantener la integridad de la información y evitar cualquier pérdida, distorsión o manipulación de los datos a lo largo de cada etapa del proyecto, ya que su buen manejo es clave para garantizar la calidad y confiabilidad de las decisiones futuras. La correcta implementación de la cadena de custodia permite, además, optimizar la eficiencia del proceso y aplicar medidas correctivas en caso de detectar irregularidades.

El concepto de cadena de custodia incluye varias medidas de control y seguridad diseñadas para monitorear de forma sistemática cada fase del proyecto, desde el campo hasta el laboratorio, asegurando que la información técnica se mantenga intacta y que los datos recolectados puedan ser utilizados de manera confiable. Este enfoque es esencial en las actividades de exploración minera, donde la precisión y calidad de los datos son críticas para la evaluación de recursos minerales. A continuación, se mencionan algunos aspectos clave de la cadena de custodia:

- **Control y seguimiento de la información:** la trazabilidad de las muestras debe estar asegurada desde el momento en que son recolectadas en campo hasta su análisis en laboratorio. Cada muestra debe estar correctamente etiquetada, documentada y almacenada bajo condiciones adecuadas. Las libretas de campo, los formatos y las planillas de registro deben ser diligenciados de manera meticulosa y siguiendo guías técnicas específicas que incluyan descripciones geológicas, geoquímicas y geofísicas. Estos mecanismos no solo garantizan la trazabilidad, sino que permiten auditorías y verificaciones futuras. Además, la actualización continua de la base de datos garantiza que toda la información se conserve y gestione correctamente durante el ciclo completo del proyecto (CIM, 2019).
- **Preservación de la información:** una vez recolectados los datos, su preservación es de suma importancia para evitar cualquier manipulación, alteración o pérdida de información técnica crítica. Las muestras deben ser manipuladas con extremo cuidado, utilizando pro-

cedimientos de seguridad y sistemas de etiquetado que permitan su correcta identificación y seguimiento. Este proceso implica no solo la seguridad física de las muestras, sino también la protección digital de los datos recolectados y su almacenamiento en sistemas seguros que aseguren su integridad a lo largo del tiempo (Abzalov, 2011).

- **Seguridad de los datos:** la seguridad en el manejo de la información es un pilar fundamental de la cadena de custodia. Se deben implementar protocolos de seguridad estrictos que garanticen que los datos técnicos sean protegidos contra manipulaciones no autorizadas o pérdidas accidentales. Además, se recomienda el uso de sistemas digitales seguros, como bases de datos con acceso controlado y cifrado de la información, lo cual asegura que la información técnica sea confiable, íntegra y útil para la evaluación de recursos, la planificación estratégica y toma de decisiones a lo largo de todas las fases del proyecto (Percey, 2014).

La cadena de custodia en la exploración minera es crucial para garantizar la trazabilidad y seguridad de las muestras y datos a lo largo de todo el proceso. Esta estructura se basa en varios pilares fundamentales que aseguran la integridad de la información y la confiabilidad de los resultados. A continuación, se detallan los pilares esenciales que sostienen este sistema y su importancia para el éxito de un proyecto minero:

- **Control y seguimiento continuo:** desde la recolección inicial de las muestras hasta su análisis final, la cadena de custodia garantiza que todas las actividades se desarrollen bajo un sistema de control y monitoreo continuo, lo que permite la evaluación de parámetros medibles en tiempo real.
- **Preservación y protección de datos:** la integridad de los datos debe ser preservada mediante la adopción de sistemas robustos de almacenamiento y manejo, asegurando que toda la información técnica quede protegida frente a cualquier tipo de alteración.
- **Seguridad en la gestión de la información:** los datos recolectados, tanto en formato físico como digital, deben estar respaldados por sistemas de seguridad que aseguren su disponibilidad y fiabilidad en el futuro, permitiendo así su uso para auditorías y análisis posteriores (Stanley & Smee, 2007).

La implementación de una cadena de custodia adecuada no solo garantiza la sostenibilidad y viabilidad de un proyecto minero, sino que también permite la correcta toma de decisiones estratégicas basadas en datos confiables. El cumplimiento riguroso de estos procedimientos es esencial para la evaluación precisa de los recursos minerales, minimizando los riesgos de errores o malas interpretaciones en las fases avanzadas del proyecto.

► Descripción de núcleos de perforación (“logueo” geológico y geotécnico)

En la exploración minera, el estudio de las muestras de núcleos de perforación se convierte en un proceso fundamental para evaluar la composición y características del subsuelo. Durante la Fase 3, la selección y preparación de estas muestras adquiere una relevancia crítica, ya que proporciona datos precisos sobre la mineralización en profundidad. Los núcleos obtenidos a través de la perforación son cuidadosamente registrados y clasificados para garantizar su integridad y orientación. Este proceso incluye la descripción geológica y geotécnica, donde se documentan meticulosamente las propiedades litológicas, mineralógicas y estructurales de cada núcleo, permitiendo así una evaluación continua y precisa de los depósitos mineralógicos. La correcta ejecución de este procedimiento es vital, dado que los resultados influyen directamente en la modelización geológica y en la posterior planificación de las operaciones mineras.

Además, la fase de análisis se complementa con rigurosos

protocolos de control de calidad (QA/QC) que aseguran la fiabilidad de los datos obtenidos. La utilización de formularios de *logueo* estandarizados y el registro detallado de información como la recuperación del núcleo, el índice de calidad de la roca (RQD) y la descripción de las discontinuidades son elementos esenciales para anticipar el comportamiento del macizo rocoso. Estos datos no solo permiten la identificación de zonas mineralizadas, sino que también son cruciales para el diseño de infraestructuras seguras y eficientes. En conjunto, el estudio de las muestras de núcleos y el análisis exhaustivo de la información recolectada forman la base para el desarrollo estratégico de proyectos mineros viables y sostenibles.

Descripción geológica de núcleos (“logueo” geológico)

Es un proceso crítico en la exploración minera, ya que constituye la base sobre la cual se construyen los modelos geológicos y se evalúan los recursos minerales. Este proceso implica la recopilación sistemática de datos geológicos mediante la utilización de abreviaciones, colores, números y códigos, que permiten condensar la información de forma precisa y accesible. El objetivo es describir las características de un depósito mineral de manera eficiente, facilitando su uso en estudios y modelamientos posteriores. Dado que cada depósito presenta particularidades únicas, es necesario diseñar una hoja de “*logueo*” adaptada a las características específicas del proyecto, de modo que se refleje de manera fiel lo observado en los núcleos o testigos de perforación (ver Figura 6)

Figura 6. Descripción en núcleos de perforación.



Fuente: Cortesía Aris Mining Corp.

La descripción geológica de núcleos es ejecutada por geólogos experimentados, quienes registran minuciosamente las características observadas en los núcleos perforados, como la litología, la mineralización, las alteraciones hidrotermales, la textura de la roca, y la presencia de vetas o fracturas. Estos aspectos son fundamentales para comprender la geometría y la composición del depósito, permitiendo identificar zonas de interés económico. El uso adecuado del “logueo” es crucial para el posterior análisis y toma de decisiones sobre la viabilidad de la explotación minera (ver Figura 7).

El registro de los sondajes, producto de la descripción geológica, se utiliza para generar secciones geológicas que ilustran la geometría del subsuelo del yacimiento. Estas secciones son representaciones visuales clave que permiten entender la disposición y extensión de los cuerpos mineralizados en el espacio. En la actualidad, la tendencia es realizar el *logueo* de manera digital, ya sea mediante hojas de cálculo o sistemas de bases de datos, lo que reduce el riesgo de errores de transcripción y mejora la integridad de los datos recolectados. En algunos casos, el registro se lleva a cabo directamente en dispositivos electrónicos como tabletas, entre otros, que transfieren automáticamente la información a una base de datos central, garantizando la exactitud del proceso (Halder, 2018; Marjoribanks, 2010).

Un aspecto esencial del “logueo” geológico es la definición de los intervalos de muestreo. Antes de iniciar el registro, el geólogo debe marcar los intervalos de donde se tomarán las muestras y asegurarse de introducir adecuadamente las muestras de control necesarias para el análisis. Este control asegura que los datos obtenidos durante el proceso de perforación sean representativos y fiables para los análisis geoquímicos. Posteriormente, se toman fotografías de los testigos de perforación y se marca la línea de corte del núcleo, que es crucial para separar las muestras de manera uniforme y representativa.

Figura 7. Testigo de perforación mineralizado.



Fuente: Autores

Cada vez que se detecta un cambio significativo en alguna de las propiedades geológicas previamente definidas, por ejemplo, en la litología, textura o grado de alteración, se genera un nuevo intervalo de “logueo”, que permite una descripción detallada y segmentada de las diferentes fases geológicas del yacimiento. Esta estructura asegura que toda la información relevante sea documentada de manera clara y precisa, facilitando su posterior uso en la construcción de modelos geológicos tridimensionales y en la planificación de campañas de perforación adicionales (Potts, 1987). Finalmente, el proceso de “logueo” no solo es fundamental para la evaluación de los recursos minerales, sino también para la integración de los datos recolectados en los sistemas de gestión de información geológica. Una correcta ejecución de la descripción de testigos de perforación contribuye a mejorar la eficiencia y precisión en la toma de decisiones estratégicas para el desarrollo del proyecto minero, reduciendo riesgos técnicos y optimizando la exploración de los depósitos polimetálicos (Marjoribanks, 2010; Halder, 2018).

Descripción geotécnica y estructural de núcleos (“logueo” geotécnico)

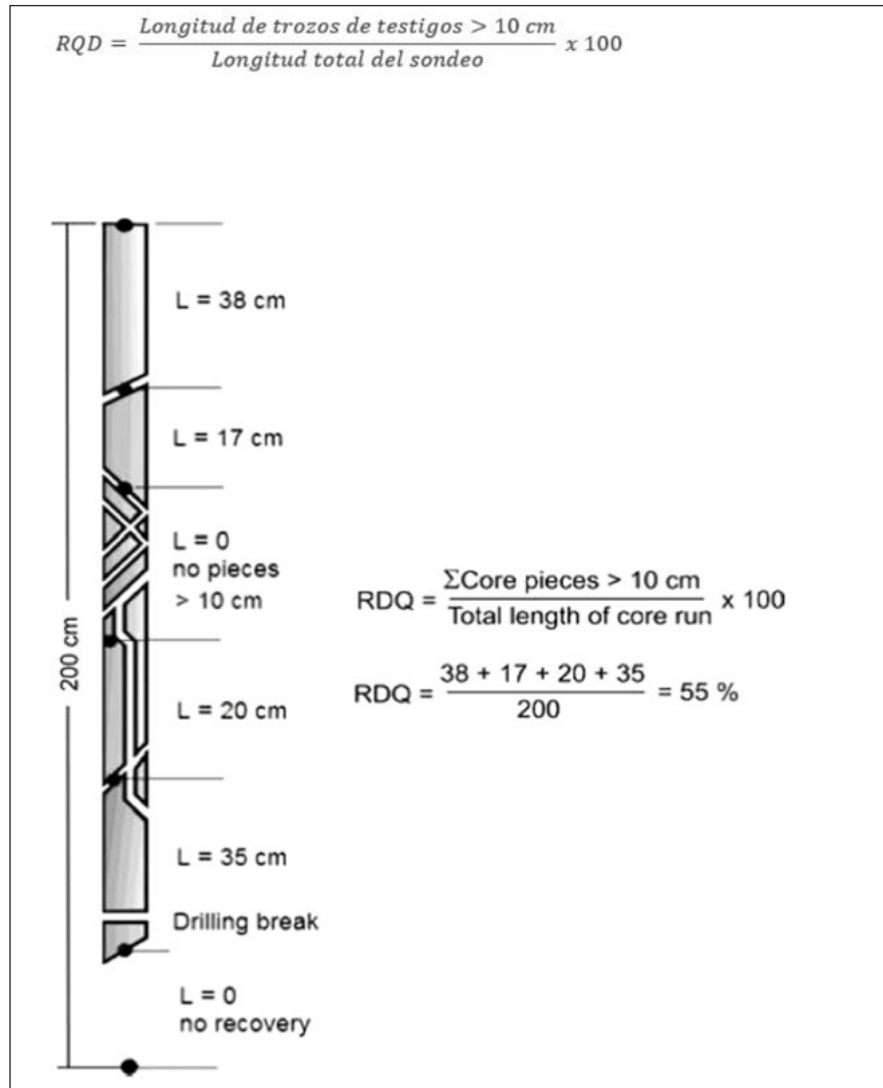
La descripción geotécnica y estructural de los núcleos de perforación constituye una actividad fundamental en la evaluación del macizo rocoso para cualquier proyecto minero. Este proceso no solo permite caracterizar las condiciones geomecánicas del macizo, sino que también proporciona los datos esenciales para el diseño de los futuros métodos de explotación, ya sea subterránea o a cielo abierto. La descripción geotécnica, realizada por intervalos de perforación (denominados corridas), implica la recopilación de parámetros claves como la recuperación de núcleo, el índice de calidad de la roca (RQD), la frecuencia de fracturas, el grado de alteración, la dureza de la roca y el índice de meteorización. Estos indicadores son esenciales para evaluar la integridad y estabilidad del macizo, permitiendo anticipar comportamientos del terreno que influyen directamente en la seguridad y eficiencia de las operaciones mineras (Deere, 1963; Barton & Choubey, 1977).

La recuperación del núcleo es un indicador preliminar, pero crucial para la calidad de la roca, y se define como el porcentaje del núcleo extraído en comparación con la longitud perforada. Este valor se calcula midiendo la cantidad de núcleo dentro del tubo de perforación y comparando esa longitud con el avance real de la perforación. Idealmente, una recuperación del 100 % indica un macizo cohesivo, mientras que porcentajes menores pueden sugerir fracturamiento intenso, zonas de cizalla o problemas de perforación, todos los cuales deben ser documentados detalladamente para ajustar los planes de diseño geotécnico (Deere, 1963).

Adicionalmente, el cálculo del índice de calidad de la roca (*Rock Quality Designation Index* por sus siglas en inglés RQD) proporciona un análisis más profundo de la competencia del macizo. Este índice se calcula considerando únicamente los fragmentos de núcleo intactos que miden más de 10 cm de longitud, descartando aquellos menores debido a su fracturamiento. El RQD (ver Figura 8) es clave para la clasificación del macizo rocoso en diferentes categorías de calidad, que van desde “muy buena” para valores superiores al 90 %, hasta “mala” cuando el índice es inferior al 50 %. Este parámetro es crítico para definir los métodos de soporte y reforzamiento necesarios durante las fases de desarrollo y explotación (Palmström, 2005; Goodman, 1989).

El “logueo” estructural complementa esta evaluación al registrar las características de las discontinuidades geológicas, tales como fracturas, fallas, planos de estratificación, foliaciones y otras estructuras relevantes. La descripción estructural es crucial para comprender cómo estas discontinuidades afectan la estabilidad del macizo y la distribución de los minerales. El análisis estructural incluye la medición de ángulos alfa y beta para determinar la orientación de las fracturas, además de características como rugosidad, relleno de fracturas y condiciones de alteración que podrían influir en el comportamiento mecánico de la roca (Hudson & Harrison, 1997). Este tipo de “logueo” es indispensable para la planificación de excavaciones mineras seguras y efectivas, ya que permite prever zonas de debilidad que podrían requerir un tratamiento especial.

Figura 8. Ejemplo de medición del RQD



Fuente: Hoek, 2007

En el sitio de perforación, el control inicial de los núcleos incluye la verificación de que los testigos, los tacos de metraje y la línea de orientación estén en orden, lo que es vital para asegurar la precisión en el posterior “logueo” y análisis. En casos donde se utiliza la perforación orientada, como se explicó en la sección “perforación diamantina”, la orientación del núcleo debe marcarse mientras aún está en el tubo interno, permitiendo una correcta referencia de las estructu-

ras geológicas observadas (Moon et al., 2006). Este control garantiza que la información estructural capturada sea representativa y precisa, proporcionando datos críticos para el modelado tridimensional de las zonas mineralizadas.

Una vez que se completa la descripción geológica, geotécnica y estructural, toda la información recopilada se almacena en una base de datos centralizada, garantizando que los

registros estén disponibles para futuras consultas o para modelización adicional. Este proceso de almacenamiento también incluye el resguardo físico de los núcleos en instalaciones especializadas, donde los testigos son catalogados y almacenados en bandejas para preservar su integridad. Es fundamental que tanto la información digital como los núcleos físicos se mantengan en condiciones adecuadas, ya que estos datos pueden ser consultados en etapas posteriores del proyecto para validar estimaciones o realizar análisis adicionales, como estudios de estabilidad o pruebas metalúrgicas (Hudson & Harrison, 1997).

La importancia de estos datos no se limita únicamente a la fase de exploración, sino que también juega un papel clave en la estimación de recursos y reservas. Un análisis adecuado del RQD, la recuperación de núcleo y las características estructurales del macizo permite una evaluación más precisa de la continuidad de los cuerpos mineralizados y su potencial económico, influenciando así las decisiones estratégicas en el desarrollo del proyecto.

Almacenaje de núcleos en la plataforma de perforación

El almacenaje de núcleos en la plataforma de perforación es esencial para asegurar la integridad y trazabilidad de las muestras. Los núcleos se colocan en cajas de madera o metal (ver Figura 9), cuyas dimensiones varían según el diámetro del núcleo. Por ejemplo, las cajas para núcleos HQ (63.5 mm) tienen 90 cm de largo, 38 cm de ancho y 6.9 cm de altura, permitiendo almacenar unos 3 metros de núcleo. Para núcleos NQ (47.6 mm), las cajas son similares, pero más bajas, con capacidad para 4 metros (Edwards & Atkinson, 1986). El operario organiza los núcleos de forma ordenada en las cajas, usando tacos de avance y pérdida para registrar el metraje de cada corrida y las posibles pérdidas de muestra. Una vez llenas, las cajas se etiquetan con datos clave y se preparan para su transporte (Marjoribanks, 2010).

Figura 9. Ejemplo de la medición de la recuperación de la muestra en el núcleo de perforación



Fuente: Autores

Al llegar a la bodega, las cajas se etiquetan con el número del pozo, el número de caja y el metraje inicial y final, asegurando su identificación precisa. Los separadores dentro de las cajas también llevan anotaciones del metraje para facilitar el análisis (ver Figura 10). Este sistema garantiza la trazabilidad de los núcleos, que son cruciales para análisis posteriores (Moon et al., 2006). Los testigos de perforación

se dividen en dos (2) mitades: una se guarda para estudios futuros y la otra se envía a laboratorios para análisis geoquímicos. Las fracciones no usadas se almacenan para estudios adicionales y se toman fotografías de los testigos para documentar sus características (Marjoribanks, 2010; Haldar, 2018).

Figura 10. Marcado lateral y superior de las cajas de núcleo



Fuente: Autores

La mayor fragmentación y la falta de recuperación total también dificultan la determinación de parámetros clave como la orientación de las vetas o fallas, lo que puede influir directamente en la estimación de los recursos y en la planificación de futuras perforaciones. Aunque los ripsos proporcionan información útil sobre la composición química de la roca, la calidad y precisión de los datos estructurales pueden verse comprometidos, lo que hace necesario complementar este tipo de muestreo con otras técnicas, como la perforación diamantina, para obtener un modelo geológico más preciso (Thompson & Walsh, 1983; Moon et al., 2006).

Cuando no se recuperan testigos de roca sólidos, se recurre a la extracción de fragmentos o "cuttings" del material removido, algo común en técnicas como la perforación de circulación inversa (RC). Este método, aunque útil, presenta desventajas, ya que la fragmentación del material y la falta de continuidad de las muestras dificultan la interpretación geológica. La ausencia de un núcleo sólido impide observar

directamente la geometría de las estructuras geológicas, lo que puede reducir la precisión de los modelos geológicos, especialmente en áreas con mineralización compleja.

Preparación y análisis de las muestras

La preparación y análisis de muestras de núcleos de perforación son esenciales para la exploración minera, proporcionando datos cruciales sobre la composición y estructura de los cuerpos mineralizados (ver Figura 11). El proceso comienza con el "logueo" geológico, donde un geólogo determina los intervalos de muestreo según el tipo de depósito, ajustando la estrategia a la distribución de la mineralización. En depósitos diseminados, se recomiendan intervalos de muestreo constantes, mientras que en depósitos vetiformes o irregulares se utilizan intervalos más selectivos para caracterizar mejor el recurso (Haldar, 2018).

Figura 11. Núcleo orientado preparado para ser muestreado.



Fuente: Autores

La muestra es preparada con una línea de orientación para el corte, reflejando características estructurales y mineralógicas importantes. El núcleo se corta usando una sierra diamantada, asegurando que las mitades del núcleo se conserven correctamente para análisis posteriores. Una de las mitades se empaqueta, se etiqueta y sella garantizando su trazabilidad, la otra queda como respaldo del muestreo (Marjoribanks, 2010; CIM, 2018).

Los resultados obtenidos sirven para construir modelos geológicos detallados que permiten la estimación de recursos minerales siguiendo estándares internacionales como JORC o NI 43-101 y demás estándares acogidos por CRIRSCO. Esto es clave para el diseño minero y la planificación, permitiendo calcular la cantidad y calidad del mineral y establecer planes de explotación eficientes. Además, los resultados de los análisis, junto con estudios de viabilidad, son fundamentales para atraer inversiones y asegurar la viabilidad económica del proyecto (CIM, 2018).

3.3.3. Ensayos Geoquímicos y Geofísicos

En la Fase 2 de la exploración minera, se abordó de manera preliminar la importancia de los ensayos geoquímicos y geofísicos en la identificación de mineralización superficial. Sin embargo, en la Fase 3, la relevancia de estos análisis se intensifica, ya que se centran en la confirmación y delimitación de la mineralización en profundidad. A medida que se avanza las perforaciones, el análisis detallado de los núcleos de perforación se convierte en un elemento clave para evaluar la composición química y mineralógica de las zonas identificadas. El uso de técnicas avanzadas como la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) y los Ensayos al Fuego no solo permite la identificación de elementos traza y metales preciosos, sino que también proporciona datos esenciales para la evaluación económica del yacimiento y la planificación estratégica de las operaciones mineras.

Paralelamente, los ensayos geofísicos juegan un papel fundamental en esta fase, aportando información crítica sobre las propiedades físicas del subsuelo. Métodos como la polarización inducida, la resistividad eléctrica, la gravimetría y la magnetometría permiten delinear con precisión la geometría del depósito y detectar cuerpos mineralizados a mayor profundidad. La integración de los resultados de los ensayos geoquímicos y geofísicos en un modelo geológico tridimensional no solo enriquece la comprensión del yacimiento, sino que también optimiza la toma de decisiones estratégicas en las etapas posteriores del desarrollo minero.

► Ensayos geoquímicos

La selección y preparación de muestras, abordadas inicialmente en la Fase 2 durante la exploración superficial, adquieren un papel aún más crucial en la Fase 3, donde la precisión y el refinamiento son fundamentales para confirmar y delimitar la extensión de la mineralización en profundidad. En esta etapa, el muestreo debe ser altamente preciso, dado que se realiza sobre núcleos de perforación que atraviesan las estructuras clave identificadas previamente. Estos núcleos, una vez extraídos, se cortan longitudinalmente y se dividen en dos (2) mitades. Una mitad se envía a laboratorios especializados para realizar análisis geoquímicos detallados, mientras que la otra mitad se conserva en la litoteca como material de referencia para estudios futuros y verificación. Este enfoque garantiza que la información obtenida sea representativa y permita una evaluación continua y precisa del depósito en etapas posteriores del proyecto (Potts, 1987).

Como se mencionó previamente, los rigurosos protocolos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) continúan siendo esenciales en esta fase para garantizar la precisión de los resultados analíticos. La inserción sistemática de duplicados, estándares certificados y muestras blancas sigue siendo clave para mantener la fiabilidad de los análisis, especialmente en profundidades mayores, donde los resultados juegan un papel crucial en la definición del modelo geológico del depósito (Klockenkämper, 2014).

En esta fase, la selección de las secciones a analizar es crítica, ya que los ensayos deben centrarse en aquellas zonas que presentan signos evidentes de mineralización, alteración hidrotermal o estructuras que potencialmente alberguen recursos minerales. Los núcleos se muestrean sistemáticamente a lo largo de toda la perforación, seleccionando segmentos que incluyan tanto áreas mineralizadas como zonas adyacentes no mineralizadas, con el fin de establecer un contraste geoquímico adecuado y comprender mejor la zonificación del yacimiento (Weiss, 2005).

A lo largo de la Fase 3, se emplean técnicas analíticas avanzadas que permiten obtener una comprensión detallada de la composición química de las áreas profundas del yacimiento. Las siguientes técnicas son esenciales para definir la continuidad de los recursos y su viabilidad económica:

- **ICP-MS y HR-ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente y Alta Resolución):** Aunque la técnica ICP-MS ya se mencionó en la Fase 2, en la Fase 3 adquiere una relevancia mucho mayor debido a su capacidad para detectar elementos traza en mayores profundidades. La ICP-MS es crucial para identificar y cuantificar elementos como Cu, Pb, Zn y otros metales estratégicos en zonas profundas, lo que resulta esencial para tomar decisiones sobre la continuidad de las operaciones de exploración y el desarrollo económico del yacimiento. La HR-ICP-MS (ICP-MS de Alta Resolución), por su parte, mejora aún más la precisión de los análisis, permitiendo la identificación de isótopos y elementos en concentraciones extremadamente bajas, lo que contribuye significativamente a la modelización detallada del yacimiento y a una evaluación más precisa del potencial minero (Thompson & Walsh, 1983).
- **Ensayos al Fuego:** Esta técnica, ampliamente utilizada en fases superficiales para la detección de metales preciosos como Au y Ag, sigue siendo crítica en la Fase 3. Sin embargo, en esta fase se complementa con la ICP-MS, proporcionando un análisis más completo y detallado de la distribución de metales preciosos en profundidad. La combinación de estas técnicas permite identificar y cuantificar las trazas de Au y Ag en diversas unidades litológicas, lo que resulta esencial para una evaluación económica exhaustiva del depósito (Gill, 1997). Además, el uso conjunto de los ensayos al fuego e ICP-MS facilita la optimización en la toma de decisiones sobre la explotación de las zonas con mayor contenido metálico.

La integración de estas técnicas avanzadas en la Fase 3 no solo asegura un análisis más profundo y detallado de los recursos, sino que también optimiza la capacidad para planificar y tomar decisiones estratégicas en las fases posteriores del proyecto, como la fase de desarrollo y producción del yacimiento. Los resultados de los ensayos geoquímicos permiten generar modelos más precisos del yacimiento, mejorando la estimación de recursos y la evaluación económica del depósito, lo que es fundamental para reducir incertidumbres y mitigar riesgos en la planificación minera (Potts, 1987; Weiss, 2005; Klockenkämper, 2014).

► Ensayos geofísicos

En la Fase 3 de la exploración de depósitos polimetálicos, los estudios geofísicos adquieren una importancia fundamental para la caracterización detallada de las propiedades físicas del subsuelo. A diferencia de la Fase 2, donde se realizaron estudios geofísicos preliminares, aquí se busca obtener datos más profundos y específicos que permitan identificar y definir con precisión las zonas mineralizadas. La información obtenida a través de técnicas geofísicas es crucial, ya que no solo establece la geometría del depósito, sino que también optimiza la planificación de perforaciones futuras y el diseño de la mina.

Uno de los métodos más relevantes en esta etapa es la polarización inducida (IP), que se aplica de manera más exhaustiva para detectar sulfuros diseminados y cuerpos mineralizados en profundidades significativas. Este método mide la respuesta eléctrica de las rocas, lo que permite identificar zonas con características de mineralización no visibles en los núcleos de perforación. Al analizar los perfiles geofísicos generados por esta técnica, se obtiene información sobre la extensión horizontal y la continuidad vertical de las zonas de interés, lo que resulta esencial para entender la configuración del yacimiento y priorizar las áreas de perforación. La polarización inducida es particularmente efectiva en esta fase, ya que puede identificar cuerpos mineralizados que se encuentran más allá del alcance de la perforación estándar (Gadallah & Fisher, 2009).

Complementando la polarización inducida, se utiliza la resistividad eléctrica para mapear la distribución de las rocas en función de su capacidad para resistir el flujo eléctrico. Esta técnica ayuda a identificar cambios litológicos y detectar cuerpos con alta conductividad, que suelen estar asociados con mineralizaciones metálicas profundas. Así, los datos obtenidos a través de la resistividad eléctrica enriquecen la interpretación geológica, permitiendo una identificación más precisa de las áreas de interés (Dentith & Mudge, 2014).

Además, los métodos de gravimetría y magnetometría son esenciales para detectar variaciones en la densidad del subsuelo y la presencia de minerales magnéticos. La gravimetría mide las variaciones en el campo gravitacional, lo que permite identificar estructuras geológicas que pueden estar asociadas con depósitos minerales, mientras que la magnetometría revela anomalías en el campo magnético terrestre, facilitando la determinación de la ubicación y ex-

tensión de cuerpos mineralizados. Estos métodos, combinados con las técnicas de polarización inducida y resistividad, ofrecen una comprensión más completa de la geometría y estructura del depósito, ayudando a refinar las zonas de perforación y a identificar áreas de interés para estudios adicionales (Thompson & Walsh, 1983).

En esta Fase 3, se lleva a cabo el perfilado geofísico en pozos, que implica una caracterización geofísica detallada a lo largo del pozo de perforación. A medida que la sonda se introduce en el pozo, se registran variaciones en propiedades físicas como densidad, resistividad y susceptibilidad magnética. Estos datos complementan la información obtenida de los núcleos de perforación y son cruciales para refinar el modelo geológico tridimensional del depósito.

Los registros eléctricos juegan un papel fundamental en la caracterización del subsuelo, ya que son obtenidos mediante sondas que miden propiedades geológicas, mecánicas y fisicoquímicas (ver Tabla 3). La capacidad de estos registros para capturar una amplia gama de información sobre las rocas en el subsuelo es crucial para determinar las características y propiedades del macizo rocoso. Durante el proceso de registro eléctrico, es esencial seguir protocolos rigurosos que aseguren la calidad y validez de los datos obtenidos, minimizando así la incertidumbre sobre la ubicación espacial de los depósitos. Un enfoque metódico en la recolección y análisis de estos datos es fundamental para garantizar que las decisiones sobre la exploración y el desarrollo minero estén bien fundamentadas (Kearey et al., 2002; Lowrie, 2007).

Los usos de los registros eléctricos son amplios e incluyen la evaluación de las propiedades del macizo rocoso, como la mineralogía y la resistencia. Estos datos son críticos para la geonavegación y la exploración, ayudando a definir los límites y contactos litológicos, así como a identificar y cuantificar el macizo rocoso. Esto no solo optimiza los recursos en las etapas de explotación y producción, sino que también contribuye a una mejor relación costo-beneficio en las fases subsecuentes del proyecto, lo que es vital para la viabilidad y sostenibilidad del desarrollo minero a largo plazo.

Los ensayos geofísicos en esta fase de exploración son fundamentales para lograr una comprensión profunda de la geología del subsuelo. La integración de técnicas como la polarización inducida, la resistividad eléctrica, la gravimetría, la magnetometría y los registros eléctricos permite una caracterización más precisa y detallada del yacimiento, lo que es esencial para guiar las decisiones estratégicas en la búsqueda de recursos minerales.

3.3.4. Bases de datos

Las bases de datos en el sector minero son un componente crucial para la gestión de la información recolectada durante las diferentes fases de exploración, desarrollo y operación de un proyecto. Se trata de sistemas estructurados electrónicamente que permiten almacenar, organizar y consultar de manera rápida y eficiente toda la información relevante obtenida en campo. La solidez de estas bases de datos es clave para respaldar el análisis, interpretación y toma de decisiones durante el ciclo de vida de un proyecto minero (Marjoribanks, 2010; CIM, 2018).

Una base de datos robusta debe ser lo suficientemente flexible para almacenar información desde las primeras fases de exploración hasta la etapa de cierre de la mina. La correcta estructuración de esta información es esencial para que todos los profesionales involucrados en el proyecto - Geólogos, Ingenieros, Metalurgistas, entre otros- puedan acceder a datos fiables que guíen sus decisiones. Es fundamental que la base de datos sea eficiente, segura y fácilmente actualizable a medida que se recolectan nuevos datos en campo o en laboratorio (CIM, 2018; Haldar, 2018). Una buena práctica ampliamente implementada es almacenar dos (2) tipos de datos:

- **Datos primarios:** estos se refieren a los valores medibles directamente en campo o en laboratorio. Incluyen atributos geológicos (litología, mineralización, alteración, etc.), resultados de ensayos geoquímicos y geofísicos, datos de densidad, recuperación de testigos de perforación, fotografías, estudios topográficos, entre otros. También forman parte de los datos primarios la información relacionada con la producción de la mina y los volúmenes de excavación (Marjoribanks, 2010; Haldar, 2018).
- **Datos interpretados:** estos son los derivados del análisis y la extrapolación de los datos primarios, como las proyecciones geológicas, la correlación entre zonas mineralizadas y los dominios de estimación de recursos. Estos datos interpretados son fundamentales para la construcción de modelos geológicos tridimensionales, la definición de recursos y la planificación de los desarrollos mineros (Marjoribanks, 2010).

Las bases de datos mineras deben ser capaces de soportar la amplia variedad de información recopilada en las diferentes etapas del proyecto. La información que estas bases suelen almacenar incluye:

- **Datos geológicos:** detalles sobre litología, mineralización, alteraciones hidrotermales, estructuras geológicas y oxidaciones.
- **Ubicación de “collar” de perforación y desviación de barrenos:** esto incluye las coordenadas exactas y los ángulos de perforación, datos esenciales para la correcta ubicación y correlación de los resultados.
- **Resultados de ensayos geoquímicos y geotécnicos:** abarcan datos cruciales sobre la composición química de las muestras, la calidad de la roca y los resultados de densidad.
- **Control de calidad (QA/QC):** información sobre los duplicados de muestras, los estándares de referencia y los controles de precisión, para asegurar que los datos almacenados sean consistentes y de alta calidad (CIM, 2018).

Además, las bases de datos permiten la integración de múltiples disciplinas, facilitando el intercambio de información entre Geólogos, Ingenieros de Minas, y otros profesionales involucrados en el proyecto. Esto permite evitar duplicaciones de información y mitigar posibles errores derivados de la falta de coordinación.

Existen tres (3) tipos principales de bases de datos que se utilizan en el sector minero, cada uno con características específicas para adaptarse a las necesidades del proyecto:

- **Bases de datos estáticas:** estas almacenan información histórica consolidada, recopilada por operadores previos o durante fases anteriores del proyecto. Son útiles para realizar estudios comparativos y de tendencias a largo plazo, pero no permiten la actualización de la información.
- **Bases de datos dinámicas:** se actualizan de manera continua y permiten la reorganización, modificación y eliminación de datos. Estas son las más utilizadas durante las fases de exploración activa y desarrollo, ya que permiten integrar los datos obtenidos de forma rápida y precisa a medida que avanza el proyecto.
- **Bases de datos especializadas:** diseñadas para manejar información técnica muy específica, como los resultados de ensayos de laboratorio o los datos metalúrgicos. Estas bases se desarrollan a medida para responder a las necesidades puntuales de los equipos de exploración o producción (Marjoribanks, 2010).

Una base de datos bien estructurada aporta beneficios cruciales a la gestión minera, entre ellos:

- **Almacenamiento centralizado:** Permite consolidar toda la información relevante en un solo lugar, accesible por todos los departamentos.
- **Toma de decisiones optimizada:** Al tener acceso a datos actualizados y precisos, las decisiones sobre la dirección de la exploración o el diseño del plan minero pueden ser mejor informadas.
- **Prevención de errores:** Minimiza la posibilidad de errores o duplicación de datos, ya que los sistemas incluyen controles de calidad integrados.
- **Seguridad de la información:** Las copias de seguridad aseguran que los datos estén protegidos frente a pérdidas accidentales o fallos en el sistema (Haldar, 2018).
- **Facilidad de análisis y visualización:** La capacidad de integrar los datos con software de modelado geológico permite a los usuarios crear modelos tridimensionales detallados del yacimiento, identificar patrones o tendencias en la mineralización y planificar con mayor precisión las futuras etapas de desarrollo.

Una base de datos robusta y bien gestionada es fundamental para la exploración y el desarrollo minero. Proporciona un marco organizativo que asegura que la información geológica y técnica esté bien almacenada, accesible y, lo más importante, utilizable de manera efectiva para apoyar la toma de decisiones. El uso de bases de datos dinámicas y especializadas es esencial para la actualización constante de la información, lo que permite a las compañías mineras avanzar de manera eficiente en cada fase del proyecto, desde la exploración inicial hasta la explotación final (CIM, 2018; Marjoribanks, 2010).

3.3.5. Estudio geotécnico

El estudio geotécnico en la exploración minera es fundamental para comprender las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas en un área determinada. Estos estudios son cruciales para evaluar la estabilidad del macizo rocoso y las condiciones del terreno, proporcionando datos clave para el diseño de estructuras de soporte, taludes, frentes de explotación y túneles. Asimismo, garantizan la seguridad y estabilidad de las operaciones mineras, tanto en proyectos a cielo abierto como subterráneos. Los ensayos geotécnicos permiten obtener parámetros como la gravedad específica, la cohesión, el ángulo de fricción, la resistencia al corte y a la tensión, que son esenciales para determinar el comportamiento mecánico del material bajo distintas condiciones de carga (Brady & Brown, 2004).

Estos estudios se complementan con ensayos especializados de mecánica de rocas y suelos, que brindan información detallada sobre la capacidad de los materiales para soportar esfuerzos y deformaciones. Los ensayos incluyen pruebas de compresión uniaxial y triaxial, análisis de discontinuidades geológicas, resistencia al corte y tensiones. Esta información es utilizada para diseñar taludes estables, determinar las medidas de sostenimiento en minería subterránea y evaluar la subsidencia de terrenos debido a la extracción de minerales. Los resultados se integran en una base de datos geotécnica, que permite un análisis eficiente y la toma de decisiones informadas durante todo el ciclo de vida del proyecto minero (Hoek & Bray, 1981; Haldar, 2018; Marjoribanks, 2010).

► **Ensayos de mecánica de rocas y suelos en minería**

Son fundamentales para caracterizar el comportamiento geomecánico de los materiales en las operaciones mineras. Estos ensayos permiten evaluar la respuesta de las rocas y los suelos ante diferentes esfuerzos, condiciones de carga y deformaciones, lo cual es crucial para garantizar la estabilidad y seguridad de las infraestructuras mineras, tanto en explotaciones a cielo abierto como en minería subterránea. Estos estudios, realizados en laboratorios especializados, proporcionan los parámetros necesarios para diseñar taludes, túneles y otras estructuras, minimizando los riesgos de colapso o deslizamientos (Brady & Brown, 2004; Hoek & Bray, 1981). A continuación, se presentan los Principales Ensayos en Mecánica de Rocas y Suelos:

- **Gravedad Específica:** este ensayo determina la densidad de las rocas o suelos, una propiedad clave para evaluar su capacidad de carga. La gravedad específica es el cociente entre la densidad del material y la densidad del agua, y permite identificar variaciones en la composición mineralógica de la roca. En minería, este parámetro es crucial para calcular el peso de los materiales y diseñar estructuras de soporte adecuadas, ya que influye directamente en la estabilidad de las infraestructuras y en la evaluación del potencial de deslizamiento de los taludes (Hustrulid & McCarter, 2016).
- **Cohesión y Ángulo de Fricción:** estos parámetros definen la resistencia al corte de los materiales, lo que es esencial para el diseño de taludes y la estabilidad de las excavaciones. La cohesión se refiere a la capacidad interna del material para resistir esfuerzos sin desintegrarse, mientras que el ángulo de fricción mide la inclinación máxima en la que los granos de suelo o roca no se deslizan entre sí. Juntos, permiten calcular la resistencia al corte del macizo rocoso y determinar los ángulos de talud óptimos, previniendo deslizamientos y fallas en las excavaciones mineras (Hoek & Brown, 1997).
- **Resistencia al Corte y a la Tensión:** la resistencia al corte mide la capacidad del material para resistir esfuerzos de cizalla, mientras que la resistencia a la tensión evalúa la capacidad del material para soportar cargas de tracción sin fracturarse. Estos ensayos son críticos en el diseño de infraestructuras subterráneas y taludes en minas, ya que aseguran la integridad de las estructuras bajo esfuerzos geomecánicos extremos.

La resistencia a la tensión es especialmente relevante en rocas frágiles, donde la fractura puede producirse con relativa facilidad bajo esfuerzos de tracción (Jaeger et al., 2007). En la minería subterránea, estos valores ayudan a definir las condiciones bajo las cuales se debe aplicar sostenimiento para prevenir fallos estructurales.

- **Compresión Uniaxial y Triaxial:** la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) mide la capacidad de la roca para soportar esfuerzos de compresión hasta su colapso, sin confinamiento lateral. Por otro lado, la compresión triaxial (TCS) incorpora confinamiento lateral, simulando condiciones más cercanas a las que se encuentran en profundidad. Estos ensayos son esenciales para determinar la carga máxima que puede soportar la roca y son fundamentales para diseñar pilares, paredes de túneles y otras estructuras sometidas a grandes esfuerzos compresivos (Brady & Brown, 2004). Además, el ensayo de compresión triaxial permite simular el comportamiento de la roca en condiciones reales de confinamiento, evaluando la deformabilidad y la resistencia residual tras la fractura.
- **Análisis de Discontinuidades:** las discontinuidades geológicas, como: fracturas, fallas, planos de estratificación y foliaciones, juegan un papel crucial en la estabilidad del macizo rocoso. El análisis de estas estructuras permite identificar posibles rutas de falla y evaluar la calidad del macizo. Propiedades como la orientación, rugosidad, espaciamiento y presencia de rellenos son registradas y analizadas para determinar el comportamiento mecánico del macizo bajo cargas operativas. Este análisis es esencial para evitar fallas catastróficas en taludes o galerías, especialmente en zonas de alta fracturación (Hoek & Brown, 1997).
- **Ensayos de Corte Directo y Triaxial:** además de los ensayos de compresión, los ensayos de corte directo y triaxial proporcionan datos sobre la resistencia al corte de los materiales bajo diferentes condiciones de carga. Estos ensayos son fundamentales para el diseño de taludes y otras estructuras críticas en minería. El ensayo de corte directo es ideal para estudiar la respuesta de materiales sueltos o altamente fracturados, mientras que el ensayo triaxial es más apropiado para rocas sólidas y poco fracturadas.

Los resultados de los ensayos de mecánica de rocas y suelos son utilizados para establecer los parámetros de diseño de las operaciones mineras, como la pendiente de los talu-

des, la disposición de los pilares en minas subterráneas y la planificación de los sistemas de sostenimiento. La caracterización precisa del comportamiento mecánico de las rocas es esencial para garantizar la seguridad y viabilidad económica de un proyecto minero. Asimismo, el análisis detallado de las discontinuidades geológicas ayuda a identificar áreas potencialmente inestables y a tomar medidas preventivas, como la instalación de refuerzos o la modificación de los diseños de excavación (Jaeger et al., 2007).

Por otra parte, un análisis detallado de estabilidad es crucial para la planificación y ejecución de proyectos mineros, especialmente en operaciones a cielo abierto donde la integridad de los taludes puede comprometer la seguridad y viabilidad económica del proyecto. El informe geotécnico debe incluir resultados de una serie de ensayos de laboratorio, tales como gravedad específica, cohesión, ángulo de fricción, resistencia al corte y tensión, junto con pruebas de compresión y análisis de discontinuidades. Estos parámetros son esenciales para modelar la estabilidad de los taludes y diseñar tanto los frentes de explotación como los botaderos de estéril (Hoek & Bray, 1981). Además, estos ensayos proporcionan los datos necesarios para evaluar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, lo que influye en la selección de las técnicas de excavación y en el diseño de medidas de sostenimiento.

La información generada a partir de estos estudios debe ser registrada y organizada en una base de datos geotécnica robusta y bien estructurada, que permita el almacenamiento y análisis eficiente de los datos recolectados. Esta base de datos debe contener no solo los resultados de los ensayos de laboratorio, sino también la localización georreferenciada de cada muestra, con detalles sobre los parámetros medidos. Un sistema de este tipo no solo facilita la interpretación geotécnica en tiempo real, sino que también permite consultar de manera rápida los datos históricos, optimizando así las decisiones operativas y de diseño a lo largo de la vida del proyecto (Haldar, 2018; Marjoribanks, 2010).

► **Caracterización del macizo rocoso y análisis de discontinuidades:**

El comportamiento geomecánico de un macizo rocoso está dominado, en gran medida, por la presencia y características de sus discontinuidades geológicas, tales como fracturas, fallas, pliegues y planos de estratificación. Estas discontinuidades no solo influyen en la calidad del macizo

rocoso, sino también en su estabilidad estructural y en la elección de métodos de explotación adecuados. La caracterización geotécnica del macizo implica la evaluación de diversos factores como el grado de fracturamiento, la rugosidad de las superficies de fractura, la orientación de las discontinuidades y el espaciamiento entre ellas, que permiten predecir el comportamiento del macizo bajo las condiciones de carga inducidas por las actividades mineras (Brady & Brown, 2004).

Este análisis es fundamental para anticipar las rutas de falla potenciales y diseñar sistemas de sostenimiento eficientes, especialmente en excavaciones subterráneas y taludes de gran altura. Por ejemplo, el ángulo de fricción y la cohesión obtenidos de los ensayos de laboratorio, junto con el espaciamiento y orientación de las discontinuidades, proporcionan una imagen clara del grado de estabilidad del macizo, permitiendo diseñar taludes con ángulos adecuados para evitar deslizamientos. En las minas subterráneas, la caracterización precisa de las discontinuidades ayuda a definir las necesidades de sostenimiento de techos y paredes, minimizando los riesgos de colapso durante la perforación y voladura (Hoek & Brown, 1997).

El conocimiento geotécnico derivado de estudios detallados en suelos y rocas es fundamental para garantizar la seguridad, eficiencia y viabilidad de los proyectos mineros. Este conocimiento tiene múltiples aplicaciones que impactan directamente en el diseño y ejecución de las operaciones tanto a cielo abierto como subterráneas.

- **Diseño de Taludes:** el análisis de estabilidad de taludes es una de las aplicaciones más críticas en minas a cielo abierto. Los estudios geotécnicos permiten evaluar las propiedades mecánicas del macizo rocoso, lo que facilita la determinación de ángulos de talud óptimos que evitan deslizamientos o colapsos. Mediante el análisis de los parámetros geotécnicos, como la resistencia al corte, la cohesión y el ángulo de fricción, se diseña la geometría de los taludes y botaderos de estéril, asegurando que estos mantengan la estabilidad estructural durante toda la vida útil del proyecto. De esta forma, el diseño se adapta a las condiciones específicas del terreno, garantizando un equilibrio entre estabilidad y eficiencia operativa (Hoek & Bray, 1981).
- **Sostenimiento en Labores Subterráneas:** en el caso de la minería subterránea, el conocimiento geotécnico es esencial para determinar las necesidades de sostenimiento en galerías, túneles y otras infraestructuras

subterráneas. Los estudios geotécnicos permiten evaluar las características estructurales del macizo rocoso y las discontinuidades, lo que a su vez define los tipos de sostenimiento necesarios para controlar los techos y paredes. Estos sistemas pueden incluir el uso de pernos de anclaje, mallas de acero y hormigón proyectado. Además, el análisis de subsidencia -el hundimiento gradual de la superficie debido a la extracción subterránea- es clave para mitigar los efectos de deformaciones en áreas cercanas o en infraestructuras críticas. Estos estudios no solo mejoran la seguridad, sino que optimizan el diseño y reducen riesgos de colapso (Hoek & Brown, 1997).

- **Evaluación de Subsidencia:** en proyectos mineros subterráneos, la subsidencia representa un desafío crítico que puede tener efectos devastadores en infraestructuras y terrenos cercanos a las operaciones. El análisis geotécnico profundo permite modelar la subsidencia con alta precisión, identificando las áreas donde es más probable que ocurra y cuantificando su magnitud. Este conocimiento permite a los ingenieros diseñar estrategias de mitigación, como el refuerzo del terreno y la planificación de medidas preventivas para minimizar el impacto en la superficie, lo que contribuye a la sostenibilidad y seguridad del proyecto (Brady & Brown, 2004).

3.3.6. Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico es un componente fundamental en la Fase 3 de la exploración del subsuelo, proporcionando datos cruciales que informan sobre la gestión y planificación de operaciones mineras. Este análisis implica la recopilación exhaustiva de datos sobre precipitaciones, dinámica fluvial y las características hidrológicas específicas de la zona de estudio. En particular, se examinan registros de precipitaciones a lo largo de los últimos 20 años, lo que permite identificar patrones climáticos, tendencias estacionales y cambios a largo plazo en las lluvias. Esta información es vital para evaluar cómo las variaciones en el volumen de precipitación pueden afectar el caudal de ríos y arroyos, así como para prever situaciones de riesgo, tales como inundaciones que pueden impactar la estabilidad de las estructuras mineras y las operaciones en curso (Dingman, 2002). La identificación de tendencias en las

precipitaciones no solo ayuda a anticipar eventos extremos, sino que también proporcionan información valiosa sobre la recarga de acuíferos, lo que puede influir en la disponibilidad de agua para procesos mineros y el manejo ambiental en la zona.

Además, este estudio incluye un análisis de la dinámica fluvial, que examina cómo los patrones de flujo de ríos y cuerpos de agua han cambiado en el tiempo. Este análisis es crucial para entender cómo la sedimentación y la erosión han alterado los cursos de agua y cómo estas variaciones pueden impactar la estabilidad de los taludes y las infraestructuras mineras circundantes. Por ejemplo, un aumento en el caudal durante eventos de lluvia intensa puede provocar la erosión de taludes, poniendo en riesgo las excavaciones y los botaderos de estéril, especialmente en áreas donde los depósitos polimetálicos se encuentran cerca de fuentes hídricas. Un enfoque detallado en la evaluación hidrológica no solo contribuye a la seguridad de las operaciones mineras, sino que también apoya la sostenibilidad a largo plazo del proyecto al garantizar un manejo adecuado de los recursos hídricos disponibles.

► Análisis Multitemporal de la Dinámica Fluvial en Exploración Minera

El análisis multitemporal de la dinámica fluvial es una herramienta fundamental en la exploración minera, especialmente para evaluar cómo los cambios en los patrones de los ríos y cuerpos de agua adyacentes pueden influir en la estabilidad de las estructuras mineras. Este análisis, que examina datos multitemporales, es crucial para comprender las variaciones en el caudal y la sedimentación. A medida que los patrones fluviales evolucionan, pueden surgir implicaciones significativas para la estabilidad de taludes, botaderos de estéril y otras infraestructuras mineras. Por ejemplo, un incremento en el caudal de los ríos puede llevar a la erosión de los taludes y causar deslizamientos, comprometiendo así la seguridad de las operaciones mineras, especialmente en áreas donde los depósitos polimetálicos están situados cerca de cuerpos de agua.

Para complementar este análisis, se elabora un mapa geoespacial que indica la localización de las vías de acceso al área, así como las obras hidráulicas y la infraestructura existente. Este mapeo no solo facilita la planificación logística, sino que también es fundamental para el diseño de la infraestructura necesaria para la gestión eficiente de los recursos hídricos. Además, se crea un plano que detalla las

cuencas hidrográficas y los drenajes presentes en la zona, permitiendo la identificación de áreas críticas que requieren atención especial en la gestión del agua. La identificación precisa de estas áreas es vital para implementar estrategias de control de inundaciones, lo que a su vez protege tanto la infraestructura minera como a las comunidades cercanas a la operación.

► Implicaciones de la Dinámica Fluvial en la Minería

La influencia de la dinámica fluvial se extiende más allá de la estabilidad estructural, afectando también la calidad del agua y la posible contaminación de fuentes hídricas. Los cambios en los flujos de agua pueden facilitar la sedimentación y el transporte de contaminantes, lo que resulta en la contaminación de fuentes de agua potable o hábitats acuáticos. Esto es especialmente crítico en regiones donde se utilizan técnicas mineras que pueden liberar metales pesados y otros contaminantes al medio ambiente, planteando serios riesgos tanto para la salud pública como para la biodiversidad.

Además, la planificación de la infraestructura es crucial para el éxito de las operaciones mineras. La localización de vías de acceso y la infraestructura hidráulica debe considerarse cuidadosamente para evitar interrupciones en las operaciones debido a inundaciones o dificultades de acceso. Un manejo eficiente de los recursos hídricos es esencial, sobre todo en depósitos polimetálicos donde el uso del agua es vital durante el procesamiento del mineral. La identificación de cuencas y drenajes permite diseñar sistemas de gestión que prevengan inundaciones y optimicen el uso del agua, promoviendo la sostenibilidad ambiental en la minería.

La evaluación de riesgos ambientales se vuelve indispensable. La identificación de áreas críticas en la gestión de aguas permite anticipar y mitigar los riesgos asociados con la minería, como la erosión del suelo y la degradación de hábitats. Dada la creciente presión pública sobre la sostenibilidad de las operaciones mineras, es esencial que estas evaluaciones sean rigurosas y basadas en datos actualizados. El estudio incluye una propuesta que presenta alternativas para el control de inundaciones y el manejo de aguas, garantizando que las operaciones mineras se realicen de manera sostenible y segura. Estas recomendaciones deben contemplar medidas de ingeniería, como la construcción de diques, canales de drenaje y sistemas de alma-

cenamiento de agua, así como la implementación de prácticas de conservación que minimicen el impacto ambiental de las actividades mineras (Fletcher *et al.*, 2015). En conjunto, estos análisis hidrológicos son fundamentales para la evaluación de riesgos y la toma de decisiones en la fase de exploración del subsuelo, asegurando que las operaciones mineras se realicen dentro de un marco seguro y eficiente.

3.3.7. Estudio hidrogeológico

En la Fase 3 de la exploración del subsuelo, los estudios hidrogeológicos son esenciales para comprender el comportamiento del agua subterránea y su interacción con las formaciones geológicas en áreas de extracción minera. Esta etapa se centra en la identificación detallada de los acuíferos, evaluando factores como la permeabilidad y la porosidad de las rocas que controlan el flujo del agua subterránea. La información obtenida de estas evaluaciones es fundamental para planificar sistemas de drenaje eficientes que eviten acumulaciones de agua, que podrían comprometer tanto la seguridad de las operaciones como la estabilidad del macizo rocoso. Las formaciones geológicas con alta permeabilidad, como las areniscas o las fracturas en rocas duras, actúan como canales de transporte para el agua, lo que aumenta el riesgo de inundaciones en túneles y galerías si no se gestionan adecuadamente.

El uso de pruebas de bombeo y permeabilidad permite determinar la capacidad de los acuíferos para recargar y descargar agua, además de identificar las direcciones del flujo subterráneo. Estas pruebas también son cruciales para el diseño de planes de manejo hídrico que minimicen el impacto de la minería sobre los recursos acuíferos. La creación de un inventario de pozos profundos, junto con la modelización hidrogeológica tridimensional, proporciona una base sólida para predecir el comportamiento del agua subterránea y su interacción con las actividades mineras. Este modelo no solo ayuda a prevenir la migración de contaminantes, sino que también permite diseñar sistemas de control eficaces, como barreras hidráulicas y pozos de alivio, asegurando que las operaciones mineras sean sostenibles y no pongan en riesgo los recursos hídricos locales.

► **Caracterización del Sistema Acuífero y Estudios de Permeabilidad**

Uno de los primeros pasos en la Fase 3 es la caracterización hidrogeológica detallada del sistema acuífero, enfocada en determinar las propiedades físicas del subsuelo, como la permeabilidad y porosidad de las rocas. Estas propiedades son fundamentales porque controlan el flujo del agua subterránea a través de las diferentes capas geológicas, influenciando directamente la distribución del agua en las zonas de extracción. Rocas con alta permeabilidad, como areniscas o fracturas en rocas duras, permiten el transporte más eficiente de agua, lo que puede aumentar el riesgo de acumulación en áreas críticas de extracción si no se gestiona adecuadamente (Freeze & Cherry, 1979).

Para evaluar estas características, se realizan pruebas de bombeo y permeabilidad que permiten medir la capacidad de los acuíferos para almacenar y transmitir agua. Estas pruebas son esenciales para identificar las zonas de recarga, donde el agua penetra hacia las capas más profundas, y las zonas de descarga, donde el agua fluye hacia la superficie o es capturada por pozos. La dirección y velocidad del flujo subterráneo también deben ser determinadas, ya que influyen directamente en la interacción entre el agua y las zonas mineralizadas. La información derivada de estos estudios permite diseñar sistemas de bombeo y drenaje eficientes, reduciendo el riesgo de inundaciones en túneles y galerías y garantizando la estabilidad de las operaciones mineras (Domenico & Schwartz, 1998).

El inventario de pozos profundos es otro componente crítico en esta fase. Este inventario incluye la localización y características de cada pozo, así como los resultados de ensayos de permeabilidad y flujo. Los pozos de monitoreo son esenciales para evaluar la presión del agua subterránea y prever cualquier impacto que la extracción minera pueda tener sobre los acuíferos vecinos. Estos inventarios aseguran que los recursos hídricos no se vean comprometidos durante las operaciones y que las condiciones del acuífero sean constantemente evaluadas (Margat & Van Der Gun, 2013).

► **Modelización hidrogeológica**

En la Fase 3 de exploración del subsuelo, la modelización hidrogeológica adquiere una importancia crucial desde una perspectiva estrictamente geotécnica, sin considerar aspectos ambientales. Esta modelización, basada en un enfoque

tridimensional, permite integrar datos obtenidos de pruebas de campo y ensayos de laboratorio, facilitando la simulación del comportamiento del agua subterránea bajo diferentes condiciones operativas. El objetivo principal es garantizar que el sistema acuífero se comporte de manera predecible ante la intervención minera, optimizando así la planificación de sistemas de drenaje y de gestión del agua, que son fundamentales para el éxito y la seguridad operativa.

Uno de los aspectos más críticos de esta modelización es la capacidad de identificar áreas donde las fracturas o fallas geológicas pueden actuar como vías preferenciales para el flujo de agua subterránea. Este flujo puede comprometer la estabilidad estructural del macizo rocoso, generando sobrepresiones que podrían causar colapsos en túneles y galerías. Por tanto, los estudios hidrogeológicos en esta fase no solo deben evaluar el comportamiento hidráulico del acuífero, sino también integrar esta información con los análisis geotécnicos del yacimiento. La combinación de estos datos permite garantizar la seguridad estructural de las operaciones mineras al prever zonas de sobrepresión y diseñar estrategias de refuerzo o control (Fetter, 2001).

► **Modelización hidrogeológica avanzada y su aplicación en la minería subterránea**

El uso de modelos hidrogeológicos tridimensionales en la Fase 3 tiene como finalidad principal la predicción del flujo de agua subterránea en relación con las estructuras geológicas presentes. Estos modelos permiten analizar la interacción entre el agua y el entorno geológico de manera precisa, evaluando cómo el acuífero responde a diferentes escenarios de extracción minera. Esta información es esencial para prever cómo el agua podría afectar la estabilidad del macizo rocoso a largo plazo y, en consecuencia, para diseñar sistemas de drenaje que minimicen cualquier interferencia del agua en las operaciones mineras.

Una característica clave de estos modelos es su capacidad para simular el comportamiento del acuífero ante posibles fluctuaciones en la presión hidráulica, que podrían generar inestabilidad en las paredes de túneles y galerías. En áreas donde el agua subterránea ejerce una presión considerable sobre las rocas, se puede generar una pérdida de cohesión en el macizo, lo que lleva a un mayor riesgo de colapsos geotécnicos. Por lo tanto, se pueden usar estos modelos para identificar áreas vulnerables, diseñar sistemas de control de flujo y prever el comportamiento de las aguas en interacción con las fracturas y fallas existentes (Bear, 1972).

Los estudios hidrogeológicos en la Fase 3 de exploración del subsuelo no solo son críticos para el diseño seguro y eficiente de las operaciones mineras, sino que también juegan un papel clave en la protección del entorno hidrogeológico. La integración de técnicas avanzadas de modelado, pruebas de campo y la gestión adecuada del agua subterránea asegura que el proyecto minero sea sostenible tanto desde una perspectiva técnica como ambiental.

► **Interacción entre fracturas, fugas hidráulicas y el sistema minero**

Las fracturas en las rocas juegan un papel crucial en la interacción entre el agua subterránea y las zonas mineralizadas. Estas fracturas pueden actuar como canales de flujo preferencial, desviando grandes volúmenes de agua hacia zonas de operación minera. Cuando estas vías no se controlan adecuadamente, pueden causar inundaciones localizadas, comprometiendo la estabilidad y seguridad del sistema minero. Por ello, los estudios hidrogeológicos y geotécnicos deben estar estrechamente vinculados para garantizar que las estructuras subterráneas puedan soportar las posibles presiones ejercidas por el agua, tanto en estado estático como dinámico (Fetter, 2001).

Adicionalmente, la identificación de fugas hidráulicas a través de las fracturas es un aspecto crítico para diseñar sistemas de manejo de aguas. Las fugas pueden aumentar la presión en zonas previamente estables, lo que puede modificar significativamente las condiciones geomecánicas del yacimiento. El uso de modelos hidrogeológicos avanzados permite anticipar estos cambios y planificar sistemas de drenaje y bombeo que mitiguen los efectos negativos del flujo de agua subterránea, preservando la integridad estructural del macizo (Freeze & Cherry, 1979).

► **Planificación Geotécnica y Seguridad Operativa**

El manejo eficiente del agua subterránea mediante el uso de modelos hidrogeológicos tridimensionales permite una mejor planificación geotécnica en las fases de construcción y operación de la mina. Al predecir con precisión cómo el agua interactuará con las formaciones rocosas, los Ingenieros pueden desarrollar estrategias para estabilizar el macizo rocoso, evitando problemas como el desplazamiento de bloques o el deterioro de los túneles. Estos modelos también permiten ajustar en tiempo real las condiciones operativas, ya sea aumentando el drenaje en zonas de sobrepresión o reforzando las estructuras para soportar cambios en la carga hidráulica (Domenico & Schwartz, 1998).

Un enfoque centrado únicamente en los aspectos hidrogeológicos y geotécnicos de la Fase 3 de exploración del subsuelo es fundamental para garantizar que las operaciones mineras sean seguras, eficientes y sostenibles a largo plazo. La integración de modelos tridimensionales, junto con datos precisos de pruebas de campo, proporciona una base sólida para prever y mitigar riesgos geotécnicos relacionados con el agua subterránea, lo que asegura que el yacimiento pueda ser explotado de manera óptima sin comprometer la estabilidad del entorno subterráneo.

► **Recomendaciones: exploración del subsuelo**

- Implementar modelización geológica tridimensional (3D) en tiempo real para optimizar la ubicación y el ángulo de los pozos de perforación, maximizando la intersección con zonas mineralizadas y reduciendo perforaciones improductivas.
- En áreas de mineralización compleja, adoptar técnicas de perforación dirigida para ajustar la trayectoria de perforación durante la ejecución, mejorando la precisión y eficiencia.
- Implementar un sistema de QA/QC desde el inicio del proyecto, incluyendo estándares certificados, blancos y duplicados para asegurar la precisión y exactitud de los resultados.
- Realizar auditorías periódicas y validar los resultados de QA/QC con laboratorios externos para garantizar la calidad de los datos.
- Asegurar que el “logueo” geológico y geotécnico lo realicen personas entrenadas, acompañado de un diccionario geológico actualizado.
- Implementar escáneres 3D para capturar modelos detallados de los núcleos de perforación, facilitando un análisis geológico y geotécnico más preciso.
- Utilizar algoritmos de inteligencia artificial para identificar patrones ocultos en los datos geoquímicos y geofísicos, optimizando la planificación de perforaciones.
- Incorporar sensores avanzados para el monitoreo continuo en tiempo real durante los ensayos geofísicos, mejorando la precisión en la identificación de cuerpos mineralizados.
- Crear bases de datos en formato digital, normalizadas y con mecanismos para proteger la integridad de los datos, facilitando su uso y actualización.
- Realizar auditorías y copias de seguridad frecuentes de

las bases de datos, almacenándolas en ubicaciones seguras externas.

- Implementar el uso de piezómetros y extensómetros automatizados para monitorear la presión de poros y deformaciones del macizo rocoso.
- Incluir estudios sismológicos y microsismológicos en el análisis geotécnico para diseñar infraestructuras resistentes a sismos.
- Utilizar modelos hidrogeológicos tridimensionales para predecir el comportamiento del agua subterránea en relación con las estructuras geológicas y diseñar sistemas de control de flujo efectivos.
- Realizar estudios geoquímicos paralelos a los hidrogeológicos para evaluar la calidad del agua y prever la movilización de contaminantes inducidos por la minería.

Mas información

- **Brady, B. H., & Brown, E. T. (2004).** Rockmechanics: For underground mining. Springer.
- **Gadallah, M., & Fisher, R. (2009).** Exploration geophysics. Springer Science & Business Media.
- **Hoek, E., & Bray, J. (1981).** Rock slope engineering: Civil and mining practice. Institution of Mining and Metallurgy.
- **Klockenkämper, R. (2014).** Total-reflection X-ray fluorescence analysis and related methods. John Wiley & Sons.
- **Moon, C. J., Whateley, M. K., & Evans, A. M. (2006).** Introduction to mineral exploration. Blackwell Publishing.
- **Weiss, D. J. (2005).** Handbook of exploration geochemistry. Elsevier.

Artículos

- **Abzalov, M. Z. (2011).** Quality control of assay data: A review of procedures for measuring and monitoring precision and accuracy. *Exploration and Mining Geology*, 18(4), 301-310.
- **Barton, N., & Choubey, V. (1977).** The shear strength of rockfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 14(4), 99-102.

Archivos Multimedia

- **Mineral Exploration Videos (2021).** YouTube Channel by Geology Hub. <https://www.youtube.com/user/GeologyHub>.

Páginas web

- **Society of Economic Geologists (SEG). (n.d.).** <https://www.segweb.org>
- **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM). (2018).** *Exploration Best Practices Guidelines*. <https://www.cim.org>
- **International Society for Rock Mechanics (ISRM). (n.d.).** <https://www.isrm.net>

3.4. FASE 4: Modelos y Estimación de Recursos Minerales

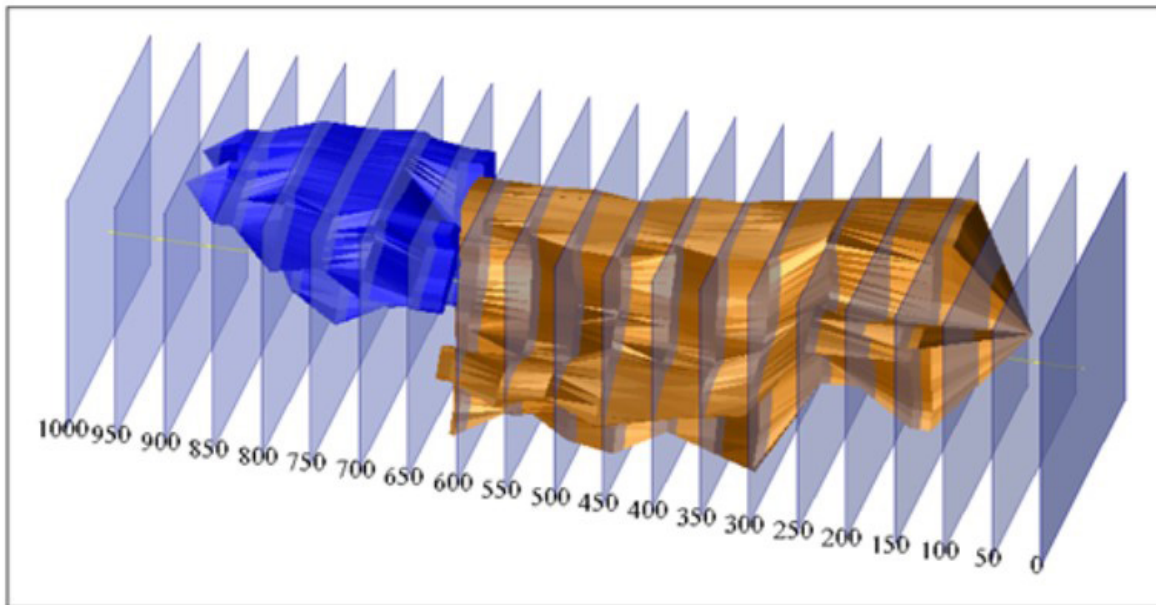
La estimación de Recursos Minerales es una etapa crucial en la planificación y evaluación de proyectos mineros. Este proceso combina una variedad de disciplinas, desde la geología hasta las estadísticas avanzadas, con el objetivo de determinar con precisión la cantidad, calidad y distribución de los minerales en un yacimiento. Para llevar a cabo esta estimación, se recopilan datos a través de perforaciones, muestreos y trabajos de campo, que son luego integrados en un modelo geológico. La correcta elaboración de estos modelos geológicos permite no solo evaluar la viabilidad económica de un proyecto, sino también planificar su extracción y procesamiento, garantizando que se cumplan los requisitos legales y ambientales exigidos por la normativa vigente (Emery & Ortiz, 2004; Cowan *et al.*, 2014).

Un aspecto fundamental de este proceso es la interpretación y modelado geológico, que requiere una comprensión profunda de las características del yacimiento, como la litología, mineralización, alteración y estructura. Los modelos geológicos se elaboran utilizando una variedad de datos, incluidos aspectos topográficos y geoquímicos, los cuales permiten representar la geometría de los depósitos minerales en tres (3) dimensiones. Este modelado es clave para seleccionar las técnicas adecuadas de estimación y asegurar que los resultados obtenidos sean representativos y confiables. A lo largo de los últimos años, el uso de técnicas de modelado implícito ha ganado importancia, mejorando la precisión en la estimación de Recursos Minerales en depósitos complejos (Gradim *et al.*, 2014; Haddow & Cowan, 2014).

3.4.1. Interpretación y modelamiento geológico

Un modelo geológico confiable es esencial en las etapas de estimación de Recursos Minerales, ya que establece la forma, ubicación, tamaño y distribución de las unidades geológicas. Este modelo se elabora integrando todos los datos relevantes generados en fases previas del proyecto. Un modelo geológico representa la interpretación geológica del yacimiento e incluye elementos como tipos de rocas, unidades litológicas, mineralizaciones, alteraciones y estructuras. La comprensión de las características y la naturaleza geológica del yacimiento es crucial para construir un modelo coherente que permita seleccionar la técnica de modelación más adecuada (ver Figura 12).

Figura 12. Método de perfiles



Fuente: Dassault Sistemas – Software Surpac

Los errores comunes en la estimación de Recursos Minerales suelen asociarse con una comprensión inadecuada de la geometría del yacimiento. Por ello, el profesional encargado debe tener claridad sobre la interpretación de la geometría, el control litológico y la continuidad del depósito. Generalmente, los modelos geológicos se representan en tres dimensiones (3D) mediante superficies, diagramas de bloques o sólidos (“wireframes”). Sin embargo, dependiendo del método seleccionado y la densidad de información, también se pueden emplear representaciones en dos dimensiones (2D), como perfiles y polígonos.

Para crear un modelo geológico se utiliza una variedad de información que incluye datos topográficos, geológicos, geoquímicos, metalúrgicos, geofísicos, estructurales y de densidad. La densidad aparente, que se relaciona con la composición mineralógica de cada roca, es fundamental para calcular el peso de la roca, lo que resulta relevante en la estimación de los Recursos Minerales. Los modelos geológicos más utilizados para representar la geometría de depósitos polimetálicos incluyen modelos litológicos, de alteración, de mineralización y estructurales.

En los últimos años, las técnicas de modelamiento implícito han ganado relevancia en la estimación de Recursos Minerales. Los profesionales deben comprender las ventajas y desventajas de estas técnicas y asegurarse de que los modelos generados reflejen la realidad geológica del depósito mineral, ajustándose a los datos de exploración utilizados para su construcción (Cowan et al., 2014; Gradim et al., 2014; Haddow y Cowan, 2014).

3.4.2. Dominios de estimación

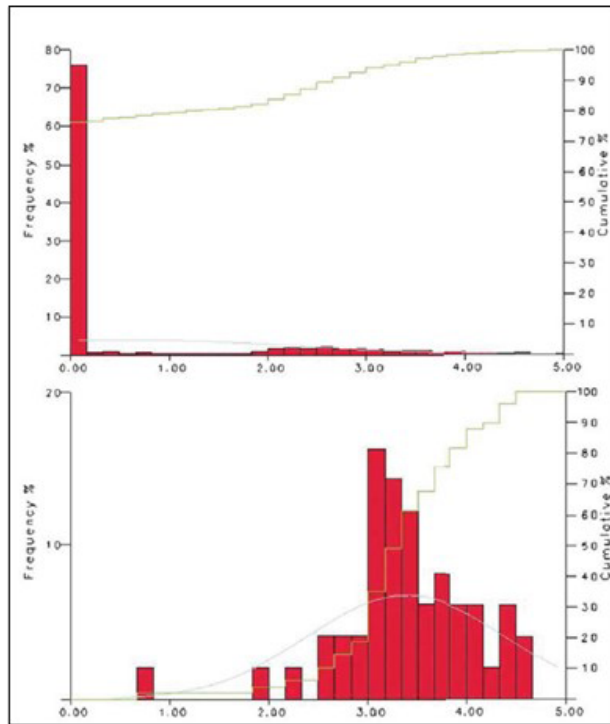
La estimación y categorización de Recursos Minerales es una etapa indispensable en la factibilidad de un proyecto minero. Esta etapa depende de un conocimiento geológico detallado que confirme la continuidad y geometría en el subsuelo. La información utilizada para construir un dominio de estimación puede provenir de campañas de perforación, programas de exploración superficial o datos de galerías o túneles mineros. Es crucial garantizar la integridad,

representatividad y calidad de la información, ya que esto impacta directamente en los resultados de modelamiento, estimación y clasificación de Recursos Minerales en depósitos polimetálicos.

Definir los dominios de estimación es fundamental, pues impacta las técnicas de estimación y la correcta categorización del recurso. Características como alteración, minerali-

zación y litología son relevantes a la hora de definir un dominio (Emery y Ortiz, 2004). En el caso de la litología, es importante considerar los dominios geológicos y su relación con la geología. Se pueden utilizar análisis estadísticos para caracterizar la distribución de la concentración de cada dominio, empleando gráficos de frecuencia e histogramas (ver Figura 13. Ejemplo de Histograma antes y después de análisis estadístico de dominios).

Figura 13. Ejemplo de Histograma antes y después de análisis estadístico de dominios

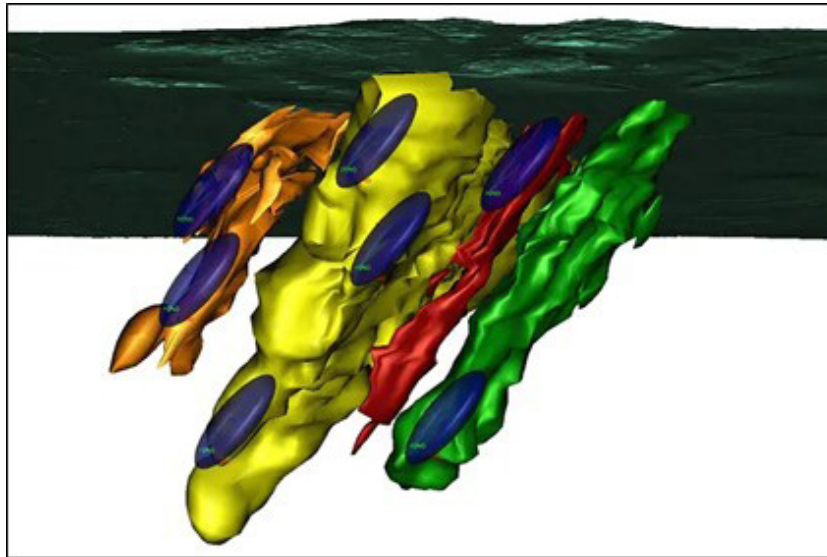


Fuente: SRK Consulting.

Es necesario clasificar los dominios para determinar si son duros o blandos, lo que es esencial para decidir cuántos campos aleatorios diferentes se deben usar para representar las variaciones espaciales de la ley. Las condiciones de forma pueden imponerse al definir los dominios. Los límites de dominio blando permiten que las concentraciones de cualquiera de los lados se utilicen en la estimación de ambos dominios, mientras que los límites duros no permiten la interpolación de concentraciones entre dominios. Los dominios suaves unidireccionales se utilizan a menudo en estimaciones, introduciendo un sesgo conservador que evita límites artificialmente marcados.

La determinación de los valores de densidad aparente es parte fundamental en la estimación de Recursos y Reservas Minerales. Los métodos para su determinación deben ser descritos detalladamente, considerando cualquier vacío que distorsione los resultados. Si existen mediciones de densidad preexistentes, deben validarse, utilizando métodos alternativos si es necesario, y supervisando la recopilación de valores de densidad (ver Figura 14).

Figura 14. Dominios de estimación - Vetas y Cuerpos Mineralizados



Fuente: DSRK Consulting.

Es importante señalar que en una misma región pueden utilizarse varios tipos de dominios, incluidos dominios metalúrgicos y geológicos, para definir zonas de diferente recuperación de metales. A menudo se emplea un conjunto de dominios para la estimación y otro para fines mineros o metalúrgicos, asegurando así que se utilicen tantos tipos diferentes de dominios como sean necesarios para definir el recurso y proporcionar información para la estimación de reservas.

3.4.3. Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos (EDA, por sus siglas en inglés, “*Exploratory Data Analysis*”) es una etapa fundamental en el proceso de estimación de Recursos Minerales. Esta fase inicial del análisis de datos tiene como objetivo comprender mejor la naturaleza de los datos geológicos y de exploración disponibles antes de aplicar métodos más avanzados para la estimación de Recursos Minerales.

Algunos aspectos para considerar al momento de realizar el análisis exploratorio de datos son los siguientes:

- **Visualización de Datos Geográficos:** Utilizar gráficos y mapas geográficos para representar la ubicación de los datos de exploración y la distribución espacial de las muestras. Esto puede revelar patrones geográficos y ayudar a identificar áreas de alta densidad de perforación y áreas con datos faltantes, además de verificar la ubicación espacial de la información involucrada.
- **Histogramas y Estadísticas Descriptivas:** Crear histogramas y calcular estadísticas descriptivas como la media, la mediana, la desviación estándar y los percentiles para las leyes de los minerales de interés. Esto proporciona una comprensión inicial de la distribución y la variabilidad de las leyes de los minerales.
- **Gráficos de Dispersión:** Analizar gráficos de dispersión para explorar las relaciones entre variables geológicas y datos de exploración. Por ejemplo, se pueden trazar las leyes de dos minerales en un gráfico de dispersión para identificar posibles correlaciones.
- **Box plots y Diagramas de Caja:** Utilizar diagramas de caja para visualizar la variabilidad y los valores atípicos o “outliers” en las leyes de los minerales y otras variables geológicas. Esto puede ayudar a identificar valores inusuales que requieren una mayor investigación.

- **Mapas de Variograma:** Calcular y trazar mapas de variograma para examinar la estructura de correlación espacial de las leyes de los minerales. Esto es esencial para la selección de modelos de variograma adecuados en métodos de estimación posterior como el “*kriging*”. También es de gran ayuda para determinar la existencia e importancia del efecto “pepita”.
- **Análisis de Tendencias:** Realizar análisis de tendencias para identificar patrones geológicos a gran escala en los datos. Esto puede ayudar a definir dominios geológicos que justifiquen la segmentación de los datos para estimaciones por separado.
- **Identificación de Datos Faltantes:** Identificar y abordar valores faltantes en los datos de perforación. Los datos faltantes pueden afectar la calidad de la estimación y deben ser manejados adecuadamente.

El análisis exploratorio de datos en la estimación de Recursos Minerales proporciona una base sólida para la selección de métodos de estimación, la definición de dominios de estimación y la identificación de posibles desafíos geológicos. Además, ayuda a los Geólogos y analistas de datos a comprender la naturaleza de los datos, a detectar problemas de calidad de los datos y a tomar decisiones informadas sobre cómo proceder con la estimación de Recursos de manera efectiva y precisa.

3.4.4. Valores atípicos

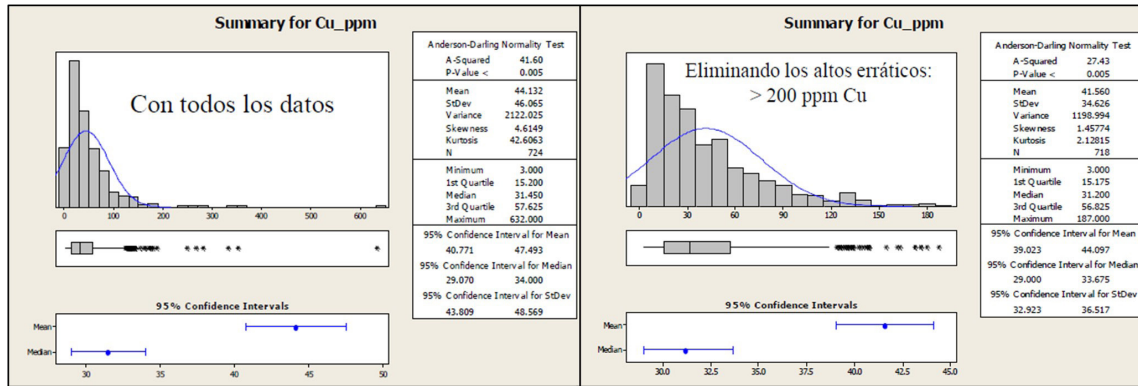
Un “*outlier*” es un término utilizado en estadística y análisis de datos para referirse a un valor atípico o inusual en un conjunto de datos. En otras palabras, es un punto de datos que se encuentra significativamente alejado de la mayoría de los otros puntos en una población de datos. En los procesos de estimación de Recursos Minerales puede contribuir a sobreestimar concentraciones o tenores.

La identificación y tratamiento de valores atípicos es importante dentro del análisis de datos porque estos pueden distorsionar las estadísticas descriptivas y los modelos estadísticos y geoestadísticos. La detección de valores atípicos puede realizarse mediante diversas técnicas estadísticas como diagramas de caja (*box plots*), métodos basados en la desviación estándar o técnicas más avanzadas como algoritmos de detección de anomalías. El tratamiento adecuado de valores atípicos es esencial para garantizar que los análisis de datos sean precisos y confiables.

En algunos casos, los valores atípicos pueden ser eliminados o corregidos si se determina que son el resultado de errores (Ver Figura 15). Sin embargo, en otros casos, los valores atípicos pueden contener información valiosa o representar situaciones o condiciones geológicas únicas, por lo que es importante considerar cuidadosamente cómo tratarlos en el análisis de datos.

Los procedimientos que incluyen la definición de dominios, la limitación de la ley o “*capping*”, la restricción espacial de la influencia de los ensayos de alta ley, el “*kriging* de Indicadores” y los métodos de simulación Monte Carlo compensan de diversas formas la posible sobreestimación (CIM, 2019).

Figura 15. Ejemplo de Capping para Cu_ppm



Fuente: Cámara Minera del Perú - CAMIPER.

Una buena práctica respecto a los datos anómalos y atípicos consiste en comprobar los resultados y determinar una causa probable de la anomalía. El análisis de los datos debe realizarse antes de modificar o excluir (con justificación) tales muestras de la población (Guía JORC-2014).

► Composición

En el ámbito de la estimación de Recursos Minerales, la composición o “compositing” se refiere al proceso de combinar datos de muestras individuales para crear una representación más amplia y continua del contenido mineral en un yacimiento. Esto implica tomar las muestras individuales, que pueden ser fragmentos de roca o perforaciones, y combinarlas en intervalos o conjuntos compuestos para obtener una imagen más completa de la geología y los minerales presentes en el subsuelo.

La selección de una longitud compuesta debe ser apropiada según los datos, el yacimiento y el escenario operativo conceptual, por ejemplo, altura del banco o medio banco, longitud del intervalo de ensayo dominante - moda, y espesor de la veta. Comúnmente, la composición de muestras se ajusta a un dominio geológico o de mineralización y las muestras compuestas no cruzan los límites del dominio (CIM, 2019).

La preparación de estadísticas descriptivas de los valores de muestra compuestos es útil para evaluar la naturaleza de la mineralización que se está modelando, así como para estimar la precisión del método de composición por com-

paración con las estadísticas descriptivas de los valores de ensayo no compuestos y evaluar la precisión global de los grados estimados de los Recursos Minerales.

► Desagrupamiento o “declustering”

Se refiere al proceso de ajustar o corregir datos espaciales o geoestadísticos para eliminar o reducir el sesgo introducido por la agrupación no uniforme de los puntos de datos en el espacio. En el contexto de la estimación de Recursos Minerales, el “declustering” se utiliza para abordar la no uniformidad en la distribución de las muestras tomadas de un yacimiento. Cuando las muestras se agrupan en ciertas áreas o zonas más que en otras, los datos pueden estar sesgados, lo que podría afectar negativamente la precisión de las estimaciones de los Recursos.

El proceso de desagrupamiento implica asignar pesos a las muestras en función de su densidad de muestreo en el espacio. Las muestras tomadas en áreas con una alta densidad de muestreo pueden recibir un peso menor, mientras que las muestras en áreas con una baja densidad de muestreo pueden recibir un peso mayor. Esto tiene como objetivo corregir el sesgo y permitir una estimación más precisa de los Recursos Minerales.

Para obtener una predicción insesgada de la media global se pueden utilizar técnicas de desglose o “decluster” de datos para minimizar el sesgo debido al agrupamiento de datos. Esto se puede hacer a través de un histograma des-

agrupado con el fin de estimar curvas de tonelaje de ley incesgadas (CIM, 2019).

3.4.5. Técnicas y métodos de estimación

La estimación del Recurso Mineral implica la determinación más aproximada posible de la cantidad, calidad, ubicación, continuidad y otras características del mineral de interés. Dado que la estimación se realiza a partir de datos puntuales que se consideran representativos de zonas más amplias, la interpolación y extrapolación de datos siempre hacen parte de la estimación; sin embargo, estas deben hacerse con base en criterios sólidos que garanticen la menor incertidumbre posible.

Las técnicas más conocidas para asignar el valor o valores de concentración o tenor dentro de los dómicos de estimación de los depósitos polimetálicos son los métodos clásicos y los métodos geoestadísticos.

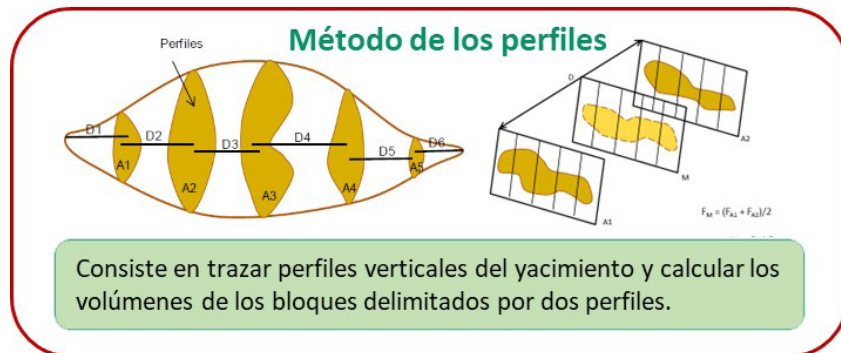
Factores como la densidad de información, tipos de minerales, forma del depósito, dimensión y complejidad deben considerarse al momento de seleccionar el método de estimación; cuanto más complejo el depósito, más refinado debe ser el método de estimación.

► Métodos Clásicos

Los métodos clásicos para estimar Recursos Minerales son enfoques tradicionales que han sido ampliamente utilizados en la industria minera durante décadas. A continuación, se presentan algunos de los métodos clásicos más comunes:

- **Método de secciones transversales o perfiles:** En este enfoque, se utilizan datos de perforación de secciones transversales, perforaciones individuales o información de labores subterráneas para estimar el contenido de mineral en una zona específica del yacimiento. Estos datos se interpolan entre secciones para estimar el volumen y la ley del mineral en esa zona (ver Figura 16).

Figura 16. Método clásico - perfiles



Fuente: Cámara Minera del Perú - CAMIPER.

- **Método de Promedios Ponderados:** Este método estima las leyes de los minerales y las toneladas de mena promediando los valores de muestreo en un área o dominio de estimación específico. Los valores se ponderan por la distancia entre los puntos de muestreo y el área a estimar.
- **Método de Bloques Geológicos:** Divide el yacimiento en bloques tridimensionales y estima las toneladas y leyes de los minerales en cada bloque. Este método es ampliamente utilizado en la planificación minera subterránea y a cielo abierto (ver Figura 17).

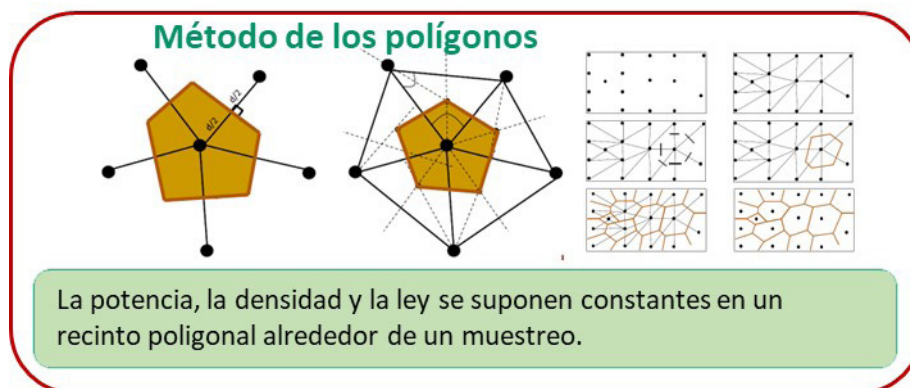
Figura 17. Método clásico - Polígonos de Voronoi



Fuente: Cámara Minera del Perú - CAMIPER.

- **Método de Polígonos Ponderados:** Similar al método polígonos de Voronoi, pero se asignan pesos a los polígonos en función de la densidad de datos y la proximidad a los puntos de control. Los polígonos con más datos cercanos tienen un mayor peso en la estimación.
- **Métodos de Isolíneas:** El modelado geológico con isolíneas es una técnica que se utiliza para representar la distribución tridimensional de una variable geológica (como la ley de un mineral) en un yacimiento mineral utilizando líneas de contorno (isolíneas) en planos geológicos o secciones transversales. (ver Figura 19).

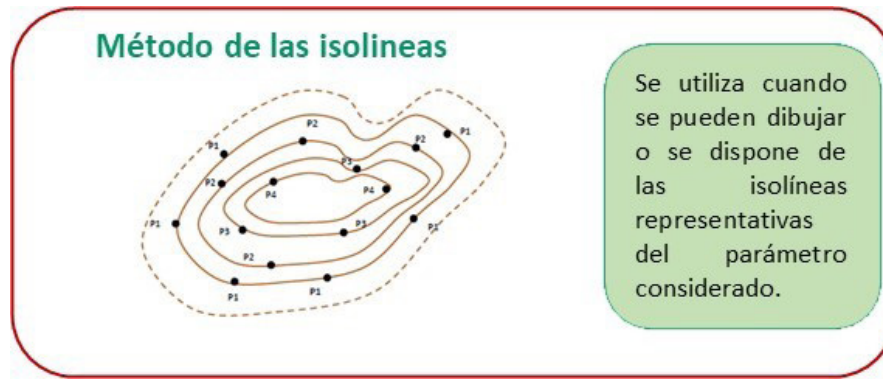
Figura 18. Método clásico - Polígonos de Voronoi



Fuente: Cámara Minera del Perú - CAMIPER.

- **Método de Polígonos Ponderados:** Similar al método polígonos de Voronoi, pero se asignan pesos a los polígonos en función de la densidad de datos y la proximidad a los puntos de control. Los polígonos con más datos cercanos tienen un mayor peso en la estimación.
- **Métodos de Isolíneas:** El modelado geológico con isolíneas es una técnica que se utiliza para representar la distribución tridimensional de una variable geológica (como la ley de un mineral) en un yacimiento mineral utilizando líneas de contorno (isolíneas) en planos geológicos o secciones transversales. (ver Figura 19).

Figura 19. Método clásico - isolíneas



Fuente: Cámara Minera del Perú - CAMIPER.

- **Inversión de Distancia Ponderada (IDW):** Este método asigna valores a ubicaciones no muestreadas basándose en la distancia a los puntos de muestreo conocidos. Los puntos más cercanos tienen un mayor peso en la estimación, y la técnica se utiliza comúnmente en la interpolación espacial.

Se debe considerar que los métodos determinísticos son enfoques de estimación de Recursos Minerales que se basan en la información disponible de manera precisa y sin tener en cuenta la incertidumbre. Estos métodos asumen que la geología y las leyes de los minerales en el yacimiento son conocidas con certeza y que no hay variabilidad significativa. Aunque estos métodos pueden ser útiles en ciertas circunstancias, es importante tener en cuenta que la mayoría de los yacimientos minerales tienen variabilidad, por lo que los resultados de los métodos determinísticos pueden ser demasiado optimistas y no reflejar adecuadamente la incertidumbre.

► Métodos Geoestadísticos

Los métodos geoestadísticos son una categoría importante de técnicas utilizadas en la estimación de Recursos Minerales. Estos métodos se basan en la teoría de la estadística espacial y tienen en cuenta la distribución espacial y la correlación de los datos geológicos y de perforación. Algunos de los métodos geoestadísticos más comunes son:

- **Kriging:** es uno de los métodos geoestadísticos más utilizados en la estimación de Recursos Minerales. Se

basa en el análisis de la estructura de correlación espacial de los datos de exploración. Estima los valores en ubicaciones no muestreadas ponderando la información de los datos conocidos y la covarianza espacial entre ellos. Existen varias variantes, como el *kriging* ordinario, el *kriging* simple y el *kriging* universal, que se adaptan a diferentes situaciones y tipos de datos. Antes de aplicar el *kriging*, es fundamental calcular el variograma, que es una función que describe cómo la correlación espacial entre los datos cambia con la distancia y la dirección. El variograma se utiliza para modelar la estructura de correlación espacial y seleccionar el modelo de variograma más apropiado para suavizar la estimación de Recursos.

- **Kriging Ponderado por Distancia (IDW):** Aunque el inverso de la distancia (IDW) se mencionó anteriormente como un método determinístico, también se puede utilizar como un método geoestadístico si se ponderan las contribuciones de los puntos de muestreo en función de la distancia y de la estructura de correlación espacial. Esto puede proporcionar una estimación más precisa al considerar la variabilidad espacial.
- **Cokriging:** El *cokriging* es una extensión del *kriging* que permite estimar múltiples variables relacionadas al mismo tiempo. Es útil cuando las leyes de varios minerales están correlacionadas espacialmente y se pueden utilizar para mejorar las estimaciones.
- **Simulación Geoestadística:** La simulación geoestadística es una técnica avanzada que utiliza múltiples

realizaciones estocásticas de los datos para generar modelos geológicos tridimensionales. Estos modelos se generan teniendo en cuenta el variograma y la estructura de correlación espacial y pueden utilizarse para estimar Recursos Minerales y evaluar la incertidumbre.

- **Métodos Bayesianos Geoestadísticos:** Utilizan el enfoque bayesiano para combinar datos de exploración con información previa y generar estimaciones de Recursos Minerales. Estos métodos proporcionan estimaciones probabilísticas y medidas de incertidumbre.

Los profesionales encargados de los procesos de estimación deben realizar estas actividades en conjunto con los profesionales de ciencias de la tierra que tengan conocimiento en depósitos polimetálicos, que conozcan y comprendan la interpretación geológica, las características del yacimiento y el conjunto de datos disponibles. Los resultados del análisis geoestadístico nunca deben aplicarse sin tener en cuenta otros factores de la estimación de Recursos, como el método de extracción, la interpretación geológica y la confiabilidad de los datos.

El variograma puede contribuir a definir las distancias de continuidad entre los puntos de observación. Aisladamente, no se considera apropiado, ya que no tiene en cuenta todos los demás factores necesarios que contribuyen a la confianza en la estimación, como las características de la muestra, la metodología de extracción, las características geológicas locales y la confiabilidad de los datos de la muestra. El uso exclusivo del variograma es arriesgado, en particular en el caso de variables con una alta varianza de pepitas y/o rangos cortos.

Es necesario comprender que el uso de un software para la estimación no garantiza la calidad del resultado; el programa facilita los cálculos, visualización y manejo de los datos, pero los parámetros de estimación, la calidad de los datos y las restricciones de la estimación son determinadas por el profesional líder y el equipo responsable del modelamiento.

Estos métodos estocásticos permiten abordar la incertidumbre y la variabilidad geológica de manera más realista en la estimación de Recursos Minerales. También proporcionan una base sólida para la toma de decisiones en la industria minera al ofrecer estimaciones probabilísticas y medidas de confiabilidad.

► Validación del modelo de estimación

La validación de los modelos de estimación de Recursos es un proceso crítico para garantizar la precisión y la confiabilidad de las estimaciones. Las técnicas de validación se utilizan para evaluar qué tan bien se ajusta un modelo a los datos y para medir su capacidad predictiva.

Algunas de las técnicas de validación más comunes pueden ser:

- Realizar una validación cruzada utilizando diferentes técnicas de estimación y comparando los resultados con datos de perforación adicionales que no se utilizaron en el proceso de estimación previo.
- Construir secciones longitudinales y transversales comparando los datos originales (perforaciones, labores subterráneas, entre otros) con los datos estimados en el modelo y los datos compuestos.
- En la medida de lo posible, utilizar datos independientes o de verificación para evaluar el modelo. Estos datos no se utilizan en el ajuste del modelo, se utilizan exclusivamente para verificar su precisión.
- Utilizar estadísticas de ajuste, como el coeficiente de determinación (R^2), el error estándar de la estimación, el error medio cuadrático y el error medio absoluto, para evaluar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos de exploración utilizados en la construcción del mismo.
- Evaluar la varianza de las estimaciones del modelo en comparación con la varianza de los datos de perforación. Esto puede incluir análisis de la dispersión de las estimaciones en relación con la dispersión de los datos reales.
- Comparar las estimaciones del modelo con el conocimiento y la interpretación geológica del yacimiento.
- Si existen datos históricos de producción o estimaciones anteriores disponibles, es conveniente comparar las estimaciones del modelo con estos datos para evaluar su precisión.

3.4.6. Categorización de Recursos Minerales

La clasificación de Recursos Minerales es un proceso esencial en la industria minera y se realiza para evaluar y comunicar la cantidad y calidad de los Recursos presentes en un yacimiento. Estas clasificaciones suelen basarse en estándares y normativas reconocidas internacionalmente como las establecidas por el Comité Internacional para el Reporte Público de Recursos y Reserva Minerales (CRIRSCO).

Los Recursos Minerales se clasifican, de acuerdo con el incremento de la confianza geológica del depósito, en Inferidos, Indicados y Medidos, términos que han sido establecidos por CRIRSCO y adoptados por la Comisión

Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR® en el Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales - ECRR® (ver Figura 20). Los Recursos Minerales Inferidos tienen un menor nivel de confianza que los Recursos Minerales Indicados y estos, a su vez, tienen un menor nivel de confianza que los Recursos Minerales Medidos (ECRR®, 2025).

Para clasificar los Recursos Minerales, debe realizarse una evaluación de la confianza en la estimación de todas las variables significativas. Es común que las categorías de clasificación (Inferido, Indicado y Medido) abarquen una gama de niveles de confianza; por lo anterior, los criterios utilizados para determinar esta confianza deben estar claramente documentados.

Figura 20. Relación general entre los Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas Minerales



Fuente: ECRR®, 2025.

Las técnicas de clasificación más comunes se basan en la búsqueda de vecindades, el espaciado entre puntos de control y/o la varianza de "kriging" (Parker and Dohm, 2014). Respecto a la varianza de "kriging", se presenta el siguiente ejemplo:

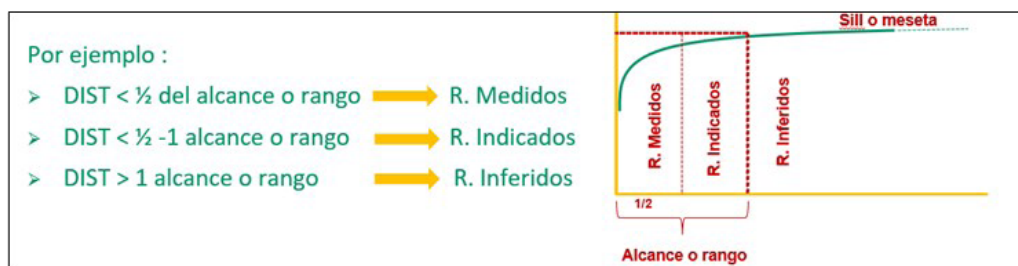
si X_B = valor medio del bloque, Y_{2B} = varianza del bloque, $Y_B = \sqrt{Y_{2B}}$ desviación de los valores del bloque, y si por definición el coeficiente de variación del "kriging" está establecido por la fórmula $Y_B/X_B \times 100$, podrían establecerse los siguientes rangos: Recursos Medidos = $Y_B < \text{al } 25\% \text{ de } X_B$; Recursos Indicados = $Y_B > \text{al } 25\% \text{ de } X_B$; y Recursos Inferidos = $Y_B > \text{al } 40\% \text{ de } X_B$.

En el mismo sentido, el autor propone una modificación a la varianza de “kriging”, la cual implica la eliminación de uno o más sondeos con mayor ponderación mientras se realiza el “kriging”, y el resultado de la varianza de “kriging” será utilizado para la clasificación. Una segunda postura del mismo autor basada en la simulación condicional utiliza un enfoque de ventana móvil para la clasificación en relación

con la unidad minera selectiva deseada basada en criterios de mayor volumen de producción.

Otros autores utilizan la distancia relativa desde una muestra basada en el rango del modelo de variograma seleccionado (Ver Figura 21).

Figura 21. Clasificación de recursos en función del rango o alcance del variograma



Fuente: Autores.

Otras técnicas consideran el número de muestras y su distribución, por ejemplo, si el número de muestras ideal por bloque estimado es 16, se podrían definir las siguientes categorías: > 10 muestras Recursos Medidos, 4 - 10 muestras Recursos Indicados y < 4 muestras Recursos Inferidos.

De forma complementaria, dentro de la guía de buenas prácticas del CIM (2019) se listan algunos otros parámetros que son usados comúnmente cuando se emplean métodos de estimación mediante ordenadores, entre los anteriores se destacan:

- El número de puntos de datos utilizados para estimar el tenor o el valor de un bloque determinado.
- El número de sondeos o de compuestos de sondeos utilizados.
- El paso de estimación (y los supuestos subyacentes) utilizado para estimar un bloque determinado.
- La desviación típica de las estimaciones de los bloques.
- La pendiente de la regresión de la ley “verdadera” del bloque sobre la ley “estimada” del bloque (Vann, Jackson y Bertoli, 2003).

- La evaluación de la confianza relativa en la estimación de la ley / tonelaje, es decir, los estudios geoestadísticos de espaciamiento de las perforaciones (Froidevaux, 1982, Deutsch, Leuangthong, y Ortiz, 2007, y Verly, Postolski, y Parker, 2014).
- Proximidad al sondeo más cercano y distancia media de los puntos de control.
- O la combinación de los parámetros descritos anteriormente.

Si bien el uso exclusivo de parámetros numéricos para realizar la categorización de Recursos Minerales se traduce en rapidez y en operaciones automatizables, el planeamiento puede dar lugar a una solución que, aunque matemáticamente sea correcta, puede no ajustarse a lo que debería conseguirse en la práctica durante una explotación minera. Además, que los resultados pueden generar dificultades a la hora de preparar las estimaciones de Reservas Minerales. Los resultados típicos de la anterior situación se presentaron en Stephenson y Stoker (1999) y Stephenson et. al. (2006), que acuñaron la expresión “perro moteado” para describir ejemplos de este fenómeno.

En estas situaciones, puede considerarse el uso de funciones informáticas conocidas como “*suavizadores de categorización*”, diseñadas para reducir el impacto del fenómeno del “*perro moteado*”.

Además, para aquellos modelos de Recursos Minerales que se utilizarán como insumo para las fases de estimación de Reservas Minerales, se sugiere a los profesionales colaborar con los Ingenieros de Minas que preparan las estimaciones de Reservas Minerales para seleccionar parámetros de estimación que sean compatibles con los requisitos de cada grupo. En la medida de lo posible, se anima a los profesionales a ajustar los parámetros de clasificación de los Recursos Minerales a los límites prácticos de los métodos de minería potenciales, por ejemplo, haciendo coincidir los límites de la categoría de Recursos Minerales con los niveles de minería, los bordes de los rebajes o los límites de zona, cuando sea razonable hacerlo (CIM, 2019).

3.4.7. Declaración de recursos minerales

Independientemente del enfoque específico utilizado o los procedimientos seguidos para la estimación, los profesionales deben asegurarse de que todas las declaraciones de Recursos Minerales satisfagan el requisito de tener “*perspectivas razonables para la extracción económica*” (ECRR®, 2025).

En la estimación de Recursos Minerales, una perspectiva razonable para la extracción económica es un juicio de valor económico (aunque preliminar) por parte de un profesional con relación a los aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales y otros, que podrían influenciar en la perspectiva de extracción económica. En otras palabras, es la evaluación inicial de un profesional donde indica que un Recurso Mineral tiene la probabilidad de ser extraído y procesado de manera rentable. Las cifras de tonelaje y ley deben citarse con precisión de acuerdo con la estimación (ver Tabla 4).

Tabla 4. Consideraciones al momento de definir las leyes o valores de corte dentro de las estimaciones de recursos minerales

CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	CONSIDERACIONES TÉCNICAS	
	Cielo abierto	Subterráneo
Localización del depósito	En el caso de los Recursos Minerales que pueden explotarse a cielo abierto, las “ <i>perspectivas razonables de extracción económica final</i> ” deben considerar requisitos técnicos. Como mínimo, las restricciones pueden abordarse mediante la creación de superficies de restricción (PIT SHELL) utilizando paquetes de software comerciales o métodos manuales.	Las declaraciones de Recursos Minerales para escenarios de minería subterránea deben satisfacer las “ <i>perspectivas razonables de una eventual extracción económica</i> ” mediante la demostración de la continuidad espacial de la mineralización dentro de una forma potencialmente explotable.
Escala del yacimiento		
Geología y continuidad de ley		
Método de extracción		
Calidad del concentrado (cuando aplique)		
Consideraciones medioambientales y sociales		
Procesos metalúrgicos		
Precios de los minerales		
Costos de disposición de residuos		
Tasas de cambio		
Recuperación metalúrgica		
Costos operativos (Extracción, procesamiento, administración, regalías, condiciones de función, entre otros).		

Fuente: Autores.

La declaración de que un Recurso Mineral tiene perspectivas razonables para la extracción económica es un requisito para que el Recurso Mineral sea reportado como tal. Esta declaración es importante para los inversionistas y las partes interesadas, ya que proporciona información sobre la viabilidad económica (aunque preliminar) del proyecto minero.

3.4.8. Revisión Por Pares

Es una buena práctica y consiste en llevar a cabo una auditoría o una revisión por pares de la estimación de Recursos, en particular cuando se trata de una estimación inicial o cuando se ha producido un cambio importante con respecto a estimaciones de Recursos Minerales anteriores.

La mejor práctica incluye el uso de revisiones internas o, si es necesario, externas de la estimación de Recursos Minerales, antes de la declaración de Recursos Minerales. De acuerdo con la CIM (2019), las consideraciones de la revisión deben incluir:

- Idoneidad de las perforaciones y de la base de datos de muestras,
- Idoneidad de los métodos analíticos y la representatividad de la muestra,
- Idoneidad de los dominios geológicos, los volúmenes de mineralización y los dominios de estimación,
- Adecuación del volumen/tonelaje de las zonas mineralizadas,
- Tratamiento de los valores atípicos,
- Suficiencia y fiabilidad de los insumos, y supuestos subyacentes, incluida la unidad de minería selectiva,
- Metodología de estimación,
- Validación y selectividad del modelo de Recursos,
- Criterios de categoría de confianza de Recursos Minerales,
- Declaración de Recursos Minerales.

► Recomendaciones: modelos y estimación de recursos minerales

Construcción del modelo geológico:

- Aprovechar todas las fuentes de información disponibles, como geofísica, imágenes de sensores remotos, trabajo de campo, trincheras y perforaciones, entre otros.
- Evitar tanto la simplificación como la complicación excesiva del modelo.
- Documentar y registrar todos los cambios que se realicen al modelo geológico con base en nueva información o actualizaciones.
- Validar la fidelidad y representatividad de los datos geológicos antes de construir el modelo, y justificar la exclusión de cualquier dato para evitar sesgos.

Consistencia y validación:

- Verificar la coherencia geográfica entre los datos de localización y la base topográfica.
- Asegurar que la topografía utilizada sea adecuada a la escala y características del área de estudio.
- Comprobar la coherencia entre los interceptos de perforaciones, datos subterráneos y superficies modeladas, especialmente en zonas extrapoladas por ausencia de datos.
- Presentar mapas, perfiles y modelos 3D para visualizar la ubicación de los datos que soportan el modelo (apiques, perforaciones, relaciones estratigráficas, entre otros).

Flujo de trabajo y software de modelación:

- Comprender los principios y pasos necesarios para la modelización en el software utilizado, y documentar el flujo de trabajo para garantizar coherencia, transparencia y materialidad.
- Revisar y actualizar el modelo geológico cuando se obtenga nueva información.

Interpretación geológica y dominios de estimación:

- Estudiar detalladamente la geología del yacimiento, considerando la litología, mineralización, estructuras y alteración.

- Utilizar análisis estadísticos para identificar tendencias y distribuciones dentro de cada dominio, y aplicar técnicas geostatísticas para medir la incertidumbre.
- Verificar que el análisis esté respaldado por un número suficiente de datos representativos y que los interpoladores seleccionados sean adecuados para las características del depósito.

Estadísticas y presentación de resultados

- Realizar un análisis exploratorio de datos (EDA) para cada dominio de estimación y presentar resúmenes estadísticos y gráficos claros y bien etiquetados.
- Documentar todas las observaciones durante el análisis para futuras etapas de estimación.

Métodos de estimación y validación:

- Seleccionar el método de estimación más apropiado para cada dominio geológico, basándose en los resultados estadísticos, densidad de información y distribución espacial de los datos.
- Realizar validación cruzada y comparaciones con datos adicionales que no hayan sido usados en la estimación original.

Categorización y confianza en recursos:

- Considerar la incertidumbre y los riesgos en la geometría, continuidad y control geológico al asignar categorías de confianza para los Recursos Medidos Indicados e Inferidos.
- Asegurarse de que el uso de Metales Equivalentes se base en datos metalúrgicos confiables para evitar inducir a errores en las estimaciones.

Más información

- **Rossi, M.E. & Deutsch, C.V. (2013).** *Mineral Resource Estimation*. Berlin: Springer. 192 pp.
- **David, M. (1977).** *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Amsterdam: Elsevier. 364 pp.
- **Journel, A.G., & Huijbregts, C.J. (1978).** *Mining Geostatistics*. London: Academic Press. 600 pp.
- **Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006).** *Open Pit Mine Planning and Design. 2nd Edition*. Boca Raton: CRC Press. 991 pp.
- **saaks, E.H., & Srivastava, R.M. (1989).** *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press. 561 pp.

Páginas Web

- **NI 43-101 Reports:** <https://www.sedar.com>
- **SRK Consulting - SRK Publications:** <https://www.srk.com/en/publications>
- **Geovia (Dassault Systèmes) - Geovia Products and Resources:** <https://www.3ds.com/products-services/geovia/>
- **The AusIMM - The Australasian Institute of Mining and Metallurgy:** <https://www.ausimm.com>
- **Mining Journal:** <https://www.mining-journal.com>

Archivos Multimedia

- **YouTube - EduMine:** <https://www.youtube.com/channel/UCRcWZrTjoYm3c4Unu-CyNIQ>
- **iTunes U - StanfordUniversity - GeoStatistics Course:** <https://itunes.apple.com/us/course/geostatistics/id495769968>
- **Coursera - Data Science and Statistics for Mining:** <https://www.coursera.org>

3.5. Aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) en la Estimación de Recursos y Reservas Minerales

La IA aún está en sus primeras etapas de desarrollo en el campo de la estimación de Recursos y Reservas Minerales. Sin embargo, su potencial para mejorar la precisión y eficiencia de este proceso es significativo. A medida que la IA continúe desarrollándose, es probable que se convierta en una herramienta indispensable para la industria minera (ver Figura 22).

La estimación de Recursos y Reservas Minerales es un proceso complejo que requiere la integración de datos de múltiples fuentes, como datos geológicos (litología, alteración, mineralización) geofísicos, geoquímicos y de perforación. La IA puede ayudar a mejorar este proceso de varias maneras, incluyendo:

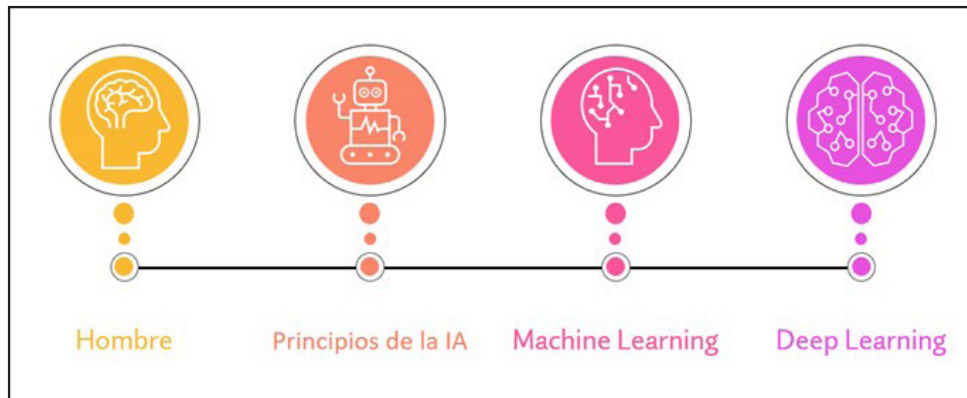
- **Mejora en la precisión de las estimaciones:** La IA puede ser utilizada para identificar patrones y tendencias en los datos que pueden ser utilizados para mejorar la precisión de las estimaciones.
- **Reducción del tiempo en las estimaciones:** la IA puede automatizar muchas tareas que actualmente se realizan manualmente, lo que puede reducir el tiempo necesario para realizar las estimaciones.
- **Mejora la eficiencia de las estimaciones:** la IA puede ayudar a los Geólogos e Ingenieros de Minas a centrarse en las tareas más importantes, lo que puede

mejorar la eficiencia del proceso de estimación. Sin embargo, también existen algunos desafíos que deben abordarse para la implementación exitosa de la IA en la estimación de Recursos y Reservas Minerales. Estos desafíos incluyen:

- **La disponibilidad de datos:** la IA requiere grandes cantidades de datos de alta calidad para realizar sus modelos.
- **La interpretación de los resultados:** los resultados de la IA deben ser interpretados por expertos profesionales para garantizar que sean confiables.
- **La aceptación de la industria:** la IA es una tecnología relativamente nueva y aún no está ampliamente aceptada por la industria minera.

A pesar de estos desafíos, la IA tiene el potencial de revolucionar la estimación de Recursos y Reservas Minerales. A medida que la tecnología siga desarrollándose y los desafíos se aborden, la IA se convertirá en una herramienta indispensable para la industria minera

Figura 22. Evolución de la inteligencia artificial.



Fuente: Autores.

La IA se puede aplicar a una variedad de tareas relacionadas con la estimación de Recursos y Reservas Minerales, incluidas:

Interpolación: La IA se puede utilizar para interpolar datos geológicos y/o geofísicos para crear modelos de la distribución de los Recursos Minerales.

Modelado geometalúrgico: La IA se puede utilizar para modelar el comportamiento de los Recursos Minerales a lo largo del tiempo y el espacio.

Simulaciones: La IA se puede utilizar para realizar simulaciones de las operaciones mineras y evaluar el impacto de diferentes factores.

Además, en la industria minera se puede hacer uso de la IA desde etapas tempranas de la exploración hasta el cierre minero:

- **Exploración:** la IA se puede utilizar para analizar grandes cantidades de datos geofísicos y geoquímicos para identificar nuevos depósitos minerales. Esto ayuda a disminuir los tiempos de procesamiento de datos y hacerlos más eficientes.
- **Operaciones mineras:** la IA se puede utilizar para automatizar tareas peligrosas o repetitivas, como la conducción de camiones mineros o la operación de equipos de excavación. Esto puede mejorar la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras.

- **Procesamiento:** la IA se puede utilizar para mejorar la eficiencia de los procesos de procesamiento mineral, como la separación de minerales y la recuperación de metales. Esto puede ayudar a las empresas mineras a reducir los costos y mejorar la calidad del producto.
- **Seguridad:** la IA se puede utilizar para detectar riesgos y prevenir accidentes en las minas. Esto puede ayudar a proteger a los trabajadores y a reducir los costos relacionados con los accidentes.
- **Sostenibilidad:** la IA se puede utilizar para reducir el impacto ambiental de la minería. Esto puede incluir el ahorro del uso de agua y energía, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la restauración de los entornos mineros.

Algunos ejemplos específicos de cómo se está utilizando la IA en la industria minera incluyen:

- El uso de drones para inspeccionar minas subterráneas de manera segura y eficiente.
- El uso de robots para extraer minerales de forma automatizada.
- El uso de análisis de datos para identificar tendencias y patrones que pueden ayudar a mejorar la eficiencia y la seguridad.

Por último, es importante tener en cuenta que la IA es una tecnología en rápido desarrollo y su uso en la industria minera está evolucionando constantemente.

4. Factores Modificadores

La definición de los factores modificadores está ampliamente divulgada en la literatura, y en esta guía se mencionan las siguientes referencias:

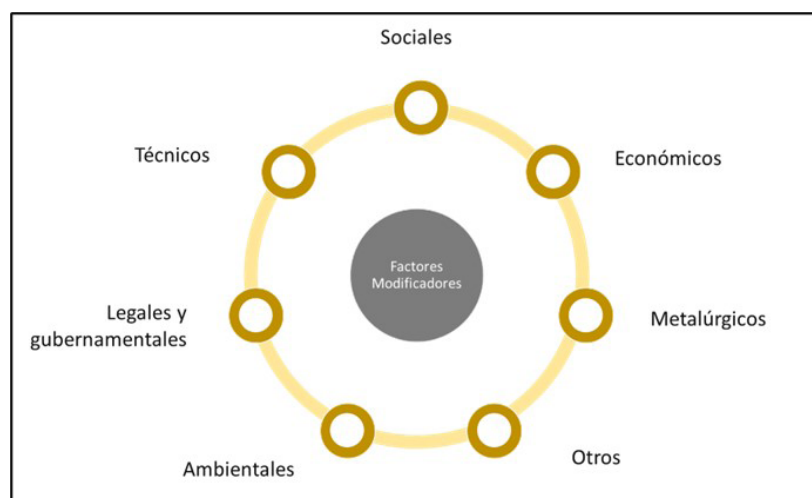
- Los Factores Modificadores corresponden a los componentes que permiten la extracción o no, de los Recursos Minerales y los puedan convertir en Reservas Minerales. Para lograr ese proceso, se deben pasar por las fases de prefactibilidad y factibilidad que hagan tangible el proyecto minero y poderlo transformar en un proyecto económicamente viable (CIM, 2019).
- Los Factores Modificadores son consideraciones usadas para convertir Recursos Minerales a Reservas Minerales. Estos incluyen, pero no se limitan a, factores de minería, procesamiento, metalúrgicos, infraestructura,

económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales (ECRR®, 2025). (Ver Figura 23)

Para ser considerada una Reserva Mineral, los Factores Modificadores deben aplicarse a la estimación de Recursos Minerales como parte de la preparación de un estudio de prefactibilidad (PFS) o un estudio de factibilidad (FS).

En la Figura 23 se resumen los Factores Modificadores más comunes en los proyectos de depósitos polimetálicos; si bien se tienen algunos que son aplicables en la mayoría de los depósitos minerales, se destaca la importancia de los factores geometalúrgicos y metalúrgicos del procesamiento, que tienen alta incidencia en la estimación de las Reservas de los minerales de interés de esta guía.

Figura 23. Factores Modificadores comunes en proyectos de depósitos polimetálicos.



Fuente: Autores.

La temática de los Factores Modificadores en la presente guía se realizará siguiendo el diagrama de la Figura 23, sin embargo, esto no implica que sea una metodología de carácter exclusivo, por el contrario, cada grupo de profesionales designado para la estimación deberá realizar su respectiva ruta de verificación de los Factores Modificadores y ajustarla a las necesidades y escalas específicas de cada proyecto.

► **Recomendaciones**

- La estimación de las Reservas Minerales debe ser un esfuerzo de equipo que involucre una serie de disciplinas que aparte de contar con la experiencia y experticia en las áreas técnicas, es recomendable que puedan realizar el reconocimiento en campo sobre las características propias del área objeto de estudio; de tal manera que se identifiquen y evalúen los Factores Modificadores de impacto para el proyecto en estudio.
- Describir el análisis realizado para cada uno de los Factores Modificadores para la conversión de Recursos a Reservas Minerales.
- Determinar el impacto económico y financiero de cada factor modificador en la conversión de Recursos Minerales a Reservas Mineras.
- No es conveniente reducir el análisis de los Factores Modificadores a un resumen de porcentajes de castigo, ya que no solamente se trata de obtener una disminución de volúmenes descontados del Recurso sin ningún soporte.

4.1. Factores Técnicos

Los factores técnicos en los depósitos polimetálicos cobran importancia al momento de la conversión de Recursos a Reservas Minerales, ya que incluyen aquellas variables como la geología, geometalurgia, calidad (tenores, leyes de corte), diseño minero, dilución, pérdidas planificadas y no planificadas, infraestructura de soporte, procesos metalúrgicos de beneficio, entre otros.

Las herramientas tecnológicas disponibles permiten el análisis de estas variables; los profesionales responsables de la estimación de las Reservas pueden verificar cuales de ellas serán las adecuadas para obtener el mejor soporte para el análisis de estos Factores Modificadores. Para el caso de los depósitos polimetálicos, el uso de software especializado es adecuado, dada la complejidad de los mismos, ya que permiten agilizar tiempos en el análisis de estos factores técnicos, con lo cual se puede lograr realizar sensibilidades para llegar a un resultado óptimo o muy acertado de la estimación de las Reservas Mineras.

4.1.1. Factores Geológicos

Las características geológicas presentes en el área del proyecto es un factor que debe considerarse para la toma de decisiones en los diferentes componentes de la estimación de los Recursos y su conversión a Reservas Minerales.

Una adecuada caracterización y conocimiento geometalúrgico de los depósitos minerales polimetálicos desde las etapas tempranas del proyecto, permitirá establecer impactos en los diferentes procesos de diseño minero y fundamentalmente de las recuperaciones en los procesos

metalúrgicos de los metales de interés; que en su comportamiento natural se presentan asociados a minerales de menor interés, esto puede influir notablemente en las posibilidades y costos para la realización del proyecto minero .

En este punto, se debe tener certeza del modelo geológico del depósito, junto con la topografía y cartografía estructural en detalle con el fin de determinar el sistema y método de explotación a implementar, es necesario entender las características estructurales y tipo de mineralización, y condiciones hidrológicas e hidrogeológicas y geotécnicas.

► Estructurales y tipo de mineralización

Uno de los factores que tiene más impacto son las consideraciones estructurales y el tipo de mineralización, que pueden impactar la viabilidad de la explotación, la elección del método de explotación, el secuenciamiento minero óptimo, entre otros aspectos.

► Recomendaciones

- Contar con información relevante sobre el tipo de mineralización y los condicionantes estructurales, permite detectar comportamientos habituales como pichamientos y despegues de vetas (división en otra veta), lo que conlleva un planeamiento más acertado, minimizando el riesgo de las inversiones económicas.
- Explorar durante el avance minero en los frentes de explotación mediante perforaciones cortas, métodos geofísicos, entre otros, permite ampliar el conocimiento de la estructura, ajustar el modelo geológico y con ello, perfeccionar el planeamiento minero.

► Hidrogeológicos

El estudio hidrogeológico es necesario para el entendimiento de las condiciones naturales del agua subterránea, su relación con las aguas de infiltración y corrientes superficiales, tanto en verano como en invierno. Con esta información se analizan los efectos que puede producir el agua subterránea sobre la explotación minera y viceversa, lo cual ayuda a seleccionar el método de explotación apropiado, de manera que se minimicen los impactos asociados.

Tanto para las minas a cielo abierto como para las subterráneas, es importante evaluar las propiedades químicas de las aguas subterráneas y el potencial de generación de ácido de la roca, ya que esto determinará si el agua de la mina se puede utilizar en la planta de proceso o, en caso de verter al medio ambiente, definir qué tratamiento requiere.

► Recomendaciones

- Contar con registros continuos de los caudales y de la condición química del agua presente al interior de las labores mineras, es una fuente útil para establecer medidas adecuadas de seguridad y manejo de los diseños mineros.

► Hidrológicos

En el estudio hidrológico se determinan las características hídricas del área, tales como la precipitación anual, la extensión de la cuenca hidrográfica, la escorrentía superficial, entre otros aspectos. Con el conocimiento hidrológico del área se diseñan las obras y sistemas necesarios para una operación minera eficiente y segura, se determinan las alternativas del control de inundaciones, se obtiene información de los volúmenes de agua disponibles para las operaciones y se planifican los sistemas de vertimiento. En el diseño de botaderos y la determinación de su ubicación, el factor hidrológico es determinante para lograr condiciones de operación seguras.

► Recomendaciones

- Contar con información histórica y continúa recolectada sobre precipitaciones y comportamiento de las cuencas, resulta una práctica acertada para predecir inundaciones, definir los requisitos de drenaje de la mina, y en el análisis del balance hídrico para la ingeniería de procesos y residuos mineros.

► Geotécnicos

La realización del estudio geotécnico comprende la caracterización del macizo rocoso, que permite determinar el comportamiento que tendrá la roca en el momento de la realización de las labores mineras. Dentro de la recolección de datos se tienen en cuenta los comportamientos de las diferentes unidades litológicas en el yacimiento, que pueden incluir, pero no se limitan a saprolito, roca caja o el mismo cuerpo mineralizado. Además, se considera el grado de fracturamiento, la presencia de agua, las variaciones litológicas, entre otros, que pueden afectar la estabilidad de las excavaciones.

Una adecuada caracterización del macizo rocoso, parte de una correcta descripción y toma de datos de los afloramientos, perforaciones y labores mineras, permitiendo la descripción y determinación de las propiedades geomecánicas, que son la base de los estudios de estabilidad de las labores mineras.

► Recomendaciones

- En el caso de los tajos a cielo abierto, es de utilidad realizar análisis de estabilidad cinemática y de equilibrio límite para evaluar la estabilidad de los bancos, bermas y ángulos de talud de trabajo y finales del talud propuesto, que soporten el diseño final de la explotación.
- El diseño de los botaderos y presas de relaves debe basarse en estudios geotécnicos sólidos para garantizar su estabilidad y condiciones de seguridad a largo plazo.

4.1.2. Factor Geometalurgia

La geometalurgia es una actividad interdisciplinaria que integra la geología, la ingeniería de minas / geotécnica, la metalurgia, la economía mineral y los parámetros geo-ambientales para crear modelos de bloques 3D espacialmente predictivos para maximizar el valor económico del proyecto (NPV), reducir los riesgos, aumentar la resiliencia y demostrar una buena gestión del recurso mineral.

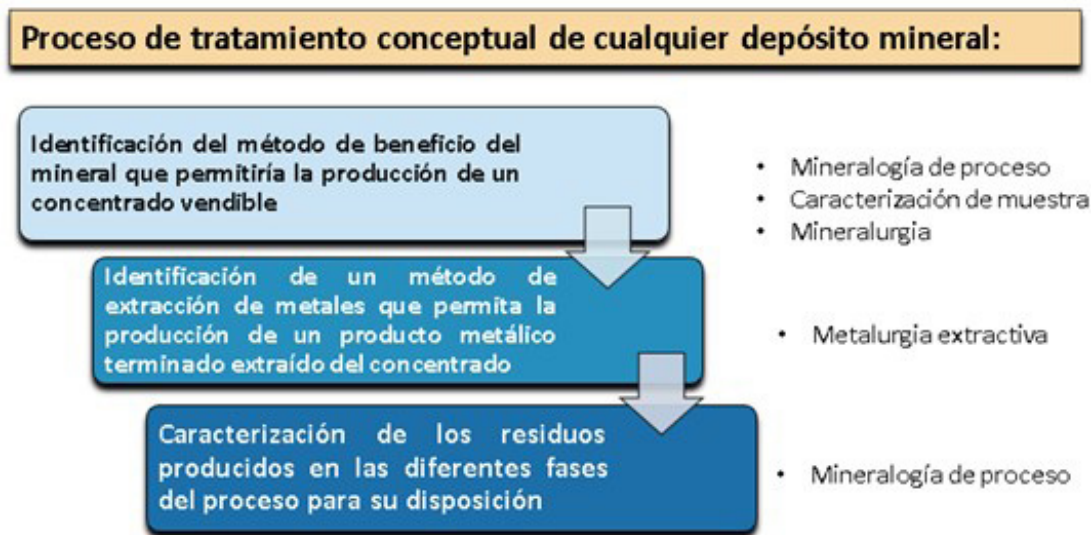
La pregunta definitiva que un programa geometalúrgico debe ser capaz de responder es: ¿cómo se comportará el bloque X de la mina cuando se procese?

Definición de opciones de procesamiento en un proyecto minero:

Los procesos mencionados comprenden las etapas que un Proyecto Minero puede pasar en su cadena de valor, primero generando un concentrado comercializable a partir de su mineral, mediante operaciones solo con transformación física del mineral (p.ej. trituración, molienda, flotación), seguidas de la producción de un producto metálico con mayor valor agregado a través de procesos con transformación química (p.ej. lixiviación, reducción, fusión, electroobtención), definiendo al mismo tiempo las mejores opciones de disposición de los residuos generados.

sica del mineral (p.ej. trituración, molienda, flotación), seguidas de la producción de un producto metálico con mayor valor agregado a través de procesos con transformación química (p.ej. lixiviación, reducción, fusión, electroobtención), definiendo al mismo tiempo las mejores opciones de disposición de los residuos generados.

Figura 24. Pasos recomendados para la definición de las opciones de procesamiento de cualquier depósito mineral



Fuente: CIM (2019)

Bases de la Geometalurgia

La geometalurgia se basa en la comprensión de que las menas son combinaciones de minerales, más no de elementos químicos y, teniendo en cuenta que todos los procesos tratan con minerales, son las características fisicoquímicas de estos las que determinan las condiciones de un proceso de recuperación industrial.

Las siguientes, son algunas de las bases que sustentan la geometalurgia:

- Las menas son combinaciones de minerales. Son entonces las características de estos las que determinan las condiciones de los procesos industriales. La determinación y control de procesos basada sólo en una composición química general del mineral puede ser engañosa.

- Los depósitos minerales están formados por más de un tipo de mena.
- Los minerales de ganga son mucho más abundantes que los de mena. Estos minerales pueden determinar, por ellos mismos, condiciones de procesos de minado, trituración, molienda, flotación, etc.
- En algunas menas el metal importante ocurre en más de un mineral. Los minerales tienden a presentar diferente comportamiento durante los procesos; las recuperaciones de un elemento pueden ser diferentes para diferentes minerales. Por otra parte, es el tipo de mineral de mena recuperado el que determina, por ejemplo, la ley de un concentrado que alimenta a una fundición.

- No reconocer las aseveraciones previas, implica problemas en los procesos (i.e. baja recuperación), de donde se concluye que las mezclas de menas de diferentes unidades geometalúrgicas pueden ser la solución adecuada durante la vida de una mina.
- El modelo geometalúrgico es el resultado del conocimiento global del depósito mineral en lo referente a su mineralogía, química, comportamiento en los procesos y recuperación. Esto significa que no deberían ocurrir sorpresas significativas durante la vida de una mina. Una premisa fundamental de la geometalurgia es que las características geológicas de un depósito mineral condicionan en gran manera la respuesta metalúrgica, lo cual, a su vez, permite definir la cantidad de Reservas Minerales.

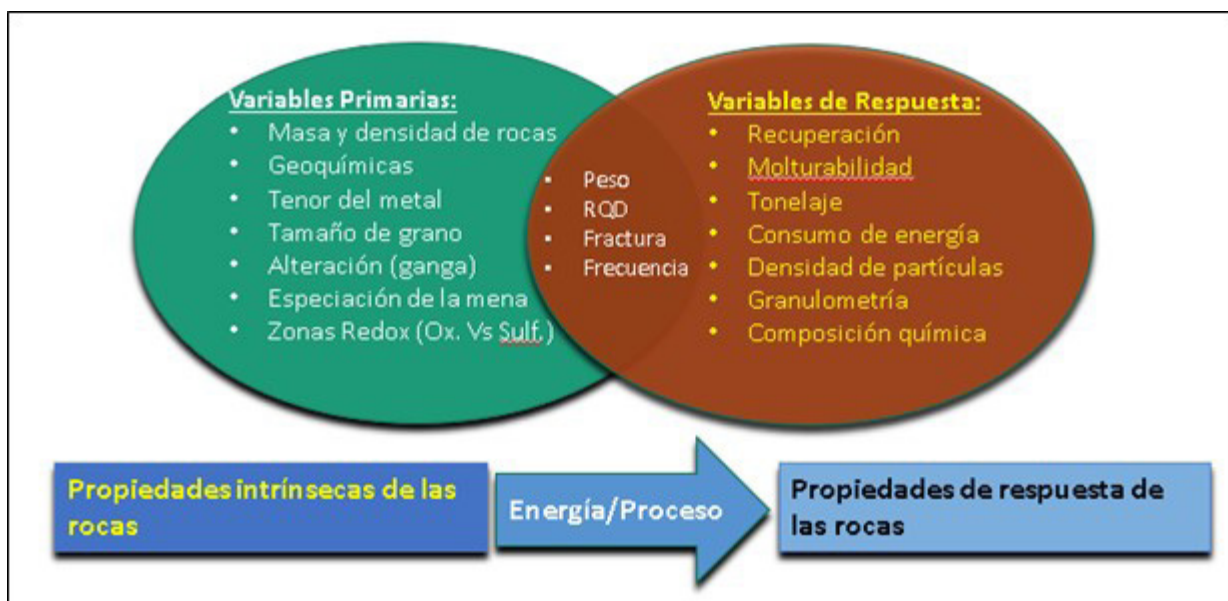
La geometalurgia brinda el conocimiento y la información de la variabilidad metalúrgica de los Recursos Minerales, para así reducir los riesgos de producción y mejorar la planificación de la producción para tomar mejores decisiones de gestión.

Clasificación de los Parámetros Geometalúrgicos:

Los parámetros geometalúrgicos clave se pueden clasificar como variables primarias y variables de respuesta (Ver figura 25)

- **Las variables primarias** son atributos de las rocas que son independientes del proceso de medición empleado. Una variable primaria es intrínseca a la roca, por ejemplo, el tamaño del grano, la ley de los metales, la mineralogía y otras propiedades de la roca. La mayoría de las variables primarias son aditivas, por ejemplo, leyes por unidad de masa y tenores de minerales por unidad de volumen, y normalmente pueden promediarse y estimarse tanto desde el punto de vista del muestreo (compósitos) como de la modelación de bloques.
- **Las variables de respuesta** son atributos de la roca (geología) que miden las respuestas a los procesos. Las variables de respuesta describen las propiedades de la roca que se expresan como respuesta a un proceso o mediante la aplicación de energía, por ejemplo, tonelaje, rendimiento, molturabilidad, recuperación metalúrgica, consumos de energía y resistencia de la roca intacta.

Figura 25. Parámetros geometalúrgicos claves



Fuente: Coward et al, 2009

Actualmente, en geometalurgia se consideran cuatro (4) tipos de procesos:

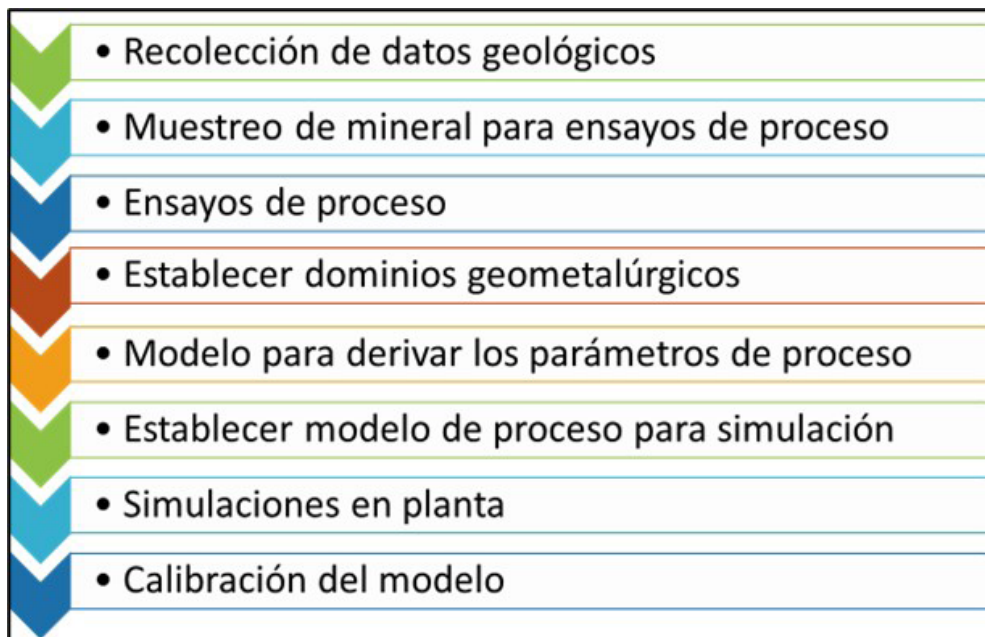
- Minería: voladuras como parte de la conminución;
- Procesamiento de minerales (mineralurgia): trituración, molienda, flotación, separación magnética, deshidratación, etc.;
- Metalurgia de procesos, por ejemplo, peletización y sinterización; y
- Medio ambiente (drenaje ácido de minas, residuos mineros, etc.).

Otro objetivo de la geometalurgia es reducir los riesgos de producción y mejorar la planificación de la producción para tomar mejores decisiones de gestión. Esto se consigue cuantificando la variabilidad de las propiedades/respuestas de la producción minera con modelos geometalúrgicos. El trabajo relacionado con la creación de tales modelos se denomina programa geometalúrgico.

Programa Geometalúrgico

Un programa geometalúrgico típico tiene los siguientes pasos (ver Figura 26):

Figura 26. Pasos de un programa geometalúrgico



Fuente: Autores

Recolección de datos geológicos: la definición de dominios espaciales en el depósito con similares características geológicas, geoquímicas, geofísicas, geotécnicas, mineralógicas y texturales (Dominios Geológicos o Unidades Geológicas). Para ello, se debe tener en cuenta el amplio conjunto de datos que se hayan obtenido durante las perforaciones realizadas en las labores de exploración y en la

base de datos de geoquímica del yacimiento. En resumen, se cubren variaciones en litología, alteraciones, mineralogía y también en gravedad específica de las rocas (ver ejemplo en la Tabla 5).

Muestreo de mineral para ensayos de proceso: La selección de muestras representativas a lo largo de los diferentes dominios geológicos del yacimiento es un paso esencial para asegurar resultados precisos en los programas de pruebas mineralógicas, metalúrgicas y medioambientales. Las muestras deben reflejar la variabilidad dentro de estos dominios, permitiendo que los resultados obtenidos sean aplicables a la operación futura. Para garantizar una evaluación metalúrgica confiable, es necesario realizar pruebas en muestras geográficamente diversas de la misma litología, de manera que se pueda calcular una desviación estándar precisa de las propiedades analizadas.

Las muestras se toman en intervalos de tamaño compatible con la futura explotación minera, y generalmente incluyen núcleos de perforación específicos para cada segmento minero. No se deben mezclar muestras individuales en compuestos para evitar que los resultados pierdan representatividad. La masa de muestra necesaria para las pruebas se determina de acuerdo con los laboratorios, y la longitud de los intervalos de muestra depende del diámetro y de la disponibilidad de material.

Reglas clave para la selección de muestras en ensayos de proceso:

- Asegurar el muestreo proporcional de todos los dominios (individuales y compuestos).

- Seleccionar muestras que reflejen la alimentación a planta y los primeros años de producción.
- Incluir toda la variabilidad del recurso y una dilución realista.
- Muestrear minerales atípicos y etapas diversas del proyecto.
- Obtener de 1 a 4 muestras por cada millón de toneladas, ajustando según la variabilidad del recurso mineral.

Ensayos de proceso: determinación del conjunto de pruebas necesarias (a nivel de laboratorio o de planta piloto) para generar los parámetros técnicos necesarios para el diseño del diagrama de flujo y las pruebas medioambientales (ver algunos ejemplos en la Tabla 6). La información metalúrgica necesaria para el modelo de bloques geometalúrgico se obtiene mediante ensayos. Debido a la gran cantidad de pruebas necesarias para un modelo preciso, las pruebas utilizadas deben ser confiables, baratas y a pequeña escala. Un programa típico consistirá en pruebas de mineralogía cuantitativa y pruebas metalúrgicas, siendo los tipos de pruebas necesarias específicas de cada proyecto. Es fundamental que las condiciones de las pruebas sean consistentes para cada muestra probada y deben realizarse en óptimas condiciones.

Tabla 6. Ejemplos de ensayos de proceso

ENSAYOS METALÚRGICOS	MOLIENDA	<i>Bond Work Index (BWi)</i>
		<i>SAG Power Index (SPI)</i>
		<i>Minnovex Cruher Index (Ci)</i>
		<i>D-80, P-80, T-80</i>
	FLOTACIÓN	<i>Average of kinetics (K-ave)</i>
		<i>Maximum Recovery (R-Max)</i>
	RECUPERACIÓN	

Fuente: Autores.

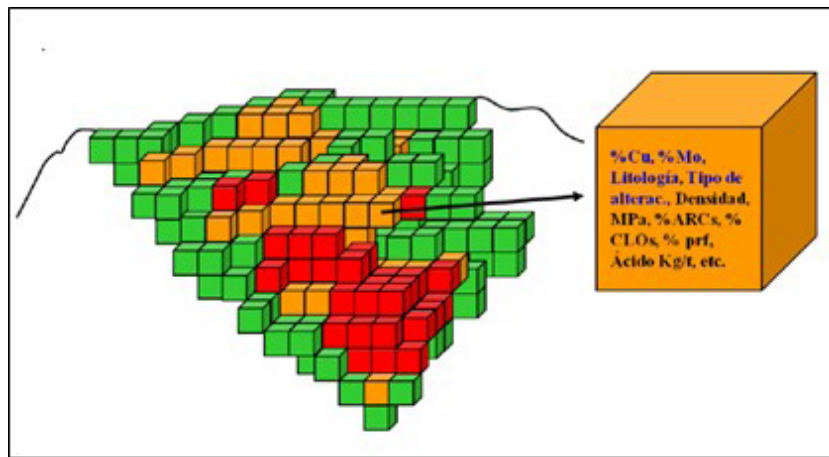
Establecer dominios geometalúrgicos: utilización de métodos geoestadísticos para poblar cada dominio del modelo de bloques con parámetros geológicos, geoquímicos, geofísicos, geotécnicos, mineralógicos y texturales determinados mediante las pruebas de proceso o extrapolados de los resultados de las pruebas.

La cartografía geometalúrgica consiste en estimar las en-

tradas geológicas y/o la respuesta metalúrgica en un modelo espacial; normalmente, la presentación espacial y el resultado, guardados en bloques separados se denomina modelo de bloques.

Cada bloque puede almacenar información geológica, de composición química, geotécnica, geomecánica, geofísica, metalúrgica y de otro tipo (ver ejemplo en la Figura 27).

Figura 27. . Ejemplo de modelo de bloques geometalúrgico

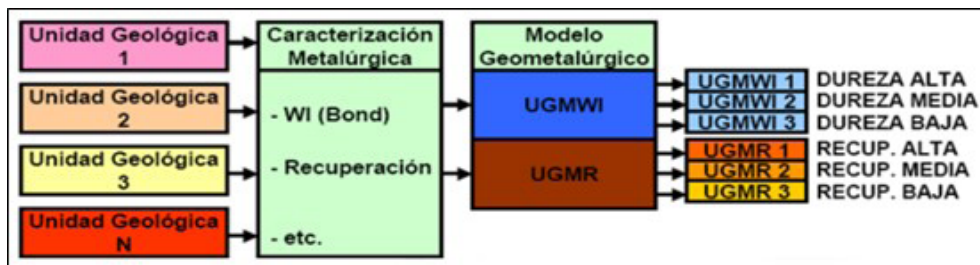


Fuente: Canchaya Moya, S. (2008)

Los paquetes de software que pueden aplicarse a la cartografía geometalúrgica son, por ejemplo, *Vulcan (Maptek)*, *Surpac (Geovia)*, *Leapfrog® (ARANZ Geo Limited)* y *Micromine (MICROMINE)*. La cartografía puede realizarse por unidades espaciales geometalúrgicas: clases y domi-

nios. La clase geometalúrgica se caracteriza por la homogeneidad en las respuestas del procesamiento de minerales. Estas muestran continuidad espacial que se denominan dominios geometalúrgicos o unidades geometalúrgicas (ver ejemplo en la Figura 28).

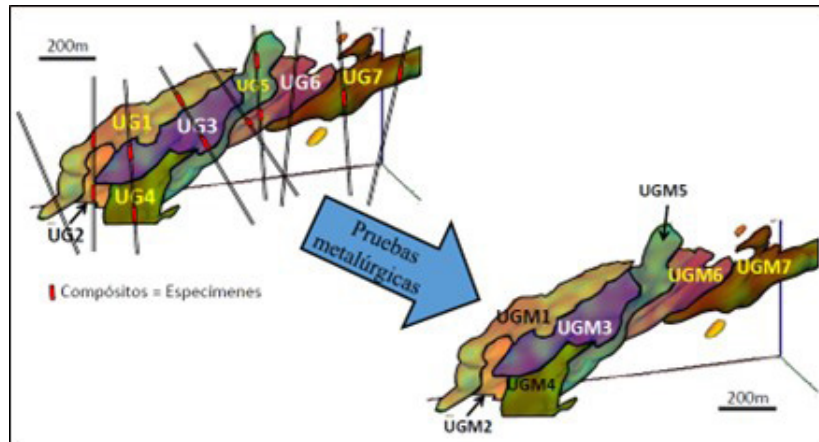
Figura 28. . Ejemplo paso de dominios geológicos a dominios geometalúrgicos



Fuente: Mendoza, O (2007)

En la figura 29, se resume el paso de los dominios geológicos en un depósito a los dominios geometalúrgicos.

Figura 29. Paso de dominios geológicos a dominios geometalúrgicos en un depósito mineral



Fuente: <https://avrconsultores.cl/dominios-unidades-geometalurgicas-ug-o-ugm/>

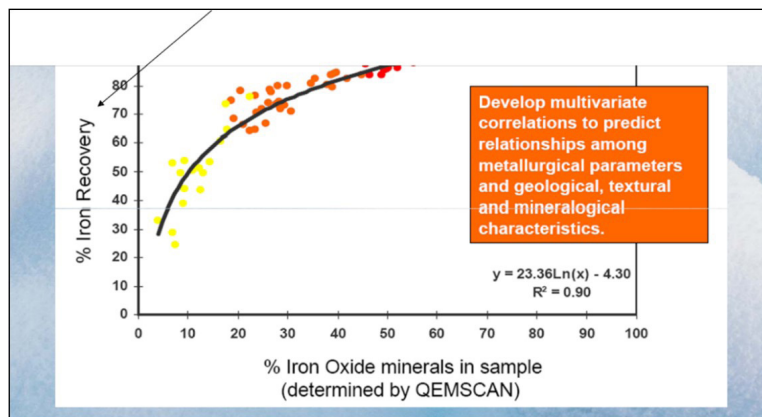
Modelo para derivar los parámetros de proceso: definición de relaciones multivariantes que correlacionan características como la geoquímica, la mineralogía y la textura, con parámetros de procesamiento relacionados; por ejemplo, con la triturabilidad, la flotación y la lixiviabilidad.

La salida del modelo representa el pronóstico de producción: producción (ton/h), toneladas de concentrado producidas a partir de 100 toneladas de mineral (extracción en masa), recuperación de metales, parámetros de calidad del concentrado, propiedades del relave y cifras clave económicas.

Establecer modelo de proceso para simulación: a partir de los resultados de las pruebas se crea un modelo predictivo (ver ejemplo en la Figura 30). Los parámetros de entrada de los modelos proceden de las propiedades de las rocas proporcionadas por el modelo geológico y los más utilizados son los grados elementales (p.ej. Cu wt%, Au ppm), tipo de mineralización (p.ej. mineral masivo, brecha, diseminado) y litología del depósito.

Simulaciones en planta: la simulación de las entradas geológicas o de las respuestas metalúrgicas es una práctica habitual para investigar escenarios de producción alternativos y estimar los riesgos de producción en la industria minera. En el mercado existen múltiples soluciones en software y se están desarrollando algunas más (p.ej. MetSim, HSC, FactSage).

Figura 30. Ejemplo de modelo de composición química del mineral vs recuperación en proceso.



Fuente: : Lamberg, 2011.

Calibración del modelo: optimización de las estrategias geológicas, mineras, de procesamiento de minerales, medioambientales, de marketing, económicas y corporativas para maximizar el valor del proyecto, minimizando al mismo tiempo el riesgo y las diversas fuentes de incerti

Pruebas Geometalúrgicas

Mineralurgia de minerales auríferos: la recuperación de Au a partir de minerales auríferos requiere considerar diversas variables, tales como: los elementos químicos presentes en el mineral, sus asociaciones mineralógicas, los factores de dureza del mineral, el tamaño de grano de Au y su distribución en la ganga y minerales distorsionantes de la ganga.

En las pruebas de metalurgia se identifican propiedades como mineralogía, moliendabilidad, dureza, flotación, entre otros. Estas pruebas sirven para hacer el modelo del diseño y pronóstico de la producción.

Todos estos factores se consideran y evalúan en el proceso de tratamiento del mineral para buscar identificar las condiciones que maximicen la recuperación metálica.

Una buena práctica consiste en realizar pruebas geometalúrgicas desde etapas tempranas, que permitan identificar aquellos factores que podrían castigar la recuperación de elementos hasta el punto de volver inviable el proyecto minero, como es el caso de la presencia de arsénico que inhibe la recuperación de Au, la presencia de carbón que daña la flotación, la presencia de arcillas que genera problemas en la recuperación, la presencia de minerales consumidores de ácido, entre otros (Alfaro, 2018 y 2019).

► Recomendaciones

- Establecer los dominios geometalúrgicos y alimentar el modelo de bloques con parámetros como la recuperación, contenido de metales, elementos penalizables y otros determinantes, se convierte en una herramienta útil al momento de realizar un análisis de sensibilidad del secuenciamiento minero, en aras de lograr homogenizar la mena que entrará al proceso de beneficio, para lograr un proceso más eficiente, rentable y finalmente con una recuperación metálica más estable.
- Debe hacerse el máximo esfuerzo para que las diferentes pruebas metalúrgicas y definición de zonas, con todas sus variables y detalles posibles, se realicen antes de la etapa de explotación, ya que en la misma por cuestiones operativas se dificulta en extremo, por ejemplo, la realización de nuevos sondajes para esclarecer aspectos geometalúrgicos y otros.

Más información

- **David, D 2014.** *Geometallurgical Guidelines for Miners, Geologists and Process Engineers – Discovery to Design in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation - the AusIMM Guide to Good Practice (monograph 30).*
- **Yagua P. J y Coa Y.W. 2002.** *Evaluación geológico-metalúrgica de mineral, sulfuro con alta presencia de cobre nativo, Mina BHP Billiton Tintaya S.A.*
- **Yagua P. J y Coa Y.W. Gamarra H. R. 2002** *Estudio de muestras de Chabuca Este-Oeste y Tajo Tintaya para zoneamiento geo metalúrgico del yacimiento Tintaya.*
- **Maldonado A. Maestría en Geología N° 208, Brasilia 2006** *Caracterizacao das estruturas Geológicas e estimativa da resistencia ao cisalhamento das discontinuidades na meneracao de cobre de Tintaya, Perú, Universidad de Brasilia-Instituto de Geociencias departamento de Geología.*

4.1.3. Factores Mineros

La selección del método de explotación, la planeación minera, los rendimientos en el proceso de extracción, la recuperación de los metales de interés en el proceso de beneficio, la dilución, las pérdidas y los limitantes de orden técnico que puedan presentarse, tienen impacto en la conversión de Recursos a Reservas Minerales.

► Métodos y sistema de explotación

La selección del sistema y método de explotación apropiado generalmente está determinada por la ubicación, forma, disposición estructural y propiedades físicas del depósito mineral. En términos generales, los depósitos ubicados en o cerca de la superficie son apropiados para el uso de métodos de minería a cielo abierto. Los depósitos ubicados a mayor profundidad generalmente se consideran para la aplicación de métodos de minería subterránea. En una etapa temprana del proceso de estimación de Reservas Minerales, se deben considerar varios métodos de minería para explotar el depósito. Una buena práctica incluye el asesoramiento de especialistas en mecánica de rocas / geotecnia al seleccionar el método de minería apropiado. Existen depósitos en los que el uso de más de un método de explotación es necesario. Un caso común incluye el inicio con métodos a cielo abierto seguido por métodos subterráneos. Se pueden utilizar varios métodos de minería en una mina subterránea para adaptarse a las variaciones en la mineralización.

Para el caso de una mina en operación, incluyendo beneficio, la información sobre costos operativos y costos de producción están disponibles para ser considerados en la selección de parámetros para la preparación de una estimación de Reservas Minerales. Es posible que se requieran cambios en las estimaciones de costos operativos si la operación minera o de beneficio se va a modificar o va a cambiar su capacidad en el beneficio. Los costos de capital asociados a cualquier cambio deberán incorporarse en el análisis de rentabilidad. Para nuevos depósitos, los costos

de capital y costos operativos generalmente se estiman desde principios básicos o se pueden obtener de información de proyectos similares.

Para aquellos casos en los que se requiera una combinación de métodos a cielo abierto y subterráneos, es posible estimar un tenor de corte (*cut-off*) diferente para cada método. Donde se contemple una estrategia de mezcla (*blending*) de diversos tipos de mineralización, el profesional idóneo debería revisar la estrategia propuesta para determinar si es técnica y económicamente viable.

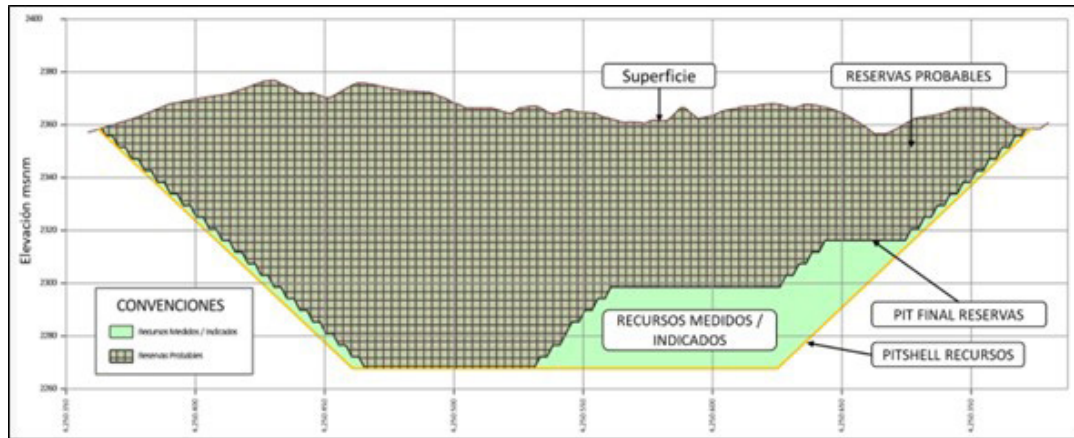
Los profesionales idóneos deberían evaluar los escenarios propuestos de explotación y beneficio con varios niveles de producción al estimar las Reservas Minerales. Cuando sea apropiado, también se deben considerar otras configuraciones de mina y planta. Este trabajo puede implicar varias iteraciones y requerirá aportes de otros miembros del equipo, especialistas en áreas como geotécnica, metalurgia, medio ambiente, entre otros. Los profesionales idóneos también deben asegurar que el equipo minero seleccionado sea apropiado para el método de minería planteado y los volúmenes de producción. Una errada selección de los equipos puede influir negativamente en los factores de dilución y extracción. Los profesionales idóneos deben tener un alto nivel de confianza en la viabilidad de los métodos de minería y beneficio considerados al determinar las Reservas Minerales.

La extracción máxima de minerales con una dilución mínima suele ser el criterio principal para la selección del método de minería, soportado por consideraciones económicas en el contexto del cronograma de vida útil de la mina. Las recuperaciones metalúrgicas aplicadas deben basarse en pruebas de proceso que establezcan la relación entre los tenores de alimentación de la planta de beneficio y el tenor recuperado del producto de interés y los costos operativos. Cualquier mezcla de estéril en la alimentación al circuito del molino puede afectar la recuperación o los costos operativos y esta posibilidad debe considerarse durante las pruebas metalúrgicas.

► Métodos a Cielo Abierto

La envolvente de la mina (*Pit Shell*) que define el límite del *pit* final, así como las etapas intermedias, generalmente se obtienen utilizando algoritmos de optimización a cielo abierto; sin embargo, también se pueden utilizar otros métodos que no requieren envolventes (*Pit Shell*).

Figura 31. Pit Shell de Recursos y Reservas



Fuente: :Autores

Estos métodos incluyen la planeación de bloques y la simulación estocástica. La información almacenada en el modelo de Recursos Minerales, incluidos los tenores, los porcentajes de bloque, la densidad del material, la inclinación de taludes, los tipos de roca y los valores de NSR, son importados al software de optimización. El proceso de optimización para la declaración de una Reserva Mineral se lleva a cabo utilizando únicamente Recursos Minerales Medidos e Indicados para definir los límites óptimos de minería. El proceso de optimización incluye varias envolventes (Pit Shell) que se definen de acuerdo con diferentes factores de ingresos. Para seleccionar el límite del *pit* final, se puede llevar a cabo un análisis de envolventes incrementales para evaluar la contribución de cada *pit* consecutivo al Valor Presente Neto (VPN) a una capacidad constante de planta de procesamiento.

Los resultados de optimización de cada una de las envolventes (Pit Shell) se analizan de manera independiente para seleccionar una envolvente de *pit* final y para usar en la preparación del diseño final del *pit*, junto con cualquier selección de *pit* de inicio. El objetivo de la envolvente del *pit* final suele ser maximizar el tenor y el VPN del proyecto; otros objetivos también pueden contribuir a la selección de una envolvente de *pit* final. Para determinar la envolvente de *pit* óptima, se realizan análisis de flujo efectivo considerando la secuencia de minería para todas las envolventes de *pit* anidados.

► Métodos subterráneos

Una discusión detallada de todos los posibles métodos de

minería en todas las situaciones posibles está por fuera del alcance de esta guía; sin embargo, existen diferentes fuentes de referencia disponibles sobre el tema, incluido el Manual de Ingeniería Minera de SME (2014).

Algunos de los parámetros a considerar en la selección de los métodos de minería subterránea pueden incluir:

- Ancho, alto y longitud mínima de la excavación,
- Tamaño y ubicación de los pilares,
- Tipo de soporte,
- Consideraciones de secuenciamiento,
- Consideraciones geológicas/estructurales,
- Elección de equipos,
- Ventilación y calidad del aire,
- Consideraciones geotécnicas, y
- Consideraciones de seguridad y salud en el trabajo.

Se deben incluir gráficas representativas de las cámaras planeadas para demostrar claramente la metodología que se está utilizando y qué tan bien se ajustan a la forma del depósito. Las consideraciones y cálculos para definir la dilución deben estar documentadas. El análisis de las propiedades de la roca (mecánica de rocas) debe ser revisado durante el proceso de diseño de la mina.

Para aquellos casos en los que se propongan métodos de minería a cielo abierto y subterráneos, se requiere un análisis de los escenarios posibles para identificar la opción

óptima para realizar la transición de cielo abierto a subterráneo. Con base en este análisis, el diseño de Vida Útil de la Mina (*Life-of-Mine*) se prepara a partir de los diseños mineros optimizados en el escenario más favorable.

► Diseño Minero

El plan de mina, los diseños, el plan de producción y los cronogramas de explotación son la base de la estimación de Reservas Minerales. El plan de mina requiere una comprensión exhaustiva del depósito mineral, estándares y procesos rigurosos, información tecnológica robusta y útil, y personas capacitadas. La planificación de la Vida Útil de la Mina es clave para identificar la dirección estratégica de cualquier mina, y la planificación minera a corto plazo es clave para la previsión y las expectativas de presupuesto. Los criterios de diseño geotécnico suelen ser los impulsores principales para el diseño del tamaño y la forma de las excavaciones seguras. Es necesario implementar un riguroso proceso de revisión de la planeación minera para asegurar que se cumplan los criterios de diseño. La viabilidad y el éxito de cualquier plan minero depende de la certeza de los supuestos de entrada. El nivel de detalle y precisión debe aumentar a medida que el plan minero avanza, pasando de los estudios iniciales (Pre-Factibilidad) hasta estudios avanzados (Factibilidad) y la etapa operativa.

La preparación de los diseños de Vida Útil de la Mina (*Life-of-Mine*) comienzan con la preparación de superficies o volúmenes optimizados, tanto para minas a cielo abierto como subterráneas, utilizando software especializado o métodos manuales.

► Optimización

Minas a cielo abierto: Para la elaboración de envolventes (Pit Shell) para minas a cielo abierto se emplean, en la mayoría de los casos, softwares especializados y, en algunos casos, métodos manuales. Las envolventes iniciales de los *pits* se desarrollan aplicando al modelo de bloques de Recursos Minerales rutinas de optimización. Si bien la industria minera utiliza varias rutinas de optimización, el algoritmo de *Lerchs-Grossmann* es uno de los más empleados para crear superficies de pits optimizados a cielo abierto (Lerchs y Grossmann 1965, Alford y Whittle 1986, Roditis 1993).

Estas rutinas de optimización pueden generar una serie de superficies preliminares que utilizan parámetros técnicos y económicos específicos, como son:

- Ángulos de inclinación de taludes,
- Precios de metal/*commodities*,
- Recuperaciones de metal/*commodities*,
- Costos operativos, y
- Regalías y flujos de caja (según corresponda).

La selección de parámetros de entrada para la optimización del pit a cielo abierto debe estar respaldada por todos los datos reales y relevantes disponibles. Cuando los datos reales no estén disponibles, se pueden derivar valores estimados/asumidos en función de situaciones comparables. Las limitaciones de los datos disponibles deben manifestarse al clasificar el material en las categorías de Reserva Mineral Probada o Probable.

Es importante entender que las superficies resultantes representan una serie de soluciones matemáticas basadas en los parámetros de entrada. Estas superficies no se basan en los criterios técnicos y económicos detallados que se requieren para preparar los diseños de Vida Útil de Mina (*Life-of-Mine*) finales. En consecuencia, las superficies generadas utilizando software de optimización a cielo abierto nunca deben usarse para preparar declaraciones de Reservas Minerales, ya que solo actúan como guía para la preparación del diseño final de la Vida Útil de Mina (*Life-Of-Mine*).

Se debe llevar a cabo una validación de los resultados de cualquier optimización a cielo abierto. Se sugiere a los profesionales realizar todos los ejercicios de validación necesarios y apropiados para garantizar que los resultados de las optimizaciones sean matemáticamente correctos y en general estén de acuerdo con los resultados esperados.

Minas Subterráneas: para la preparación del diseño de Vida Útil de Mina (*Life-of-Mine*) de un proyecto subterráneo, el proceso generalmente comienza generando una serie de labores mineras proyectadas que satisfacen varios parámetros y características de entrada, como:

- Continuidad,
- Contenido de mineral o tenor de corte (*cut-off grade*),
- Geometría,
- Parámetros geotécnicos,
- Ancho mínimo de explotación,
- Altura máxima de la labor minera,
- Longitud máxima de la labor minera,

- Inclinación mínima,
- Cambio máximo de panel a panel en rumbo e inclinación,
- Variación en el rumbo e inclinación de la mineralización, y
- Condiciones de superficie.

Se requiere la selección de un método de minería (o combinación de métodos) para completar este trabajo. Los paneles de explotación iniciales pueden crearse utilizando métodos manuales o software.

Considerando que la forma, ubicación, características geotécnicas y características metalúrgicas de la mineralización pueden variar dentro de un depósito, es importante que los profesionales comprendan cómo estos cambios pueden afectar los paneles de explotación iniciales, incluyendo las pérdidas de minería y la dilución. Los parámetros de entrada deben variarse y ajustarse para acoplar los cambios en las características espaciales, geométricas y metalúrgicas de la mineralización según corresponda.

Al usar métodos digitales, los profesionales deben darse cuenta de que los paneles de explotación potenciales son una solución matemática simple basada en un conjunto dado de parámetros de entrada. No necesariamente cumplen con todos los requisitos de viabilidad técnica y económica de las declaraciones de Reservas Minerales. Como resultado, las formas de explotación obtenidas mediante el uso de software de optimización nunca deben usarse solas para preparar estimaciones de Reservas Minerales sin inspección, validación y revisión, ya que solo actúan como guía para la preparación del diseño final de la Vida Útil de Mina (*Life-of-Mine*).

La selección de los parámetros de entrada para la preparación de paneles de explotación subterránea debe estar

respaldada por todos los datos relevantes y datos reales disponibles. Cuando los datos reales no estén disponibles, se pueden obtener valores estimados en función de situaciones comparables. Las limitaciones de los datos disponibles deben tenerse en cuenta al clasificar el material en las categorías de Reserva Mineral Probada o Probable.

La validación de los resultados de optimizaciones subterráneas o formas de excavaciones creadas manualmente es un paso importante para garantizar la alta calidad de las estimaciones de Reservas Minerales. Los profesionales deben llevar a cabo todos los ejercicios de validación que consideren apropiados y necesarios para asegurar que los resultados sean matemáticamente correctos y razonables, y estén en línea con las expectativas. Las modificaciones y ajustes a los paneles de las excavaciones propuestas deben aplicarse manualmente donde sea necesario para corregir cualquier resultado no deseado antes de proceder a la siguiente fase de trabajo.

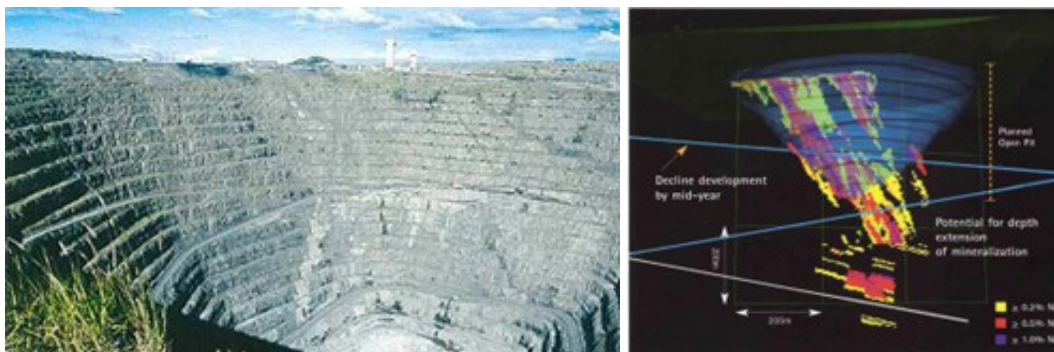
► Métodos de Explotación a cielo abierto

La alternativa de selección de un método a cielo abierto conlleva un análisis exhaustivo de múltiples variables, ya que, dependiendo de las condiciones geológicas y el tipo de mineralización, los metales se convierten en el impulsor de valor.

A continuación, se hace referencia a algunos de los métodos de explotación a cielo abierto más empleados en proyectos de depósitos polimetálicos, sin embargo, la explicación exhaustiva de cada método y los criterios de selección del método apropiado está por fuera del alcance de esta guía.

Open PIT- Cortas: en yacimientos masivos o de capas inclinadas, la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendente, con secciones verticales en forma troncocónica (ver Figura 32).

Figura 32. Mina de Palabora



Fuente: : Cortesía de Rio Tinto

La profundidad de estas explotaciones suele, en algunos casos, superar los 300 m, donde las posibilidades de relleno del pit con los propios estériles son escasas, por ello, siempre es necesario crear depósitos exteriores para albergar esos materiales.

► **Métodos de Explotación subterránea**

Dentro de los parámetros relevantes en la selección de los métodos de minería subterránea de polimetálicos se pueden incluir:

- Tipo de yacimiento.
- El tenor y la distribución del yacimiento, que son los factores que más influyen en la economía y en la escala de explotación. En los yacimientos de alto tenor, el objetivo es minimizar la dilución y maximizar la recuperación (p. ej., uso de rellenos estabilizados); en los yacimientos de bajo tenor, los costos unitarios de ex-

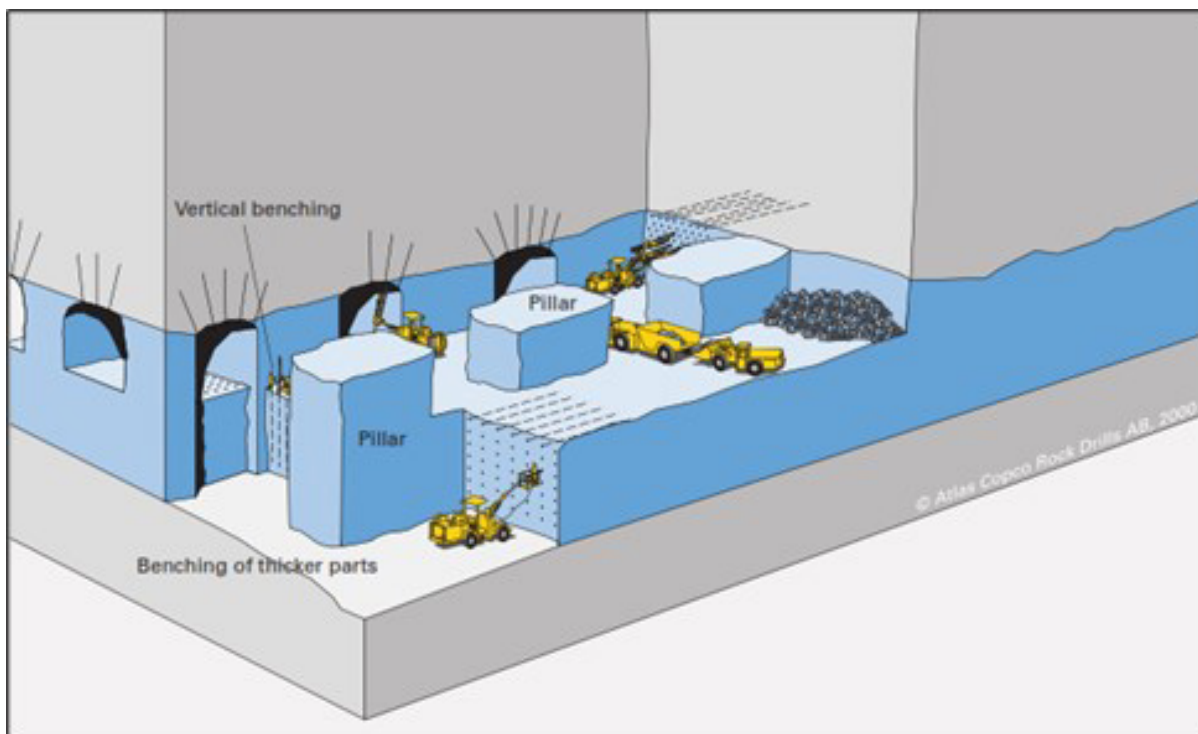
tracción son dominantes, por lo que es primordial una mayor escala.

- Consideraciones geológicas/estructurales.
- Consideraciones geotécnicas, geomecánicas y de las aguas subterráneas, que limitan en gran medida el tamaño de las excavaciones y, por lo tanto, la escala de producción.

A continuación, se hace una breve descripción de algunos métodos de minería subterránea usados en este tipo de depósitos, la explicación exhaustiva de cada método y los criterios de selección del método apropiado están por fuera del alcance de esta guía:

Cámaras y pilares: en la extracción se dejan pilares del mineral para sostener el techo. Las cámaras se construyen en forma múltiple y paralela. Se hacen tan anchas como las características y propiedades de resistencia de la roca caja y del mineral en explotación lo permiten.

Figura 33. Método de cámaras y pilares

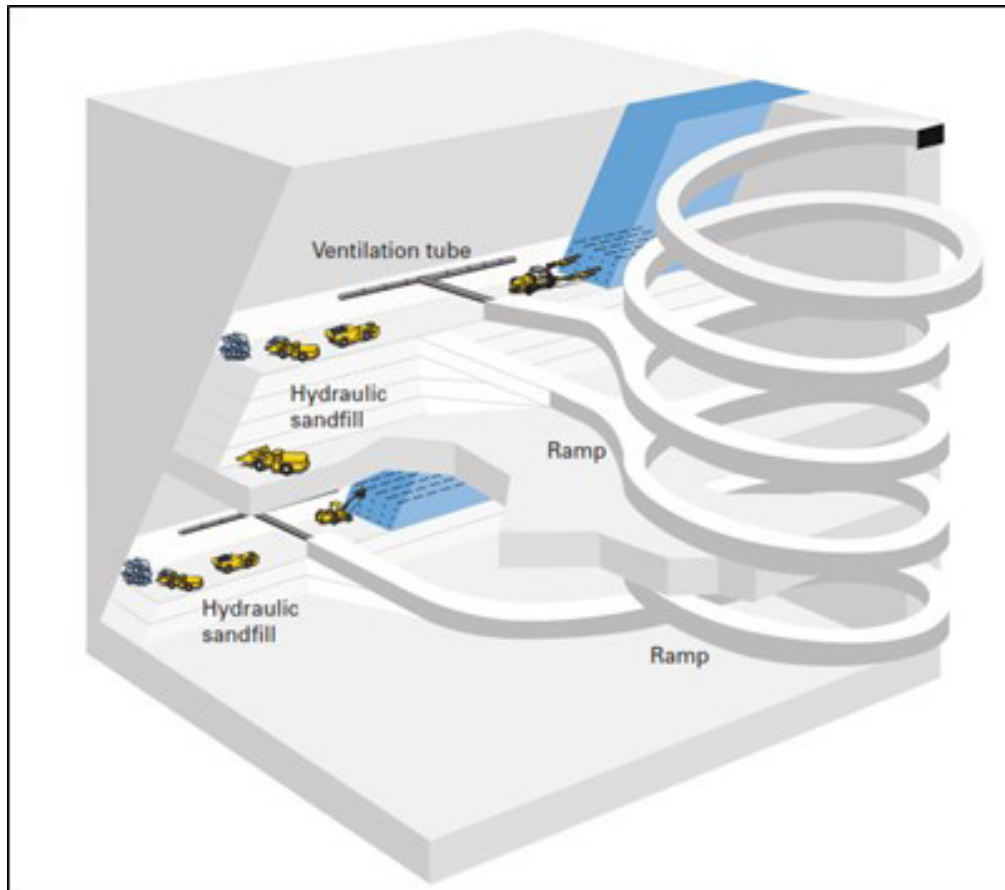


Fuente: : Atlas Copco, 2007

Corte y relleno (Cut and Fill): el método de corte y relleno se aplica en la explotación de yacimientos de alto buza-

miento, en estratos con estabilidad buena a moderada y una mineralización de tenores comparativamente altos.

Figura 34. Método de corte y relleno

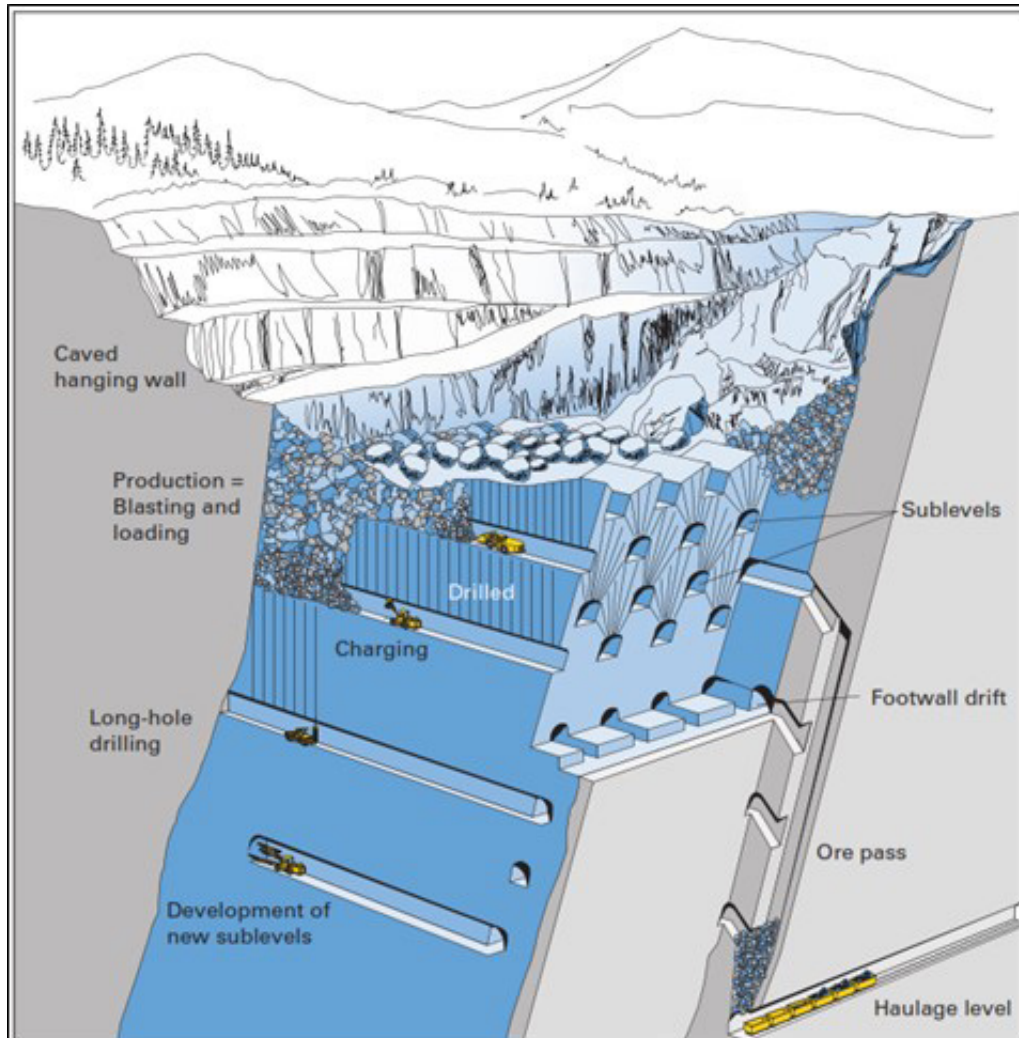


Fuente: : Atlas Copco, 2007

Hundimiento por subniveles (Sublevel caving): el hundimiento por subnivel (*Sublevel Caving -SLC*) se adapta a grandes yacimientos, con ángulos de buzamiento pronunciados y continuidad en profundidad. Se emplea para extraer capas de roca o mineral en un patrón de hundimiento controlado cuando la gravedad y la presión de los terrenos

situados en el techo obligan al derrumbe; a medida que se extrae el mineral, el techo de la mina se derrumba gradualmente creando una superficie hundida. Cada zona expuesta a la explotación por el método *Sublevel Caving*, reacciona con un alto porcentaje de dilución propio al minado masivo expuesto.

Figura 35. Método de hundimiento por subniveles (Sublevel Caving).

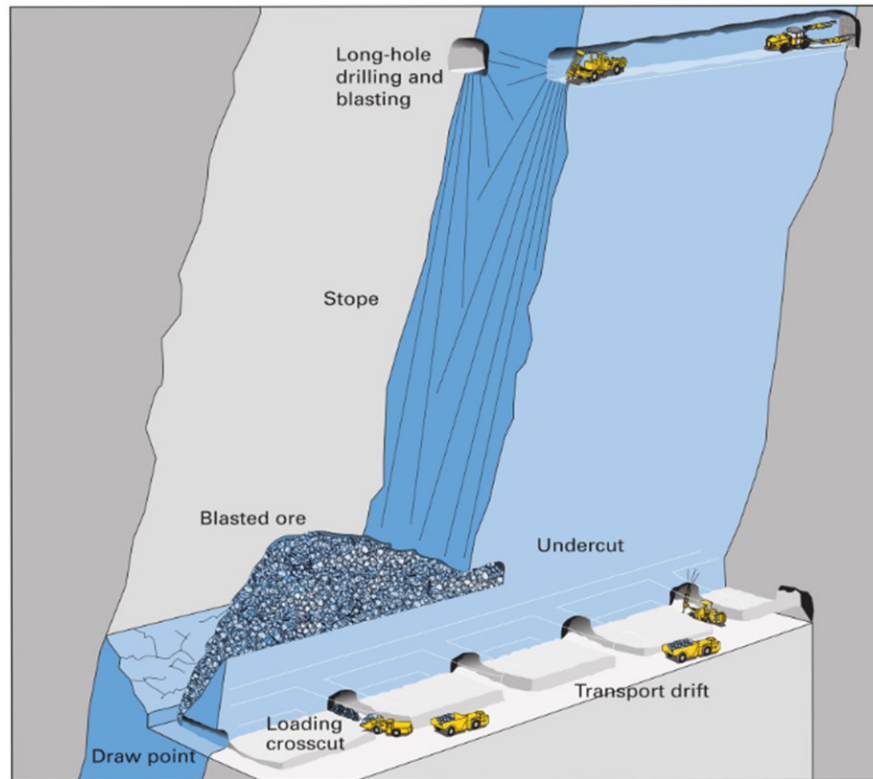


Fuente: : Atlas Copco, 2007

Sublevel Open Stopping: el método de *Sublevel Open Stopping (SLOS)* se utiliza en la explotación de depósitos minerales con ángulos de buzamiento pronunciados donde la inclinación del respaldo de piso excede el ángulo de reposo; existe roca estable tanto en los respaldos de techo y

piso; mineralización y roca caja competentes; y límites regulares de la mineralización. El método de *Sublevel Open Stopping* recupera el mineral en grandes cámaras abiertas, que normalmente se rellenan para permitir la recuperación de pilares.

Figura 36. Método de Sublevel Open Stopping (SLOS)



Fuente: : Atlas Copco, 2007

Más información

- Mining methods underground mining, Atlas Copco Second edition 2007.

► Planificación minera y Diseño de la explotación

La planificación minera y la preparación de diseños y programas de explotación constituyen la base de la estimación de las Reservas Minerales. Los criterios y cálculos utilizados para el diseño geométrico final de la explotación, tales como: dimensiones mínimas y máximas, anchos, alturas, longitudes, ángulos de corte, etc., dependiendo del sistema de explotación y de los equipos mineros seleccionados, son variables determinantes para establecer los factores de dilución y recuperación planeados.

Desde las primeras fases del proyecto se debe realizar un análisis de selección de áreas destinadas para la disposición de los materiales estériles, que debe incluir: locación, diseños, estudios de estabilidad de los taludes, generación de drenajes ácidos, distancias y costos asociados. En el caso de requerir la construcción de presas de relaves, es importante que se tenga una adecuada caracterización de los residuos que serán obtenidos al final del proceso de

beneficio (colas) para definir el manejo de los drenajes ácidos y su disposición final.

► Recomendaciones

- Un correcto análisis de los condicionantes geológicas, geomecánicas y geometalúrgicas, son claves para establecer el diseño óptimo. El conocimiento del comportamiento por bloques de sus leyes y/o tenores, y de sus contenidos minerales; además de la dilución y recuperación, y la relación de descapote, permitirá tener una decisión más asertiva al momento de la elección del método de explotación, lo cual impactará de manera importante en la estimación de las reservas.
- En el análisis para la selección del área, diseño y construcción del botadero, es imprescindible incluir el impacto de factores ambientales, sociales y económicos determinantes para la toma de decisiones.
- Evaluar desde las fases iniciales, la posibilidad de involucrar los materiales presentes en los residuos estériles y en los relaves en procesos de economía circular.

► Dilución Minera

La dilución se refiere al material que se encuentra por debajo del tenor de corte (*cut-off*), incluido el material estéril, pero que es extraído de manera intencional o involuntaria y debe ser considerado en las estimaciones de Reserva Mineral ya que “diluye” la estimación del tenor promedio y aumenta el volumen extraído. Los profesionales deben describir cómo se aplicaron las estimaciones de dilución en la preparación de la estimación de Reserva Mineral. La elaboración de un diagrama para explicar la estimación de dilución utilizado suele ser muy útil. A continuación, se describen algunos de los tipos comunes de dilución encontrados en minas a cielo abierto y subterráneas:

► Dilución en Cielo Abierto.

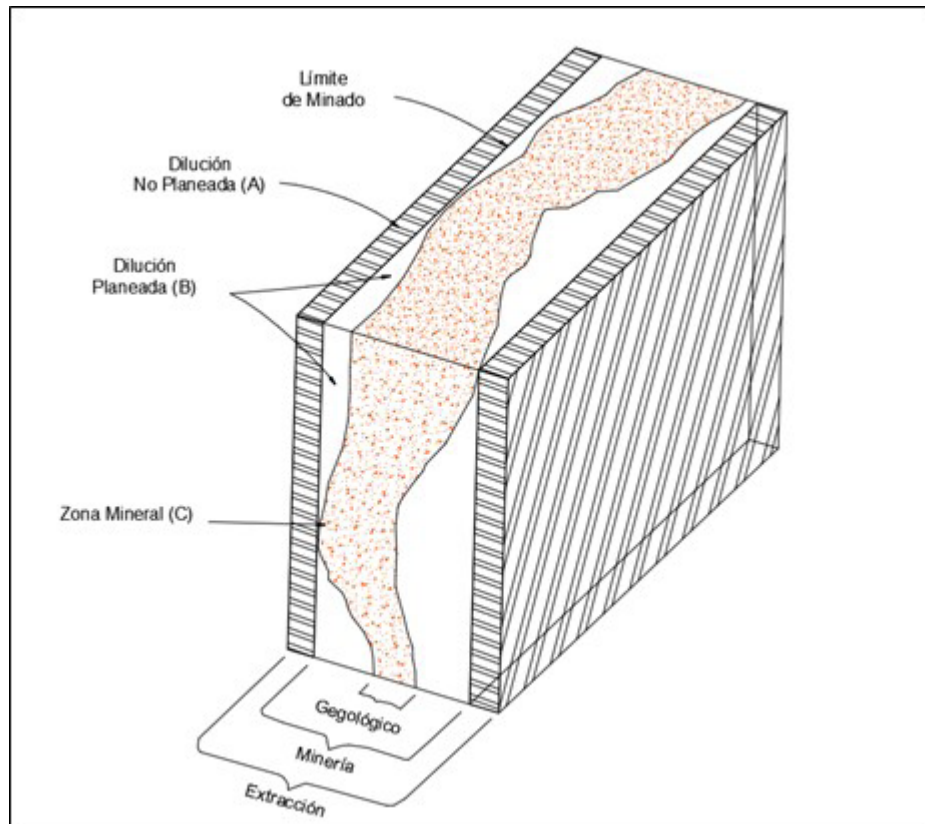
En las minas a cielo abierto, se establece una envolvente de minería donde se llevará a cabo la extracción. La envolvente de minería en algunos casos incluye material que se encuentra por debajo del tenor de corte, debido a que este material no puede ser removido selectivamente durante la operación minera. Este material se denomina dilución interna.

También se debe considerar la dilución externa o no planificada al preparar las estimaciones de Reserva Mineral. Este tipo de dilución resulta de la extracción de material estéril que se mezcla con el material mineralizado a lo largo del perímetro de las áreas explotadas en el momento de la excavación. Este tipo de material también debe incluirse en las estimaciones de tonelaje y tenor de las Reservas Minerales. La dilución no planificada típicamente ocurre como resultado del movimiento del material dentro del contorno de minería.

► Dilución minas subterráneas.

En las minas subterráneas, al igual que en las minas a cielo abierto, se presentan situaciones en las que parte del material que se encuentra por debajo del tenor de corte debe ser extraído debido a que no puede ser excluido selectivamente de los contornos de minería planificados en el momento de la excavación. Este material de bajo tenor también suele denominarse dilución interna. En algunos casos, durante la etapa de diseño de los tajos, las formas de la excavación planificada no coinciden con los contornos de la mineralización. Las áreas fuera del contorno de la mineralización, pero dentro de los tajos planificados, suelen denominarse dilución planificada y deben ser excavadas por razones técnicas y operativas. Además de la dilución planificada mencionada anteriormente, la dilución puede resultar del material adicional que se extrae como resultado de razones no controladas, no planificadas o imprevistas. Este material se conoce a menudo como sobredimensión, dilución no planificada o dilución externa.

Figura 37. Diferenciación entre dilución planificada y dilución no planificada



Fuente: : Scoble, (1994), Modificado.

Se debe incluir una estimación tanto de la dilución planificada como de la no planificada en la preparación de las estimaciones de tonelaje y tenor de la Reserva Mineral. En las minas subterráneas en operación puede ocurrir un tipo adicional de dilución. Esta dilución ocurre cuando se realiza la voladura de nuevos paneles en los tajos adyacentes a un tajo antiguo que contiene material de relleno. En estas situaciones, una parte del volumen del retrolleado puede quedar atrapado con el material recién volado. Los tenores del material de relleno suelen estar muy por debajo del tenor de corte y este material contribuye a la dilución total del material recién volado. Además, el relleno puede tener características químicas muy diferentes al material mineralizado y su inclusión en la alimentación de la planta de beneficio puede tener consecuencias adversas al proceso. Esta dilución se denomina dilución secundaria.

► Recomendaciones

- Una adecuada selección del método y diseño geométrico de la explotación, de acuerdo con los condicionantes geológicos de la roca, es imprescindible para reducir la dilución.
- Incluir diagramas para explicar la estimación de la dilución utilizada.
- Contar con suficiente información para la construcción del modelo geológico, en donde los puntos de control estén más cercanos, permitirá disminuir la incertidumbre y aumentar el conocimiento al momento de estimar la dilución.
- Durante el proceso de avance minero, realizar periódicamente la actualización del modelo geológico, permite ajustar la dilución planeada.

- Optimizando los procesos de extracción en cuanto a la voladura, el cargue, el transporte o el procesamiento del mineral, se puede lograr una disminución en la dilución no planificada y, en consecuencia, un mejoramiento en la rentabilidad de la operación minera.

► Pérdidas y Recuperación Minera.

Las pérdidas mineras se refieren al porcentaje de material mineralizado dentro de los diseños mineros que no será extraído por diversas razones. Estos materiales a veces se expresan en términos de recuperación minera; sin embargo, se prefiere el término pérdida(s) minera(s) para reducir la confusión con la recuperación del proceso de beneficio. Algunos ejemplos de pérdidas mineras incluyen: material de voladura que queda en un tajo y que no puede ser recuperado debido a restricciones operativas o de seguridad; material dejado en su lugar por motivos geotécnicos (por ejemplo, pilares y machones); o material volado en una explotación a cielo abierto al que no se puede acceder para su envío a la planta de beneficio. Las pérdidas mineras deben ser cuantificadas y consideradas en la preparación de una declaración de Reservas Minerales.

► Recomendaciones

- Las pérdidas mineras deben cuantificarse y tenerse en cuenta en la elaboración de una declaración de Reservas Minerales.
- El término recuperación minera puede representarse en porcentaje de mineral que será recuperado del total de mineral a explotar dentro del plan de mina.
- Es conveniente que periódicamente se realicen ajustes en los datos de recuperación minera con los reportes continuos que son presentados por las áreas de ingeniería encargadas de actualizar la geología, la topografía, la geomecánica y el planeamiento.

4.1.4. Factor modificador metalúrgico de beneficio

Los factores modificadores metalúrgicos se asocian a los resultados de la caracterización de los minerales a partir de la geometalurgia y que se integran al flujo de las operaciones unitarias necesarias para la obtención de los concen-

trados polimetálicos y los productos finales que son los metales de interés.

Las consideraciones metalúrgicas incluyen el proceso o método metalúrgico, el equipo, la capacidad de la planta, la eficiencia y los requisitos de personal.

El profesional debe discutir la naturaleza, el alcance y la representatividad del trabajo metalúrgico en las pruebas piloto realizadas y los factores de recuperación utilizados, y comentar sobre la idoneidad de la metodología seleccionada, por ejemplo, si es una tecnología bien establecida o nueva.

Debe existir un diagrama de flujo detallado y un balance de masa, a partir de los cuales los productos vendibles tienen un precio de acuerdo con diferentes características químicas y físicas.

El profesional debe indicar qué supuestos o tolerancias se han hecho para los elementos nocivos, los resultados de cualquier trabajo de prueba de muestra a granel o a escala piloto, y el grado en que dichas muestras son representativas del depósito en su conjunto.

Las recuperaciones declaradas deben estar relacionadas con operaciones a gran escala teniendo en cuenta los resultados de las pruebas a escala de piloto, así como el dominio geológico en el que se obtiene el mineral.

El profesional debe considerar cuestiones ambientales, comunitarias, de salud y seguridad en el trabajo asociadas con el proceso metalúrgico, y respecto a las secciones que tratan de materiales u operaciones peligrosas se debe determinar su manejo con un mejor nivel de detalle.

El drenaje de aguas ácidas y otras filtraciones peligrosas en el recurso hídrico, ocasionado por las colas y el almacenamiento de desechos, deben considerarse cuidadosamente, teniendo en cuenta el costo asociado a este proceso.

1. Determinación de los tipos de minerales: para estimar las Reservas de mineral, una buena Ingeniería Metalúrgica requiere una base de datos representativa y precisa de los tipos de mineral y sus propiedades. Esto debe iniciarse en la fase de exploración mediante una estrecha colaboración entre el personal geológico y metalúrgico, y perfeccionarse progresivamente a medida que la evaluación avanza hacia la viabilidad.

Como primer paso crítico, todos los tipos/zonas de mineralización de un Recurso Mineral deben identificarse y probarse por separado para determinar su rendimiento metalúrgico. Esto incluye la variabilidad de los Recursos Minerales y los costos de las opciones de procesamiento que se están considerando, de modo que se seleccionen los métodos de procesamiento óptimos.

2. Pruebas metalúrgicas: solo debe incluirse en las Reservas de mineral la mineralización que haya sido sometida a pruebas metalúrgicas y haya demostrado responder satisfactoriamente en términos económicos al método o métodos de procesamiento seleccionados.

Para todos los trabajos de prueba definitivos en los que se basen las Reservas de mineral, se necesitarán muestras extraídas de testigos. El protocolo para el procesamiento de los testigos de perforación debe discutirse con los geólogos y acordarse lo antes posible para garantizar que habrá suficiente material disponible del tamaño adecuado para todas las pruebas metalúrgicas y complementarias necesarias.

Es aconsejable que los análisis de los principales elementos de interés se comprueben en laboratorios de referencia para garantizar que los del laboratorio de análisis de minerales son confiables.

3. Mineralogía: una porción de cada compuesto debe someterse a un examen mineralógico con objetivos metalúrgicos específicos para identificar todos los minerales presentes, las proporciones estimadas de cada uno, los modos de ocurrencia, el rango de tamaños de partículas, el grado de aglutinación y, a partir de esto, el tamaño de molienda proyectado en el que se espera que se produzca una liberación adecuada. En caso necesario, debe determinarse la presencia de elementos valiosos o penalizadores en los distintos minerales (por ejemplo, Au en la pirita).

4. Selección del método de tratamiento: los datos registrados, los ensayos de testigos y las pruebas metalúrgicas preliminares, deben proporcionar una indicación clara de qué procesos o combinación de procesos deben evaluarse. El objetivo inicial es seleccionar el método de tratamiento y el diagrama de flujo óptimos para cada tipo principal de mineral.

Las pruebas que simulan el proceso seleccionado también deben completarse utilizando agua de la zona donde se

realizará el procesamiento para determinar cualquier efecto adverso que pueda tener sobre el rendimiento metalúrgico o el consumo de reactivos.

Deberán realizarse pruebas adecuadas para establecer criterios de diseño para todos los procesos principales y auxiliares, por ejemplo:

- Características de manejo del mineral.
- Pruebas de conminución, los índices de abrasión y los índices de los molinos de barras y de bolas.
- Pruebas de molienda autógena y semiautógena, molienda fina y molienda ultrafina.
- Pruebas de desarrollo de diagramas de flujo de concentración, por ejemplo, flotación, separación magnética y separación por gravedad.
- Pruebas de desarrollo de diagramas de flujo de lixiviación, por ejemplo, a base de ácido, alcalino o cianuro.
- Pruebas de sedimentación y espesamiento para el diseño de espesadores y la determinación del tipo de floculante y su consumo.
- Pruebas de filtración de productos intermedios o finales.
- Pruebas de viscosidad de la pulpa.
- Pruebas de adsorción de carbono, absorción de oxígeno y detoxificación de cianuro para minerales auríferos.
- Transporte del producto.
- Calidad del producto.

5. Pruebas de confirmación: todas las muestras de los compósitos que representen a los restantes tipos de mineral de menor importancia deberán someterse a pruebas para garantizar que responden satisfactoriamente al método de tratamiento seleccionado y obtener criterios de desempeño para ellas.

6. Ensayos de planta piloto: la utilización de una planta piloto no debería ser necesaria para fines de diseño cuando se dispone de métodos de escalado bien establecidos a partir de pruebas en banco; sin embargo, hay situaciones en las que las pruebas en planta piloto son esenciales:

- Cuando se propone un proceso que no se ha utilizado previamente a escala comercial en el tipo de mineral en cuestión, o se ha utilizado muy poco.

- Cuando es necesario producir una cantidad adecuada de muestras para actividades como la comprobación de un proceso unitario (por ejemplo, espesamiento o filtración de concentrados) o el suministro de muestras en cantidad adecuada a los clientes.
- Si se ha optado por un diseño por encima de la media en lugar de realizar pruebas definitivas, esto debe documentarse y reflejarse en la selección de equipos.
- Se recomienda que el trabajo de pruebas de prefactibilidad tenga como objetivo establecer los niveles de variabilidad en todos los insumos críticos del diseño (por ejemplo, aquellos que apalancan más del cinco por ciento del capital final o del costo operativo) por tipo de mineral principal. Para alcanzar este objetivo, debe realizarse un número adecuado de pruebas, que variará según los casos.

► Recomendaciones

- Si se ha optado por un diseño por encima de la media en lugar de realizar pruebas definitivas, se debe documentar sobre el impacto geológico y mineralógico en el rendimiento metalúrgico y de molienda, y reflejarse en la selección de equipos determinando el tamaño en base a las restricciones del mineral, costos operacionales y restricciones físicas.
- Se recomienda que el trabajo de pruebas de prefactibilidad tenga como objetivo establecer los niveles de variabilidad en todos los insumos críticos del diseño (por ejemplo, aquellos que apalancan más del cinco por ciento del capital final o del costo operativo) por tipo de mineral principal. Para alcanzar este objetivo, debe realizarse un número adecuado de pruebas, que variará según los casos.
- Las recuperaciones metalúrgicas aplicadas deben basarse en trabajos de prueba de proceso que deben establecer la relación entre la ley de alimentación de la planta de proceso y la recuperación del producto de interés y los costos operativos. Cualquier mezcla de residuos en la alimentación del circuito de la planta puede afectar los costes de recuperación u operación y esta posibilidad debe considerarse durante las pruebas metalúrgicas (CIM 2019).
- Se recomienda contar con un pronóstico de los parámetros de producción tales como capacidad de procesamiento de la planta, ley, recuperación y ley del concentrado semestral o anual, con un intervalo de confianza estadístico.
- Sólo debe incluirse en las Reservas de mineral, la mineralización que haya sido sometida a pruebas metalúrgicas y haya demostrado responder satisfactoriamente en términos económicos al método o métodos de procesamiento seleccionados.
- Se recomienda realizar pruebas piloto a escala semi-industrial para confirmar los resultados de las pruebas de laboratorio y obtener información adicional sobre el procesamiento metalúrgico.
- Se recomienda tener un análisis entre los resultados del rendimiento de planta con el planeamiento de la mina para refinar la ley de corte y optimizar la producción mina-planta.
- El agua disponible y la caracterización de los vertimientos hacia las cuencas hidrográficas necesaria para el proceso de beneficio puede ser insuficiente, por lo tanto, no puede pasar desapercibido el análisis de la cantidad operativa requerida y de los permisos ambientales de su uso.

Más información

- **“Procedimiento hidrometalúrgico para la lixiviación en medio oxidante-amoniaco de minerales polimetálicos con contenidos de cobre, zinc, oro y plata; alternativa adaptable a operaciones de la pequeña minería”, Álvaro Ordoñez Nuñez¹, Edmundo Alfaro Delgado².**
- **Ordoñez, A. y Alfaro, E.; (2012); “Alternativa de Lixiviación de Minerales Complejos de Cobre y Minerales Oxidados de Zinc”; 9° Congreso Nacional de Minería; Minería No. 423, Año LIX, diciembre.**

4.1.5. Factor modificador infraestructura

La infraestructura con la cual cuenta el proyecto minero, así como la requerida para su desarrollo, cobra importancia en los costos, en la planeación de construcción y montaje, en el transporte de insumos y la disponibilidad de servicios mineros.

El costo de capital de infraestructura puede variar sustancialmente de un sitio a otro y a menudo es una función de la ubicación más que de la elección del método de extracción o procesamiento (CIM, 2019). Se han identificado varios casos en los que la infraestructura se ha subestimado críticamente, lo cual ha llevado al fracaso de los proyectos dado los requerimientos reales de infraestructura (Rupprecht, 2016).

Los proyectos mineros requieren de una capacidad instalada de acuerdo con la magnitud del plan de mina proyectado, no contar con la infraestructura necesaria para abastecer las necesidades de la producción planeada, acarrearía un impacto en costos y tiempos de ejecución, con repercusión al momento de definir una estimación y categorización de las Reservas Minerales.

► Recomendaciones

- Realizar un análisis detallado en las primeras etapas del proyecto, sobre las áreas previstas para botaderos y presas de relaves, sobre distancias de acarreo y condiciones ambientales y geotécnicas, dado que es un factor determinante para la viabilidad económica y la ejecución del proyecto minero.
- Dependiendo de la magnitud de la mina propuesta, revisar las alternativas de suministro de energía eléctrica, agua y los costos asociados, lo cual debe considerarse al momento de estimar las Reservas Minerales.
- Es necesario considerar la infraestructura de interés público que se encuentre dentro del área de interés (vías, líneas eléctricas, acueductos, plantas de tratamiento, entre otras), que pueden ser limitantes para vincular áreas en la estimación de Reservas Minerales.

4.2. Factor modificador ambiental

Los aspectos medioambientales influyen directamente en las estimaciones de las Reservas de mineral. Pueden influir en la accesibilidad o disponibilidad del yacimiento, en los métodos de extracción y tratamiento que se emplearán y en los costos medioambientales.

Desde la definición del proyecto minero, deben ser identificadas zonas de restricción, exclusión, áreas de manejo especial y planes de ordenamiento ambiental, que pueden impactar el desarrollo del proyecto.

Se puede entender el factor ambiental como un análisis cualitativo, entendiendo el impacto con respecto a la categorización de los Recursos, dependiendo de la certeza respecto a la viabilidad de la ejecución del proyecto minero.

4.2.1. Plan de cierre y abandono

El plan de cierre y abandono definido para un proyecto de depósitos polimetálicos debe direccionarse planteando todas las acciones encaminadas a la reconfiguración y rehabilitación de las áreas intervenidas por las labores mineras y por la infraestructura, y propender por el restablecimiento del potencial uso del suelo y social del área de influencia del proyecto.

La particularidad de estos proyectos, en los cuales se presentan residuos posteriores a la explotación minera, como el material considerado estéril y el material de colas del proceso de beneficio, con presencia aún de minerales o componentes del proceso que pueden causar comporta-

mientos de producción de drenaje ácidos, exigen un tratamiento cuidadoso y en algunos casos complejo, lo cual debe ser consecuente con las acciones de control y mitigación previamente analizadas desde las etapas tempranas para establecer los diferentes tipos de cierre: inicial, progresivo, temporal, final, parcial, y poscierre.

► Consideraciones ambientales

- **Residuos de drenajes ácidos:** el conjunto de efectos asociados a los residuos de drenajes ácidos puede dar lugar a problemas medioambientales de gran envergadura, con posibles implicaciones de costos materiales elevados y repercusiones en las Reservas de mineral.
- **Residuos y subproductos peligrosos:** la gestión de los productos es cada vez más importante debido a los costos asociados a la gestión de los riesgos para el medio ambiente (y la salud humana) derivados de los residuos y subproductos potencialmente peligrosos, por ejemplo, amianto, arsénico y mercurio.
- **Beneficio:** la elección de la tecnología y la escala de la posible planta de procesamiento, pueden verse limitadas por consideraciones medioambientales; por ejemplo, el uso de cianuro en las plantas de Au.
- **Almacenamiento de residuos y estériles:** los residuos minerales reactivos suponen un peligro y deben gestionarse con cuidado. Ejemplos de características adversas son el drenaje ácido (pH bajo), los contami-

nantes solubles a pH neutro, el drenaje alcalino (pH alto), la salinidad y la presencia de elementos tóxicos como el arsénico y el mercurio. Incluso los residuos relativamente inertes pueden tener un impacto ambiental significativo si el almacenamiento/eliminación no se gestiona de forma adecuada. (AUSIMM, 2014)

► **Recomendaciones**

- La gestión de los recursos hídricos a través de los efectos sobre la disponibilidad o la calidad de las aguas subterráneas o superficiales puede tener importantes repercusiones en los costos, es imprescindible desde las primeras etapas adelantar los trámites ante el ente ambiental correspondiente para la “concesión de aguas”.
- El Plan de Cierre minero y de su infraestructura asociada, debe iniciarse desde las etapas tempranas y simultáneamente con las operaciones mineras, resultando ventajoso para el medio ambiente y sus elementos expuestos, pues se garantizan mínimos impactos.
- Al identificar áreas en las que la actividad minera está prohibida, no se pueden declarar Recursos y/o Reservas Minerales.
- Realizar desde las etapas iniciales un análisis responsable de los posibles impactos ambientales y sociales, para establecer las garantías necesarias para restablecimiento en las fases de cierre minero, es vital para disminuir riesgos, sobrecostos o definir que el proyecto es inviable desde unos estudios previos.

4.3. Factor modificador social

El análisis de las actividades de índole social que se desarrollan o se plantean para el área de influencia del proyecto, se debe realizar atendiendo las perspectivas sobre el desarrollo minero local, regional y nacional, teniendo en cuenta que se deben identificar los posibles riesgos que se puedan suscitar con el desarrollo del proyecto minero. En este sentido, se deben proponer y planificar actividades para mitigar y atender esos riesgos sociales ligados a la minería, las cuales hacen parte del plan de gestión social empresarial, y se deben analizar con carácter de factor modificador en concordancia con las características del proyecto, su magnitud y por supuesto considerando siempre los aspectos culturales que definen a las comunidades que hacen presencia o se asientan en el sector estudiado.

El proyecto debe contar con la información sobre la presencia de comunidades indígenas, raizales, palenqueras, afrocolombianas y comunidades Rrom que tenga influencia directa en la zona del proyecto. Así como la aplicación de la legislación vigente para estas comunidades de acuerdo con la directriz estatal y su interferencia. Se pueden requerir acciones específicas como consultas y acuerdos vinculantes.

El establecimiento de relaciones debe comenzar en la fase de exploración. El objetivo es que la comunidad tenga un conocimiento claro de los aspectos involucrados desde el inicio de la exploración y durante todo el proceso de ejecución del proyecto y que se la mantenga informada de todos los planes de desarrollo, operativos y de rehabilitación.

Es posible que se presenten situaciones en las cuales algunas comunidades manifiesten abiertamente su desacuerdo con el desarrollo de proyectos mineros en sus territorios.

En estos casos, con el fin de destrabar el desarrollo de las actividades en campo, se debe analizar y discutir la posibilidad de afectar las Reservas Minerales excluyendo los trabajos mineros en esas zonas donde se presenten estas dificultades.

Teniendo en cuenta que el análisis busca determinar el impacto que tiene el factor social en la estimación de las Reservas, es esencial que se incluyan las inversiones correspondientes a las actividades sociales que se proponen en relación con el proyecto minero.

Cualquier restricción impuesta al diseño de la mina causada por factores sociales, culturales o arqueológicos debe ser identificada. Todas las reuniones o consultas públicas o gubernamentales con las partes interesadas, las audiencias, así como los acuerdos propuestos o reales con las partes interesadas, deben tratarse como parte de los estudios que respaldan la estimación de la Reserva Mineral.

► Recomendaciones

- Tener un relacionamiento continuo con las comunidades del área de influencia del proyecto y mantener informada a la población sobre las modificaciones que presente el proyecto minero.

4.4. Factor modificador legal y gubernamental

La legislación vigente para manejo y control por parte de las diferentes autoridades que intervienen en los procesos mineros, las disposiciones en el ámbito de ordenamiento territorial y los diferentes contratos o compromisos legales del proyecto, constituyen el factor modificador legal, el cual debe acompañar el análisis de conversión de Recursos a Reservas Minerales.

Es importante considerar las contraprestaciones económicas con las cuales está comprometido el proyecto, ya sea con entidades gubernamentales (cánones superficarios, condiciones de pago de regalías, etc.), empleados, sindicatos, comunidades o terceros en general; tener claras las autoridades mineras y ambientales que intervienen en el proyecto, la ley que rige el título minero y los compromisos documentales, la propiedad del terreno, los compromisos con bancos o entidades financieras, *joint ventures*, las obligaciones con propietarios de tierras, servidumbres, acuerdos de formalización, comunidades especiales (indígenas, negritudes, otras), entre otros.

Es importante tener en cuenta la fecha de expiración del título minero, ya que este factor es un determinante de las Reservas Minerales.

► Servidumbre

Para la explotación misma y para un buen manejo de las áreas a intervenir en relación con los tenedores, ocupantes y/o propietarios, se debe iniciar con una identificación jurídico/predial de los inmuebles, con la debida anticipación según la planeación minera. Este proceso empieza con la identificación de predios en relación con los bloques de

explotación, la consulta de información predial (obtenida de oficinas de catastro municipal y/o departamental) y propietarios, poseedores u ocupantes con quienes es posible adelantar acercamientos para obtener información sobre la titularidad de los predios y viabilidad de obtener los acuerdos y/o permisos necesarios para realizar la actividad minera.

► Recomendaciones

El profesional debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La normatividad minera y ambiental vigente que reglamenta el área de explotación.
- El plan de ordenamiento territorial (POT, PBOT o EOT) para determinar el uso del suelo de acuerdo con lo establecido por los entes territoriales.
- La modalidad del título minero, las condiciones, la duración de la concesión y su prórroga, determinan las condiciones legales de aprovechamiento.
- Establecimiento de servidumbre en caso de ser necesario para el acceso a la propiedad y la intervención de las zonas debidamente autorizadas.
- Viabilidad ambiental debidamente ejecutoriada por la autoridad competente en la materia y los permisos correspondientes necesarios para la ejecución de la operación minera.

4.5. Factor modificador de mercado

Con el objeto de definir criterios y elementos para evaluar la factibilidad del proyecto, y dependiendo de la magnitud del mismo, se analizan las tendencias y proyecciones del mercado interno (local, regional) y externo (nacional, internacional) y se estiman la oferta y la demanda, los precios y ventas esperadas, se define la estrategia de comercialización y se hacen los análisis de riesgos comerciales (ANM, 2018). El profesional responsable del estudio de mercado debe centrar sus esfuerzos en definir un precio apropiado de venta del mineral, considerando entre otros factores, los costos operacionales y las inversiones a realizar, con lo cual se podrá determinar la viabilidad económica del proyecto minero.

Entre las metodologías más comunes para la definición del precio del mineral para los análisis financieros, se encuentran los promedios históricos a largo plazo, el promedio móvil de tres (3) años, el precio de consenso, el precio del contrato, el margen sobre costo de producción, el precio actual del mineral y la consulta de reportes de especialistas. El profesional responsable del estudio debe explicar las principales asunciones tenidas en cuenta (CIM, 2015).

► Recomendaciones

- Es importante definir la metodología para la estimación del precio del *commodity* acorde a la etapa del proyecto. No se recomiendan metodologías de corto plazo como precio actual del *commodity* o promedio móvil de tres (3) años, para proyectos que pretendan entrar en explotación a largo plazo; igualmente, no se recomiendan metodologías de largo plazo para proyectos que están o iniciarán explotación en corto plazo.

- El profesional encargado del análisis económico debe comprender el momento del mercado y evitar usar precios actuales si este se encuentra en picos demasiado altos o bajos, ya que con facilidad se podría afectar los Recursos y Reservas Minerales del proyecto.
- El profesional debe determinar si el proyecto puede entrar a competir con el mercado y que la fuente, luego de ser beneficiada, sea comercial y supla los costos de su extracción.
- Se requiere la consideración de la oferta, la demanda y la situación de las existencias para el producto en particular, las tendencias de consumo y los factores que probablemente afecten la oferta y la demanda en el futuro.
- Se debe discutir un análisis del potencial cliente y la competencia, junto con las ventanas de mercado probables para el producto y una descripción del producto que se venderá, las especificaciones del cliente, las pruebas y los requisitos de aceptación incluidos en el análisis.
- El profesional debe discutir si existe un mercado listo para el producto y si existen acuerdos de compra o se espera que se obtengan fácilmente.

4.6. Factor modificador económico

Al considerar los parámetros económicos, el profesional debe proporcionar una descripción del producto a comercializar, si es como concentrado o si el producto final es el metal refinado definiendo las condiciones y su impacto en ese mercado y si existen contratos para la venta o se espera obtenerlos. El profesional debe establecer y justificar todos los criterios económicos que se han utilizado para el estudio, como los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX), la tasa de cambio, los ingresos, las regalías, los impuestos, y la ley de corte (*cut-off*). El profesional debe demostrar que las hipótesis sobre el precio del producto son razonables y justificables, y soportar las suposiciones relativas al costo de producción y al valor del producto. Se debe considerar el transporte, el tratamiento, las sanciones, las tasas de cambio y las condiciones de venta, ya sea en boca de mina, en puerto, o después de que el producto sea refinado, entre otros costos.

Se debe presentar un análisis detallado del flujo de efectivo durante la vida del proyecto, incluido un resumen de impuestos, regalías y otros gravámenes gubernamentales. Se deben realizar análisis de sensibilidad y riesgo relacionados con la calificación, los precios, los costos de capital, los costos operativos y cualquier variable significativa adicional. Deberá indicarse la fecha del informe financiero y la fecha de base del análisis financiero.

Los profesionales también deben asegurarse de que el punto de venta esté claramente definido y que los costos dentro y fuera de la mina se contabilicen con precisión en el punto de venta. La documentación que respalda los precios de los productos básicos y los volúmenes de ventas debe incluir una comparación de los precios de los metales, con

los pronósticos de precios históricos, actuales y proyecciones futuras, así como una consideración de los contratos, las condiciones del mercado, la tasa representativa del mercado y cualquier otra información importante.

► Recomendaciones

- Un requisito fundamental para declarar una Reserva Mineral, tanto si se trata de una explotación minera en curso como de una propiedad minera en fase de estudio, es la demostración de la viabilidad económica (rentabilidad) de la explotación con los parámetros técnicos considerados. Esto se consigue normalmente mediante la preparación de un modelo económico sobre la base del flujo de caja descontado (FCD).
- Dentro de los parámetros relevantes para un adecuado análisis económico de estos proyectos, se encuentra la definición del tenor de corte (*cut-off*), para establecer un límite económico dentro del cual se generan dividendos y conocer un punto de equilibrio base que impactará los costos asociados al desarrollo minero planteado.

4.6.1. Tenor de corte (*cut-off*)

A continuación, se presenta la definición de tenor de corte, así como diferentes definiciones empleadas en la industria: El concepto de tenor de corte es un componente fundamental en la preparación de estimaciones de Reservas Minerales, diseños de minas y cronogramas de producción.

Los tenores de corte aplicados deben estar claramente establecidos, ser inequívocos, fácilmente comprendidos con documentación sobre qué se incluyó en su estimación. Estos tenores de corte deberían estar soportados en resultados de muestreos. Los depósitos complejos pueden requerir procedimientos más exhaustivos para determinar los tenores de corte económicos para definir las Reservas Minerales. Los procedimientos utilizados para definir los tenores de corte deben estar bien documentados, fácilmente disponibles para su revisión y claramente indicados en los informes.

El tenor de corte se define como el tenor o contenido que se utiliza para diferenciar entre mineral y estéril para un conjunto determinado de condiciones, parámetros y período de tiempo. Como tal, los criterios y procesos mediante los cuales se determina el tenor de corte a menudo son diferentes entre propiedades mineras, para diferentes situaciones dentro de una operación minera y en diferentes períodos de tiempo.

En la industria minera hay una gran variedad de definiciones de tenor de corte, así mismo, se emplean diferentes estrategias para estimarlo. Los conceptos y estrategias utilizados para estimar el tenor de corte se han discutido en Lane (1988), Rendu (2008) y Hall (2014). Dado el gran número de situaciones en las que se aplica el tenor de corte, es de suma importancia documentar en la forma más clara posible, cuando se definen, describen y establecen los tenores de corte.

► Definiciones de tenor de corte

La revisión de todas las definiciones de tenor de corte está por fuera del alcance de esta guía, sin embargo, se incluyen algunos de los términos y definiciones de uso común.

Estas definiciones son tomadas de la guía CIM:

Tenor de Corte de Equilibrio (*Break-Even Cut Off Grade*): el tenor más bajo que puede ser extraído y procesado con utilidad operativa, considerando todos los costos aplicables. Puede ser utilizado como una primera estimación en las fases iniciales de planificación de una mina.

Tenor de Corte de Diseño de Mina (*Mine Design Cut-off Grade*): también conocido como el tenor de corte de planificación, se utiliza para preparar los diseños iniciales de mina. Los parámetros de entrada se seleccionan para refle-

jar los valores o parámetros promedio de Vida Útil de Mina. Para minas subterráneas, estos se estiman en función de un tenor de corte de equilibrio. Para minas a cielo abierto, se estiman con base en un tenor de corte de descarte, pero también se puede aplicar un tenor de corte de equilibrio. Para títulos en etapa de desarrollo (títulos para los cuales se están estimando Reservas Minerales como parte de un estudio de prefactibilidad - PFS o de factibilidad - FS), la estimación de los parámetros de entrada se basará en un escenario operativo previsto. Para títulos en producción (minas activas), los parámetros de entrada pueden basarse en los parámetros operativos actuales o pueden considerar los parámetros técnicos y económicos para cualquier proyecto de expansión.

Tenor de Corte de Reporte de Reservas Minerales (*Mineral Reserve Reporting Cut-off Grade*): utilizado para preparar el cronograma de Vida Útil de Mina e informes de las Reservas Minerales. Los parámetros técnicos y económicos pueden ser idénticos a los utilizados para obtener el tenor de corte de diseño de mina o pueden ser más conservadores.

Tenor de Corte de Reservas Minerales Óptimo (*Optimal Mineral Reserve Cut-off Grade*): utilizado para identificar el valor máximo de una declaración inicial de Reservas Minerales y un plan de Vida Útil de Mina. El tenor de corte óptimo de Reservas Minerales refleja la estrategia corporativa, que puede incluir objetivos como:

- Maximización del VPN de un proyecto o logro de un objetivo económico específico,
- Maximización de la vida útil de una mina,
- Control de la producción de metal o valor a lo largo de la vida útil de un proyecto,
- Control de la distribución del flujo de efectivo de un proyecto a lo largo del tiempo,
- Maximización del metal contenido o valor en la categoría de Reservas Minerales.

Tenor de corte de descarte a cielo abierto (*Open Pit Discard Cut-off Grade*): el tenor o valor más bajo de material en una mina a cielo abierto en el que todos los costos, excluidos los costos de explotación, son iguales a los ingresos. El tenor de corte de descarte a cielo abierto asume que el material debe ser minado, ya que se encuentra dentro del contorno del pit o delimitación del pit diseñado.

Tenor de Corte Operativo/Marginal (*Operational/Marginal Cut-off Grade*): utilizado a corto plazo, tanto en minas a cielo abierto como subterráneas, para considerar las condiciones técnicas y económicas en el momento de la excavación. Los tenores de corte operativos pueden variar de los utilizados para preparar los planes de Vida Útil de Mina o las declaraciones de Reservas Minerales.

Los fundamentos de estos tenores de corte pueden considerar los precios actuales de los metales, los costos no recuperables, los costos variables, el destino de los materiales y la capacidad de los equipos. Estos tenores de corte se aplican únicamente al material que debe ser excavado debido al flujo normal de trabajo de la operación minera.

Tenor de Corte de pilas de almacenamiento en Cielo Abierto (*Open Pit Stockpile Cut-off Grade*): el tenor más bajo en una mina a cielo abierto por debajo del cual el material está destinado a ser almacenado en un acopio temporal para un posible tratamiento en una fecha posterior o mediante un proceso alternativo. El tenor de corte de acopios en un proyecto a cielo abierto asume que el material debe ser extraído ya sea dentro de un diseño de pit durante la Vida Útil de la Mina o en la etapa operativa. La base para establecer este tenor de corte puede incluir criterios económicos u objetivos estratégicos y debería incluir costos estimados de manipularlos nuevamente.

Tenor de Corte Incremental Subterráneo (*Underground Incremental Cut-Off Grade*): el tenor más bajo de material en una mina subterránea en el que todos los costos, excluidos los costos de extracción, son iguales a los ingresos. El tenor de corte incremental subterráneo asume que el material forma parte del diseño de Vida Útil de Mina, debe ser excavado y transportado a la superficie. El destino final de este material puede ser tanto la planta de procesamiento como un acopio. El tenor de corte incremental subterráneo puede aplicarse tanto en la etapa de planificación como en la etapa operativa.

4.6.2. Insumos para estimar el tenor de corte (*cut-off*)

Los datos de entrada para estimar el tenor de corte dependerán del método de minería y los métodos de procesamiento y beneficio seleccionados. En la Tabla 7 se presenta un resumen de los costos operativos empleados en la estimación del tenor de corte. Normalmente, estos costos se expresan en función de una tonelada de material procesado, sin embargo, se pueden utilizar otras bases de costo.

Es importante tener en cuenta que estos costos operativos representan elementos comúnmente encontrados en minas a cielo abierto y subterráneas y se presentan solo como guías. Dependiendo de las condiciones específicas de los proyectos a evaluar es posible incluir datos adicionales.

Es importante tener en cuenta que estos costos son descripciones generales de las actividades encontradas normalmente en operaciones mineras. No están destinados a ser una lista exhaustiva, ya que una lista detallada de todas las actividades específicas para todas las situaciones mineras está más allá del alcance de esta guía.

El precio de los metales, las tasas de cambio (donde corresponda), las recuperaciones metalúrgicas y la relación entre la recuperación y los tenores de cabeza son parámetros de entrada críticos para la determinación de los tenores de corte. El CIM ha publicado una guía específica acerca de la selección de precios de metales para su uso en la preparación de estimaciones de Reservas Minerales (CIM 2015).

4.6.3. Metales equivalentes y retorno neto de la fundición (NSR)

En muchos tipos de depósitos polimetálicos, el valor del

material mineralizado resulta de la extracción y venta de más de un metal (por ejemplo, Cu y Au). Muchos metales como el Cu se concentran después de la extracción y el concentrado resultante suele venderse a una fundición adecuada. La mayoría de estos concentrados se componen de varios sulfuros, los cuales contienen los metales de valor.

Los metales que suelen venderse como concentrados, a menudo con varios metales en un solo concentrado, son Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Au y Ag. A modo de ejemplo, un concentrado de Cu podría incluir calcopirita (CuFeS_2), que contiene un 34,6 % de Cu, posiblemente otro sulfuro como piritita (FeS_2) y otros minerales de desecho (o ganga). La ley global del concentrado podría oscilar entre el 22 % y el 30 % de Cu. Dos (2) métodos se aplican ampliamente en la industria minera para abordar la naturaleza polimetálica de dichos depósitos. Estos incluyen el uso de un metal equivalente o el cálculo del Retorno Neto de Fundición (NSR).

► Metales Equivalentes

En algunos casos en los que hay múltiples elementos en el yacimiento que contribuyen al valor del mismo, a veces se utiliza un cálculo equivalente a una materia prima como tenor o valor de corte. En este enfoque, todos los tenores de los distintos productos básicos se convierten en un tenor metálico equivalente teniendo en cuenta los precios de los metales y las recuperaciones. El cálculo del tenor o valor de corte equivalente se basa en una fórmula desarrollada por los Profesionales. Esta fórmula, así como los parámetros utilizados para su desarrollo, deben indicarse claramente. Los tenores equivalentes de metal se utilizan entonces como tenores de corte para estimar las Reservas Minerales (CIM 2019).

Al leer el comunicado de prensa de una empresa en el que se anuncian los Recursos y/o Reservas Minerales de un yacimiento polimetálico, es habitual ver que se indican en metales equivalentes del metal primario.

Esto implica multiplicar el metal o metales secundarios por sus precios actuales y, a continuación, dividir el resultado

por el precio actual del metal primario del yacimiento para obtener el valor del metal mineral.

Por ejemplo, si la empresa XYZ anuncia un Recurso Mineral que contiene 1 millón de onzas de Au a un precio actual de 1.500 dólares la onza y 10 millones de onzas de Ag a un precio actual de 30 dólares la onza, el cálculo para convertir el metal secundario (Ag) en metal primario (Au) es el siguiente:

$10.000.000 \text{ (onzas de Ag)} * 30 \text{ US\$ (precio de la Ag por onza)} / 1.500 \text{ US\$ (precio del Au por onza)} = 200.000 \text{ onzas equivalentes de Au}$

Así, en el ejemplo anterior, los Recursos Minerales de la empresa XYZ contienen un total de 1.200.000 onzas equivalentes de Au.

En el caso de yacimientos polimetálicos, si el profesional está considerando el uso de Metales Equivalentes (una única ley equivalente de un metal principal), en la comunicación de Resultados de Exploración, Recursos Minerales o Reservas de Mineral se deben detallar todos los factores materiales que contribuyen al valor neto derivado de cada constituyente, la fórmula de cálculo utilizada debe documentarse y, como mínimo, la fórmula debe incluir:

- Tenores individuales para todos los metales que tengan un potencial razonable de ser recuperados y vendidos.
- Precios asumidos de las materias primas para todos los metales.
- Recuperaciones metalúrgicas asumidas para todos los metales (basadas en pruebas metalúrgicas, mineralogía detallada, yacimientos similares, etc.).

► Retorno Neto de Fundición (NSR)

Es diferente el valor bruto del metal en un concentrado (% Cu en concentrado x tonelada de Concentrado) y el porcentaje neto de ese metal que el vendedor recibirá realmente de la fundición que compre el concentrado.

El Retorno Neto de la Fundición (NSR) se refiere a los ingresos esperados de la alimentación de la planta, teniendo en cuenta las recuperaciones de la planta, los costos de transporte del concentrado a la fundición, los costos de

tratamiento y refinado y otras deducciones en la fundición. Este es una medida del valor del mineral.

Para el método NSR, se calcula el valor en dólares que cada metal aporta al valor total y se expresa como un valor denominado valor NSR. El cálculo de un valor NSR tiene en cuenta los ingresos, las recuperaciones metalúrgicas, las deducciones del fundidor, los gastos de tratamiento, las penalizaciones y los costes de transporte de todos los metales de interés económico potencial. Este valor NSR puede entonces utilizarse para derivar un valor de corte, donde el valor de corte NSR es entonces el valor en dólares de una determinada muestra o bloque que iguala los costos totales de explotación, según proceda.

Es importante tener en cuenta que los cálculos del NSR variarán sustancialmente dependiendo de los datos de entrada como son: tipo de *commodities*, métodos de tratamiento y refinación, términos de penalización, términos de contrato, condiciones de transporte, entre otros.

Los principales factores necesarios para los cálculos del NSR son:

Factor de recuperación del metal en la planta: para saber qué proporción del metal enviado a la planta en el concentrado se vende realmente.

Grado del concentrado: para saber cuánto metal contiene una tonelada de concentrado.

Costo del transporte: desde la salida de la mina hasta la fundición. Se cargan los costos asociados a la carga y representación en las instalaciones portuarias.

Metales pagables: para establecer la cantidad base de metal que la fundición utilizará para determinar el pago.

Algunas deducciones son fijas, mientras que otras se basan en una escala móvil en función de la ley del metal en el concentrado.

Costos de tratamiento (TC): para determinar el coste de tratamiento de una tonelada de concentrado en la fundición.

Penalizaciones: coste adicional del tratamiento de los elementos nocivos presentes en el concentrado.

Participación en el precio: coste proporcional de la escalada para tener en cuenta las grandes variaciones del precio del metal durante el período contractual.

Costos de refinado (RC): para determinar el costo de refinado del metal recuperado en la fundición.

- Fuentes de información de los factores de NSR según la etapa del proyecto
- En la fase de exploración (Conceptual), la mayor parte de la información puede estimarse a partir de los precios al contado publicados en los comunicados de prensa.
- En el estudio de Prefactibilidad, la disponibilidad de las fundiciones puede convertirse en un problema, por lo que es necesario entablar conversaciones con algunas de ellas. Las condiciones detalladas de los contratos no se determinan necesariamente a través de estas conversaciones, pero pueden hacerse mejores estimaciones.
- Los contratos deben discutirse con fundiciones específicas en el nivel de Factibilidad (Ver Tabla 8).

Tabla 8. Resumen de los costos de explotación habituales en el cálculo de tenor de corte (cut-off)

Retorno Neto de la Fundición	Conceptual	Prefactibilidad	Factibilidad
Costos de Tratamiento	Precios al contado (spot)	Discusiones con fundiciones	Contrato negociado
Costos de refinación	Precios al contado (spot)	Discusiones con fundiciones	Contrato negociado
Penalidades y otras deducciones	Estimado de la experiencia	Discusiones con fundiciones	Contrato negociado
Costos de transporte	Precios al contado (spot)	Discusiones con transportador	Contrato negociado

Fuente: CIM, 2015

► Utilización de los NSR para polimetálicos

Los factores NSR (“Net Smelter Return” o Retorno Neto de Fundición) son un valor económico por unidad de ley metálica, por ejemplo, dólares por gramo de Au o dólares por porcentaje de Ni. Estos factores son esenciales en la evaluación de yacimientos, ya que permiten una estimación rápida y precisa del valor económico de los minerales en diferentes escenarios.

En primer lugar, los factores NSR se utilizan para estimar el valor de cada bloque en los modelos de Recursos y Reservas Minerales, multiplicando las leyes metálicas por los factores correspondientes. Esto facilita una clasificación eficiente de los bloques, según las prioridades y necesidades de la operación minera, agilizando la toma de decisiones durante la planificación y explotación de un yacimiento (Hustrulid, Kuchta, & Martin, 2013). Asimismo, estos factores permiten calcular el valor de un sector específico dentro de un estudio económico, proporcionando datos clave para la toma de decisiones estratégicas, como la inversión o la expansión de la operación minera (Simpson & Barnhart, 2022).

Además, los factores NSR son fundamentales para calcular los ingresos proyectados en los planes mineros. La multiplicación de las leyes por los factores permite prever con mayor precisión los beneficios esperados de la extracción de mineral, lo cual es crucial para la planificación financiera y la optimización de los recursos (Taylor, 2020). En este mismo sentido, al evaluar la mineralización fragmentada dentro de la mina, estos factores permiten decidir si dicha mi-

neralización debe enviarse a la planta para su procesamiento o si debe descartarse, maximizando así la eficiencia y rentabilidad del proyecto (Smith & Jones, 2017).

Otro uso clave de los factores NSR es en los estudios de sensibilidad al precio de los metales. Permiten analizar cómo las fluctuaciones en los precios de los metales afectan la viabilidad económica de un proyecto minero, brindando información esencial para ajustar estrategias y evaluar riesgos de forma rápida y eficaz (Doe, 2019). De esta manera, los factores NSR no solo facilitan decisiones operativas en el día a día, sino que también son herramientas fundamentales para enfrentar las dinámicas y cambios del mercado de metales (Koren & Sourya, 2021).

4.6.4. Análisis de sensibilidad

Según proceda, la evaluación económica incluirá un análisis de sensibilidad o de otro tipo, utilizando variantes en el precio de la materia prima, tenor, los costos de capital y de explotación u otros parámetros significativos, según se desee, e incluirá un análisis del impacto de los resultados. Al realizar un análisis de sensibilidad, es importante examinar el impacto de las variaciones tanto positivas como negativas de un parámetro determinado, ya que el examen de una variación positiva por sí sola o de una variación negativa por sí sola, puede dar lugar a conclusiones erróneas.

5. Estimación de Reservas Minerales

Las consideraciones para la estimación de Reservas en los depósitos Polimetálicos mantienen los lineamientos definidos en los estándares acogidos por CRIRSCO, donde se tiene la definición de Reserva Mineral de la siguiente manera:

“Una Reserva Mineral es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído, y está definido apropiadamente por estudios de Pre-Factibilidad o Factibilidad, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores. Tales estudios demuestran que, en el momento del reporte, la extracción podría estar justificada razonablemente” (ECRR® 2025)

En la estimación de Reservas Minerales, los estudios han sido definidos como mínimo a nivel de prefactibilidad, con un plan de explotación propuesto.

Los Recursos Indicados pueden pasar a ser Reservas Probables, esto quiere decir que la certidumbre no es total y que aún deben evaluarse algunos parámetros para llevar dichos Recursos a la categoría de Medidos para que eventualmente puedan pasar a Reservas Probadas o Probables. Los Recursos Medidos pueden pasar a Reservas Probables o Probadas, dependiendo de la confianza en la estimación y en los parámetros evaluados.

La estimación de las Reservas Minerales representa la recopilación del trabajo realizado por numerosas disciplinas profesionales, el profesional líder de la estimación debe comprender la importancia del trabajo de cada disciplina para evaluar la viabilidad económica (CIM, 2019).

Más información

- **AusIMM. (2014).** *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation - The AUSIMM Guide to Good Practice.*

5.1. Proceso de estimación

El proceso de estimación de Reservas debe partir desde el modelo geológico, el cual representa la cantidad y calidad in situ del depósito. Con el análisis previo de los Factores Modificadores se pueden obtener parámetros cuantitativos para ser aplicados en la construcción de modelos que reflejen el efecto que tendrá el proceso minero sobre la calidad (tenor o ley) y la cantidad de los metales de interés económico presentes en el depósito polimetálico.

Es importante recordar que, por definición de los estándares CRIRSCO, al momento de declarar Recursos Minerales de los depósitos polimetálicos, las cantidades en cada una de sus categorías (Medidos, Indicados e Inferidos) obtenidos del modelo geológico estructural, deben reportarse junto con los resultados generados del modelo de calidad en su forma “In Situ”.

Para la declaración de Reservas Minerales, las cantidades en cada una de sus categorías (Probadas y/o Probables) obtenidas del modelo estructural, deben reportarse junto con los resultados obtenidos del modelo de calidad.

Para la estimación de Reservas Minerales debe definirse el tenor o ley de los metales de interés económico del depósito polimetálico que después de aplicar los Factores Modificadores, conlleven a una recuperación que sea viable técnica y económicamente, además que se cumpla con la expectativa del mercado.

De acuerdo con el ECRR® (2025): *“El punto de referencia en el cual las Reservas son definidas, usualmente el punto donde el mineral es entregado a la planta de procesamiento, debe ser especificado. Es importante que en todas las situaciones donde el punto de referencia es diferente, como para un producto comercializable, una explicación en la declaración debe incluirse para asegurarse que el lector está completamente informado de lo que está siendo reportado”.*

► Recomendaciones

- Es posible que se presenten en el depósito, dominios geológicos diferentes en su caracterización geológica y geometalúrgica; en este sentido, se recomienda al momento de realizar la estimación analizar los dominios de estimación de forma separada.

1, Optimización

En el proceso de optimización se busca la delimitación definitiva del área de interés en la cual se va a realizar la explotación del mineral. Normalmente se divide el depósito mineral en unidades pequeñas, tales como: bloques bidimensionales o tridimensionales, los cuales contienen la información geológica, cantidad y calidad del mineral en base ROM e información económica, resumida en precio de venta y costo de venta por unidad seleccionada. De forma resumida, cada una de estas unidades o bloques tiene un valor, positivo o negativo, dependiendo de la cantidad de mineral que tenga y sus costos asociados. Mediante algoritmos manuales o automáticos se incluyen o descartan bloques hasta encontrar bajo algún criterio de convergencia, la sumatoria total de bloques que genere el mayor valor económico.

La estimación debe realizar una optimización a partir de los parámetros geotécnicos, mineros y económicos, para lograr obtener el diseño óptimo minero que representa la mejor condición de extraer económicamente el Recurso existente

y esos volúmenes, corresponden a las Reservas Minerales. En el caso de los proyectos subterráneos, puede ser más dispendioso la parametrización de estas variables, sin embargo, también se pueden establecer de forma manual, de esta manera se puede establecer los límites económicos del depósito bajo las condiciones evaluadas.

La finalidad de este análisis es obtener el mejor diseño minero para extraer un tonelaje diluido de mineral (mena) en unas condiciones técnicas y económicas favorables que corresponden a la máxima cantidad de Reserva a extraer, con el tenor o calidad requerida.

Un adecuado análisis de optimización del diseño minero puede derivar en el establecimiento de la profundidad máxima de intervención o avance minero con condiciones económicas favorables.

► Recomendaciones

- Describir la metodología empleada para realizar la optimización, incluyendo principales consideraciones y software empleado (si aplica).
- Describir en este proceso si se tiene algún tipo de restricción que impida que una unidad o bloque pueda ser extraída, en general estas restricciones pueden ser físicas, ambientales, de infraestructura o de calidad del mineral. Se debe dar suficiente información sobre las restricciones tenidas en cuenta, así como la forma en que fueron consideradas.

2. Tenor de corte en la estimación de las Reservas Minerales

Las hipótesis sobre el precio de los metales, los tipos de cambio (si procede), las recuperaciones metalúrgicas y la relación entre la recuperación y el tenor de cabeza son parámetros de entrada fundamentales para determinar el tenor de corte. Es posible introducir datos adicionales en función de las circunstancias específicas de las operaciones consideradas.

Los valores de corte de calidad (el límite económico o el límite de pago), dominios de estimación, punto en que se declaran las Reservas, deben estar claramente establecidos, sin ambigüedades y fácilmente entendibles. Los procedimientos utilizados para establecer los tenores de corte

deben estar bien documentados, fácilmente disponibles para su revisión y claramente establecidos en las declaraciones de divulgación (Modificado CIM, 2019).

Un alto tenor de corte produce menos Reservas y viceversa. Esto, dado que las Reservas Minerales son la fuente de ingresos, cuantos mayores sean las Reservas, mayores serán los ingresos. Caso contrario, un bajo tenor de corte puede dar como resultado el procesamiento de material que no genera ganancias al comienzo de la vida de la mina. Esto, por tanto, reduce el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto. Como resultado, la optimización de la ley de corte durante la vida útil de la mina es un factor clave para maximizar el VPN.

3. Rendimiento neto de la fundición y equivalentes metálicos

Para el proceso de la estimación de las Reservas Minerales, cobra importancia, usar un método de valor NSR, en el cual se encuentren inmersos los ingresos, las recuperaciones metalúrgicas, las deducciones del fundidor, los gastos de tratamiento, las penalizaciones y los costos de transporte de todos los metales de interés económico potencial; en el caso que se utilice el método de metal equivalente se deben considerar los precios de los metales y las recuperaciones. En los dos casos se usan parámetros de impacto que pueden ser usados a través de un software, en donde se busca caracterizar cada bloque definido en el modelo y de esta manera obtener un resultado que en algunos casos, puede establecer dominios de estimación, lo cual resulta una buena herramienta para la toma de decisiones, sobre las alternativas más favorables para el desarrollo minero, en cumplimiento de los condicionantes técnicos, económicos y del proceso de beneficio, para lograr una óptima recuperación minera y metalúrgica.

4. Modelo ROM (Run of Mine)

Una de las metodologías utilizadas habitualmente para estimación de Reservas Minerales recibe el nombre de modelo ROM de estructura y calidad (Run of Mine), que considera el efecto de la operación minera, específicamente en los factores geológico-mineros relacionadas con pérdidas de mineral y la dilución. Al realizar la aplicación de un Modelo ROM, se obtienen los tonelajes y calidad de mineral en bocamina o en frente de explotación, los cuales pueden normalmente diferir del modelo in situ, incremen-

tándose o disminuyendo volúmenes y asimismo afectando la calidad (tenor o ley) inicial determinada.

Si bien el proceso de construcción de los modelos ROM es habitualmente implementado por grandes compañías a partir de un volumen considerable de información, proyectos de mediana y pequeña envergadura que cuenten con información de exploración de superficie y del subsuelo, pueden llegar a construir los modelos ROM complementando la información con supuestos geológico-mineros justificados.

El Modelo ROM en el caso de los depósitos polimetálicos, se construye a partir de un modelo de calidad (tenor), que permite identificar la afectación del tonelaje y la calidad estimada de los Recursos in situ, que puede presentar variación debido a factores predominantes como dilución y pérdidas.

En el caso de usar un metal equivalente, en esencia también se pretende establecer una ley de corte equivalente teniendo en cuenta los precios de los metales y las recuperaciones; lo que también se convierte en buena práctica. El criterio de aplicación de cada método puede tener variación en la estimación, lo importante es que se cuente con información confiable. Generalmente, los tonelajes y calidades obtenidos después de la aplicación del Modelo ROM son los mismos definidos para la estimación de las Reservas Minerales.

► Recomendaciones

- Documentar la metodología para estimar las Reservas Minerales para garantizar que no se ignore ningún factor significativo.
- Es posible que, de acuerdo al interés de algunos inversionistas, se requiera aplicar otros parámetros después del Modelo ROM.
- Es recomendable indicar el punto donde se declaran las Reservas Minerales de manera clara.

5.2. Categorización

El ECRR® (2025) proporciona dos (2) categorías para la definición de Reserva Mineral: Reserva Mineral Probada y Reserva Mineral Probable; el profesional líder debe garantizar que se cumplan los criterios mínimos antes de asignar estas categorías y debe ser consciente de todos los insumos utilizados para establecer la Reserva Mineral que afectan la confianza en las categorías.

La metodología para establecer la clasificación debe estar bien documentada y ser fácilmente comprensible. La mejor práctica incluye proporcionar una descripción narrativa de las razones cualitativas que subyacen a la selección de la clasificación.

Siempre que sea posible, deben utilizarse pruebas empíricas, por ejemplo, datos de producción, para calibrar y justificar la clasificación.

La conversión de los Recursos Minerales en las categorías de Reserva Mineral Probada o Reserva Mineral Probable puede completarse una vez que se hayan preparado las estimaciones del material diluido y recuperado de la mina. En todos los casos, deben cumplirse los requisitos del ECRR® (2025) al asignar las categorías de confianza de las Reservas Minerales. La clasificación de las Reservas Minerales puede ser un proceso iterativo para las minas subterráneas, donde pueden ser necesarias varias iteraciones antes de lograr una clasificación final. Sólo las partes de los Recursos Minerales clasificadas en las categorías de Recursos Minerales Medidos o Indicados pueden convertirse en Reservas Minerales.

Los Recursos Minerales Inferidos nunca deben clasificarse como Reservas Minerales. Si los Recursos Minerales Inferidos se utilizan en el desarrollo de planes mineros y programas de producción, deben tratarse como materiales de desecho. La clasificación de los Recursos Minerales Inferidos puede revisarse y actualizarse a medida que se disponga de nueva información. El material no clasificado nunca debe convertirse en Reservas Minerales.

► Recomendaciones

- No deben categorizarse Reservas Minerales sobre Recursos Inferidos.
- La metodología para establecer la categorización debe estar bien documentada y entenderse fácilmente.
- La buena práctica incluye proporcionar una descripción narrativa de las razones cualitativas detrás de la selección de la categoría. Cuando sea práctico, se debe usar evidencia empírica, por ejemplo, datos de producción, para calibrar y justificar la categorización (CIM, 2019).
- Se recomienda a los profesionales encargados de la estimación de Reservas Minerales, trabajar conjuntamente con los geólogos en la definición y ajuste de los parámetros de clasificación de los Recursos Minerales, a los métodos de minería potenciales, por ejemplo, haciendo coincidir los límites de las categorías de los Recursos Minerales con niveles de minería, bordes de tajo o límites de explotación.

5.3. Validación

Es responsabilidad del profesional garantizar la verificación de todos los datos introducidos en la estimación de las Reservas Minerales. Dado que la estimación de las Reservas Minerales se basa en muchos datos, incluido el modelo de Recursos Minerales, es importante que los datos y su coherencia se validen como parte del proceso de estimación. Una metodología definida para lograr esto se considera la mejor práctica y se recomienda el uso de un protocolo como la lista de comprobación.

La identificación de los aspectos críticos de la estimación de las Reservas Minerales es una parte importante de la verificación de los datos.

5.4. Evaluación de riesgos del proyecto

Si bien la clasificación de la Reserva Mineral permite al profesional líder identificar el riesgo técnico en términos generales, la mejor práctica incluye el establecimiento de una metodología para identificar y clasificar los riesgos asociados con cada entrada de la estimación de la Reserva Mineral. Esto ayudará a establecer la categorización de la Reserva Mineral, proporcionando así una comprensión del riesgo técnico asociado con la estimación de la Reserva. Esta metodología, clasificación y análisis deben estar bien documentados (CIM, 2019).

5.5. Revisiones hechas por pares

Una buena práctica incluye una revisión interna por pares de la estimación de la Reserva Mineral, que tenga en cuenta insumos, metodología, supuestos subyacentes, los resultados de la estimación en sí misma y una prueba de viabilidad económica (CIM, 2019).

5.6. Documentación

A menudo se llevan a cabo varias iteraciones de evaluaciones durante un largo período de tiempo antes de completar un Estudio de Viabilidad Preliminar. Las mejores prácticas incluyen la documentación adecuada de los datos/metodología/riesgos/supuestos utilizados en estas valoraciones, de modo que estén disponibles para futuras estimaciones de reservas minerales.

La información debe ser fácilmente recuperable, estar disponible y catalogada de forma que permita una fácil evaluación del historial de las evaluaciones realizadas y registre la ubicación de toda la información, informes, etc., pertinentes. Es importante garantizar que la información utilizada en una evaluación y los conocimientos adquiridos sobre un yacimiento mineral estén disponibles para futuros trabajos. Hay que tener cuidado con el almacenamiento y considerar la continua evolución de los formatos de los archivos informáticos y el impacto que esto puede tener en el trabajo anterior. Se recomienda la conversión de archivos de trabajos históricos a formatos que permitan un acceso continuado.

5.7. Declaraciones de Reservas Minerales

Las declaraciones de Reservas Minerales deben ser inequívocas y suficientemente detalladas. En el caso de las estimaciones de Reservas Minerales a cielo abierto, la relación entre estéril y mineral (la relación de descapote) debe indicarse sin ambigüedades. Debe existir un vínculo obvio entre la estimación de las Reservas Minerales y la estimación de los Recursos Minerales. Las mejores prácticas incluyen la documentación de los factores, por ejemplo, dilución, pérdidas de extracción y recuperación de la planta, que se utilizaron en la preparación de la estimación de las Reservas Minerales.

Las Reservas Minerales se desarrollan a partir de la fracción del yacimiento categorizada como medidas e indicadas de los recursos minerales que cumplen todos los criterios técnicos y económicos necesarios para demostrar que el material puede extraerse, procesarse y venderse con beneficios. Las reservas minerales incluyen factores modificadores y la demostración de la viabilidad técnica y económica mediante la realización de un estudio de prefactibilidad o un estudio de factibilidad positivo o, en el caso de las minas en explotación, la preparación de un modelo de flujo de caja para la vida útil de la mina. El modelo de flujo de caja de la vida útil de la mina debe utilizar únicamente material de las categorías de reservas minerales probadas o probables.

Es importante comprender que la declaración de una Reserva Mineral se basa en un conjunto determinado de parámetros técnicos, legales, ambientales, sociales y económicos que han demostrado su viabilidad técnica y económica en un momento determinado. En muchos casos, los parámetros pueden cambiar con el tiempo, de forma que la prueba de viabilidad puede dejar de dar un resultado positivo en

una fecha posterior. Una declaración de Reservas Minerales para una fecha determinada puede dejar de ser válida posteriormente. Para las minas en fase de desarrollo, se recomienda revisar periódicamente las declaraciones de Reservas Minerales y ajustarlas según sea necesario para reflejar los parámetros del momento. En el caso de las minas en producción, debe realizarse una revisión de las Reservas Minerales al menos una vez al año para verificar que, como mínimo, el flujo de caja descontado es positivo. El flujo de caja ignora todos los costos irre recuperables y tiene en cuenta los costos proyectados de la explotación, los costos de cierre, así como los futuros costos de capital.

► Recomendaciones

- Las estimaciones de Reservas Minerales no son cálculos precisos, el reporte de tonelaje y calidad deben reflejar la incertidumbre relativa de la estimación, redondeando a cifras significativas apropiadas. Para enfatizar la naturaleza imprecisa de una Reserva Mineral, el resultado final siempre debe ser referido como una estimación y no como un cálculo.
- Apoyar el reporte de Reservas con gráficas, mapas y perfiles que den claridad al lector respecto de la ubicación de las cantidades reportadas.
- La notificación de las cifras de tonelaje y ley debe reflejar el orden de exactitud o precisión de la estimación redondeando a un número apropiado de cifras significativas.
- En la estimación de las Reservas se debe establecer la metodología utilizada para la determinación de los volúmenes, los cuales deben estar justificados y acompañados de su debido soporte.

Más información

- **Categorización de recursos y reservas mineras.** Ortiz J., Emery X.
- **Mineral resource estimation (1st ed.).** Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. Dordrecht, Germany, 2014.
- **CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines, 2019.**

5.8. Discusión de la confianza relativa

El profesional debe explicar la confianza que se tiene en la información y datos reportados en la estimación de los Recursos y las Reservas Minerales, informando de las fortalezas, falencias o restricciones en la información suministrada lo que explica los criterios para realizar la categorización de las Reservas y cómo estas pueden verse afectadas por los diferentes factores modificadores.

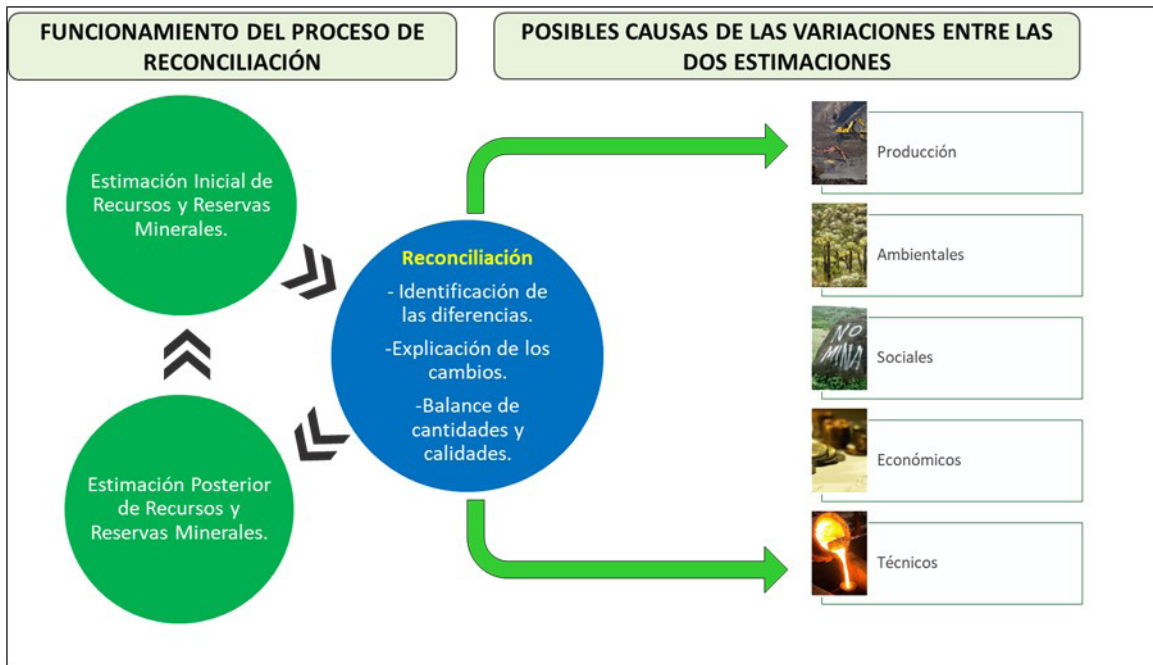
5.9. Reconciliación

La estimación de Recursos y Reservas Minerales requiere del análisis de las consideraciones empleadas para convertir Recursos en Reservas, o los factores modificadores necesarios para determinar la viabilidad del proyecto minero; dichos factores pueden obedecer a condiciones de la compañía, pero frecuentemente estos se encuentran fuera del control del proyecto. Es así, como cambios en los precios del mercado global, nuevas regulaciones en materia ambiental, desarrollo de proyectos de infraestructura nacional, entre muchas otras situaciones, pueden contribuir a los cambios en la estimación de Recursos y Reservas Minerales en un período determinado.

Por las razones anteriores y muchas más, es claro que las estimaciones de Recursos y Reservas Minerales son dinámicas en el tiempo, por lo tanto, es necesario contar con actualizaciones periódicas que permitan cuantificar y cualificar los cambios en las estimaciones e identificar las causas de dichos cambios.

La reconciliación permite tener una trazabilidad de las causas de los cambios entre diferentes períodos, que pueden estar asociados a cambios normativos en materia ambiental o minera, obtención de permisos o licencias (ambientales, servidumbres, entre otras), y el agotamiento de los Recursos y Reservas debido a la explotación minera (ver Figura 38)

Figura 38. Proceso de reconciliación



Fuente: :: Autores

Más información

- **Instructivo para presentar la actualización o reconciliación anual de recursos y reservas minerales. Agencia Nacional de Minería., V2 Bogotá 2023.)**

► Recomendaciones

- Para proyectos en ejecución, registrar información periódicamente relacionada con los avances mineros, para compararla con las cantidades estimadas en los modelos para el mismo período, de manera que se evalúe la precisión de las estimaciones y se derive en la optimización de procesos de explotación y/o beneficio.

- Llevar planillas, formatos o bitácoras para el control y la cuantificación de los volúmenes de producción y registro de la recuperación.
- En planes de corto plazo, contar con la reconciliación periódica permite ajustar las proyecciones de los trabajos mineros.
- La reconciliación periódica de la estimación inicial permitirá reducir la incertidumbre geológica y consecuentemente permitirá ser asertivos en el planeamiento proyectado para la toma de decisiones en el corto y mediano plazo, sobre las zonas que pueden generar la mejor rentabilidad en condiciones geológicas favorables, y a la vez permite decidir para las zonas de condiciones adversas, en qué momento es indicado intervenirlas y en caso extremo si la mejor decisión es no incluir zonas en la categoría de reservas minerales.
- Reconciliar la estimación de recuperación minera con los reportes continuos que son presentados por las áreas de geología, topografía, geomecánica y planeamiento.

6. Presentación de Informes

La normatividad minera en Colombia establece lineamientos específicos para la presentación de informes técnicos y económicos a las autoridades regulatorias, como la Agencia Nacional de Minería (ANM) y el Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). Uno de los principios fundamentales es asegurar la precisión y veracidad de los datos relacionados con los recursos y reservas minerales de los proyectos mineros en el país. Estos informes deben cumplir con estándares internacionales como los definidos por el Comité Internacional para el Reporte de Reservas Mineras (CRIRSCO), que establece directrices para la clasificación, evaluación y presentación de información mineral.

Los informes presentados bajo estas normas deben ser refrendados por profesionales calificados que certifiquen la calidad y confiabilidad de la información. En el contexto colombiano, esto implica que los profesionales responsables cuenten con la experiencia y certificaciones necesarias, en línea con el estándar definido por CRIRSCO, aunque con adaptaciones a la legislación local. Esto asegura que los datos de recursos y reservas sean auditables y verificables, y permite una mayor transparencia y confianza en el sector minero. Según CRIRSCO (2019), los reportes de recursos y reservas deben incluir información detallada sobre el método de estimación, la calidad de los datos, y los factores económicos y ambientales que afectan el valor del proyecto, en los que debe tener al menos:

- Cartografía base y temática de área concesionada.
- Descripción de las actividades de exploración anteriores y sus resultados.
- Marco geológico y mineralización.
- Tipos de depósitos.
- Actividades de la exploración minera
- Cartografía geológica del yacimiento.
- Resultados de la perforación.
- Preparación de las muestras, análisis, seguridad y aseguramiento y control de calidad.
- Verificación de los datos.
- Metodología para la estimación y categorización de recursos minerales.
- Estimación y categorización de recursos minerales.
- Factor Modificador estudio de mercados.
- Factor Modificador ambiental.
- Factor Modificador legal.
- Factor Modificador infraestructura.
- Factor Modificador minero
 - » Delimitación del área
 - » Métodos de explotación
 - » Seguridad en las labores mineras
 - » Dilución
 - » Pérdidas o recuperación minera
 - » Mano de obra y Equipos (rendimientos)
 - » Operaciones unitarias
 - » Manejo de estériles

- » Vías o infraestructura de transporte
- » Instalaciones mineras.
- Factores Modificadores geotécnicos, hidrogeológicos e hidrológicos.
- Factor Modificador de beneficio y transformación.
- Factor Modificador social.
- Factor Modificador escala de producción y vida útil.
- Factor Modificador análisis económico.
- Análisis de riesgos.
- Metodología para la estimación y categorización de Reservas Minerales.
- Estimación y Categorización de Reservas Minerales.
- Discusión de la confianza relativa.
- Validación.
- Secuenciamiento Minero.
- Plan de cierre y abandono.
- Referencias bibliográficas (APA).

Toda la información geográfica presentada en documentos técnicos en Colombia debe incluir el sistema de coordenadas y el datum vigentes al momento de su elaboración, conforme a la normativa nacional. Actualmente, el sistema de proyección cartográfica oficial para Colombia es el “Transverse Mercator”, con el origen denominado “Origen Nacional”, referido al Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, conocido como MAGNA-SIRGAS. Además, se deben seguir las especificaciones técnicas establecidas en la Resolución No. 471 de 2020, que establece las especificaciones mínimas para los productos de cartografía básica oficial de Colombia. Esta normativa garantiza la precisión y consistencia en la representación espacial de los datos geográficos, asegurando su correcta integración en proyectos y documentos técnicos en el ámbito nacional. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2020).

Adicionalmente, es fundamental que esta información se integre adecuadamente con los procesos de almacenamiento de datos cartográficos de las entidades públicas en Colombia, especialmente con la Agencia Nacional de Minería, que actúa como evaluador y ente fiscalizador o supervisor de los procesos de exploración y extracción de depósitos polimetálicos. Este enfoque permite la supervi-

sión adecuada y el cumplimiento de las normativas en las actividades mineras.

Se debe incorporar información en secciones transversales, longitudinales y vistas en planta, ya sean estas en formato digital o físico, que representen la geología básica y los datos de exploración, tanto superficie como del subsuelo y su correlación con la geología superficial y con pozos de perforación cercanos.

► **Recomendaciones: informes técnicos**

- Asegurarse de que todos los informes técnicos cumplan con la normatividad vigente establecida por la autoridad minera en Colombia. Esto incluye seguir los lineamientos de CRIRSCO para garantizar la estandarización y la calidad de los datos presentados.
- Incluir el sistema de coordenadas vigente en toda la información geográfica. Esto facilitará la comprensión y la verificación de los datos espaciales, asegurando que estén alineados con las referencias geográficas nacionales.
- Proporcionar información detallada sobre los métodos utilizados en la recolección y análisis de datos. Esto incluye la descripción de técnicas de muestreo, procedimientos de control de calidad y cualquier limitación en los datos.
- Fomentar la revisión por parte de expertos en la materia antes de presentar informes a las autoridades. Este proceso ayudará a identificar posibles errores o inconsistencias en los datos, mejorando la credibilidad del informe.
- Realizar actualizaciones periódicas de la información presentada en los informes, especialmente si hay cambios en las normativas o en los datos geológicos. Mantener la información actualizada garantiza que las decisiones basadas en estos informes sean fundamentadas y pertinentes.

Más información

Programa de Trabajos y Obras - PTO

- Parámetros contenidos en el artículo 84 de la Ley 685 de 2001.
- Resolución 299 del 13 de junio de 2018 de la Agencia Nacional de Minería, que modificó la Resolución 143 del 29 de marzo de 2017, en el sentido de incluir en los anexos de los Términos de Referencia los estándares internacionales acogidos por CRIRSCO.

Programa de Trabajos e Inversiones - PTI

- Art. 39 del Decreto 2655 del 23 de diciembre de 1988. Contenido del PTI.
- F3 - Formulario para la Presentación de Informe Final de Exploración y Programa de Trabajos e Inversiones (PTI) Pequeña Minería.
- F4 - Formulario para la presentación de informe final de exploración y Programa de Trabajos e Inversiones (PTI) Mediana y Gran Minería.

Programa de Trabajos y Obras Complementario - PTOC

- Resolución 414 del 27 de junio de 2014 de la Agencia Nacional de Minería: *“Por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración de los Programas de Trabajos y Obras Complementarios (PTOC) de los Subcontratos de Formalización Minera”*.
- Decreto 1949 del 28 de noviembre de 2017. *“Por el cual se modifica y adiciona el Decreto Único Reglamentario No. 1073 de 2015 en cuanto se reglamentan los mecanismos para el trabajo bajo el amparo de un título en la pequeña minería y se toman otras determinaciones”*

Informe de Labores Mineras Ejecutadas y Programadas - ILME

- Resolución 604 del 13 de septiembre de 2019 de la Agencia Nacional de Minería: *“Por medio de la cual se adoptan los Términos de Referencia para la elaboración del Informe Anual de Labores Mineras Realizadas y Programa de Labores Mineras a Ejecutar, para Beneficiarios mineros de Reconocimientos de Propiedad Privada-RPP y se toman otras determinaciones”*.

Páginas web

- www.igac.gov.co
- www.sgc.gov.co
- www.minminas.gov.co

7. Bibliografía

- **Abzalov, M. (2008).** Quality control of assay data: A review of procedures for measuring and monitoring precision and accuracy. *Exploration and Mining Geology*, 17(3–4), 131–144.
- **Abzalov, M. (2011).** Sampling errors and control of assay data quality in exploration and mining geology. In *Applications and Experiences of Quality Control* (pp. 611–644). IntechOpen.
- **Ahn, H. J., & Kim, Y. K. (2020).** Role of mineralogy in gold exploration: Insights from various gold deposits. *Minerals*, 10(7), 634.
- **Allaby, M. (2013).** *A Dictionary of Earth Sciences* (4th ed.). Oxford University Press. Oxford, United Kingdom.
- **Ahn, H. J., & Kim, Y. K. (2020).** Role of mineralogy in gold exploration: Insights from various gold deposits. *Minerals*, 10(7), 634. <https://doi.org/10.3390/min10070634>
- **Alfaro, E. (2018).** I (Primer) Taller Especializado de En Colombia Geometalurgia, Medellín, octubre de 2018. SGS.
- **Alfaro, E. (2019).** II (Segundo) Taller Especializado de En Colombia Geometalurgia, Medellín, octubre de 2019. SGS.
- **Alford, D., & Stewart, R. (2013).** Geological mapping techniques for mineral exploration. *Exploration and Mining Geology*, 22(1), 39–52.
- **Atlas Copco. (2007).** *Mining methods: Underground mining* (2nd ed.). Atlas Copco.
- **AusIMM. (2014).** Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AUSIMM Guide to Good Practice.
- **Baba, A., Watanabe, K., & Yamasaki, S. (2013).** Analysis of density in geology: Applications and techniques. *Journal of Geochemical Exploration*, 130, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.05.009>
- **Babcock, J. J., & Granger, J. (2016).** Hydrogeology of the Gold Fields: A new perspective on mineral exploration in arid environments. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 651–662. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1434-0>
- **Bard, J. A., & Harris, R. A. (2009).** Geochemical assessment of mineral resources in ancient volcanic terrains. *Geoscience Frontiers*, 1(2), 107–114.
- **Barton, N., & Choubey, V. (1977).** The shear strength of rockfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 14(1), 1–20.
- **Bell, F. G. (2017).** *Engineering Geology* (2nd ed.). Taylor & Francis. London, Reino Unido.
- **Bennett, J. W., & Riddle, L. J. (2018).** Exploring new frontiers in mineral exploration: Integrating remote sensing and geochemistry. *Geophysical Journal International*, 215(1), 303–316. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy222>
- **Breen, J. A., & Scott, G. (2019).** Quantitative mineral assessment for efficient resource exploration. *Geological Society of America Bulletin*, 131(1–2), 57–68. <https://doi.org/10.1130/B31853.1>

- **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. (2018).** CIM Mineral Exploration Best Practice Guidelines. Montreal: CIM. 16 p.
- **Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. (2019).** CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. 74 p.
- **Canchaya, S. (2008).** El modelo geometalúrgico. XVII Congreso Peruano de Geología y XIII Congreso Latinoamericano de Geología, 29 de septiembre a 3 de octubre de 2008, 6 p.
- **CCRR. (2018).** Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas. Bogotá D.C.: Comisión Colombiana de Recursos y Reservas.
- **Cediel, F. (2019).** Phanerozoic orogens of Northwestern South America: Cordilleran-type orogens. Taphrogenic tectonics. The Maracaibo orogenic float. The Chocó-Panamá indenter. In *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 3–95). Springer.
- **Chen, M. H., & Liu, Q. (2020).** Exploration of metallic mineral resources: Advances and challenges. *Resources Policy*, 68, 101745. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101745>
- **CIM. (2019).** Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves Best Practices Guidelines.
- **Coward, S., Vann, J., Dunham, S., & Stewart, M. (2009).** The primary-response framework for geometalurgical variables. In *Seventh International Mining Geology Conference* (pp. 109–113).
- **Cowan, E. J., et al. (2014).** Implicit geological modelling using Voronoi tessellations. *Computers & Geosciences*, 69, 14–23.
- **Chen, M. H., & Liu, Q. (2020).** Exploration of metallic mineral resources: Advances and challenges. *Resources Policy*, 68, 101745. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101745>
- **Colón, F. A., & Martino, C. D. (2019).** The impact of advanced analytical techniques on mineral exploration. *Journal of Mineral Resources and Engineering*, 6(3), 15–23. <https://doi.org/10.21425/ijmre.v6i3.623>
- **Correa, E. (2021).** Environmental geochemistry in mineral exploration: Guidelines for best practices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 1–17.
- **Crissman, H. (2004).** Fire assay of precious metals. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Littleton, CO, pp. 1–30.
- **Crook, K. A. W., & Mavrommatis, A. (2020).** The role of structural geology in mineral exploration. *Geological Society of America Special Papers*, 546, 45–56.
- **Davis, J. C., & Meade, B. J. (2017).** *Geological Data Analysis: Methods and Applications*. Cambridge University Press.
- **Davis, M. A. (2018).** *Geological Mapping: A Practical Guide*. Springer International Publishing. Cham, Suiza, pp. 200–225. ISBN: 978-3-319-93667-0.
- **Deere, D. U. (1963).** Technical description of cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1(1), 16–22.
- **Dentith, M., & Mudge, S. (2014).** *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Springer, Dordrecht, Países Bajos, pp. 300–350. ISBN: 978-94-017-9824-3.
- **Deutsch, C. V., Leuangthong, O., & Ortiz, J. M. (2007).** *Geostatistical Modeling and Simulation for Mineral Resource Estimation*. Springer Science & Business Media.

- **Doe, J. (2019)** *Principles of Mining Economics, 2nd Edition*, Elsevier,
- **Edwards, R., & Atkinson, K. (1986)**. *Ore Deposit Geology and Its Influence on Mineral Exploration*. Chapman and Hall.
- **Einaudi, M. (1997)**. Mapping altered and mineralized rocks: An introduction to the “Anaconda Method.” In *Anaconda Geological Mapping Techniques: Guidelines and Field Practices* (pp. 1–12). Tucson, AZ: Anaconda Mining Company.
- **Evans, A. M. (1997)**. *An Introduction to Economic Geology and Its Environmental Impact*. Blackwell Science. Oxford, UK, pp. 92–115. ISBN: 978-0-632-03656-9.
- **Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013)**. Plantilla de buenas prácticas. Recuperado de https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/goodpractices/docs/Plantilla_buenas_practicas-SP-Dic2013.docx
- **Fetter, C. W. (2001)**. *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall.
- **Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979)**. *Groundwater*. Prentice Hall.
- **Forero, M. C., & Henao, A. (2015)**. Geochemical methods for mineral exploration in tropical environments. *Journal of Geochemical Exploration*, 154, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.012>
- **Gadallah, M., & Fisher, R. (2009)**. *Exploration geophysics*. Springer, 262 p.
- **Geboy, N., & Engle, M. (2011)**. Quality assurance and quality control of geochemical data: A primer for the research scientist. USGS Open-File Report 2011–1187, 28 p.
- **GERENS escuela de postgrados agosto 2, (2023)** Comisión Calificadora de recursos y reservas Chile.
- **Gill, R. (1997)**. *Modern Analytical Geochemistry: An Introduction to Quantitative Chemical Analysis for Earth, Environmental and Materials Scientists*. Addison Wesley Longman. Essex, pp. 300.
- **Goodman, R. E. (1989)**. *Introduction to Rock Mechanics (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.
- **Gradim, J. A. C., et al. (2014)**. Implicit geological modelling of mineral deposits. *Ore Geology Reviews*, 65, 175–190.
- **Haddow, R. J., & Cowan, E. J. (2014)**. 3D geological modelling using implicit methods. *Geological Society of London, Special Publications*, 408(1), 17–34.
- **Haldar, S. K. (2018)**. *Mineral Exploration: Principles and Applications (2nd ed.)*. Elsevier.
- **Hoek, E. (2007)**. *Practical rock engineering*. www.rocscience.com.
- **Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (1997)**. *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Pergamon.
- **Huston, D. L., Mernagh, T. P., Hagemann, S. G., Doublier, M. P., Fiorentini, M., Champion, D. C., Lynton Jaques, A., Czarnota, K., Cayley, R., Skirrow, R., & Bastrakov, E. (2016)**. Tectono-metallogenic systems — The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples. *Ore Geology Reviews*, 76, 168–210. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.005>
- **Hustrulid, W. A., Kuchta, M., & Martin, R. (2013)** *Open Pit Mine Planning and Design, 3rd Edition*, CRC Press.

- **Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020).** *Resolución No. 471 de 2020.*
- **Jenkins, R. (1999).** X-ray Fluorescence Spectrometry. John Wiley & Sons. New York, NY, pp. 250.
- **Kauffman, R. A. (2017).** Effective communication in mineral resource evaluation: A case study approach. *Resource Policy*, 50, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.11.004>
- **Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002).** *An Introduction to Geophysical Exploration (3rd ed.)*. Wiley-Blackwell.
- **Klockenkämper, R. (2014).** Total-Reflection X-Ray Fluorescence Analysis and Related Methods. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ, pp. 400.
- **Koren, M., & Sourya, V. (2021)** “Mining Economics: Net Smelter Return Calculation.” *Mining Journal*,
- **Lamberg, P. (2011).** Particles – the bridge between geology and metallurgy: Proc. Conference in mineral engineering, Luleå, Sweden, pp. 1–16.
- **Licker, M. (2003).** *Dictionary of Earth Sciences (2nd ed.)*. McGraw-Hill. United States, pp. 468.
- **Lowrie, W. (2007).** *Fundamentals of Geophysics (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- **López-Isaza, J., Luengas Burgos, C. S., Velásquez Cárdenas, L. E., Celada Arango, C. M., Sepúlveda Ospina, M. J., Prieto Gómez, D. A., Gómez Casallas, M., Leal-Mejía, H., & Hart, C. J. R. (2018).** *Mapa Metalogénico de Colombia: Servicio Geológico Colombiano*
- **Lugo, R., & Bernal, L. (2019).** Plata. In *Recursos Minerales de Colombia (Vol. 2)*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- **Marjoribanks, R. (2010).** *Geological Methods in Mineral Exploration (2nd ed.)*. Springer.
- **Marshall, B. H., & Deery, M. J. (2018).** Advances in the interpretation of mineral exploration data. *International Journal of Mineral Exploration and Geoscience*, 3(1), 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.miner.2018.01.002>
- **Mendoza, A. (2007).** *Curso de Fundamentos de la Geometalurgia y Aplicaciones Mineras*. InterMet, Consultores Metalúrgicos.
- **Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AUSIMM Guide to Good Practice, 2014, SAMREC CODE 2016 - The Application of Modifying Factors**, Steven Michael Rupprecht, University of Johannesburg, 2016.
- **Moncada, F., & Robles, L. (2020).** Advances in geochemical exploration methods: New tools for effective resource management. *Resources Policy*, 68, 101745. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101745>
- **Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1992).** A physically based model for the evolution of topography. *Geophysical Research Letters*, 19(20), 1939–1942. <https://doi.org/10.1029/92GL01903>
- **Moon, C. J., Whateley, M. K. G., & Evans, A. M. (2006).** *Introduction to Mineral Exploration (2nd ed.)*. Blackwell Publishing.
- **Orlandea, E., & Vlad, S. (2020).** A novel conceptual model of intrusion-related gold-bearing systems and exploration tools. *Studia UBB Geologia*, 63(1), 1–12.

- **Palmström, A. (2005).** Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362–377.
- **Percey, S. (2014).** A review of quality assurance and quality control procedures for litho-geochemical data. *Geoscience Canada*, 41(1), 74–88.
- **Peters, D., & Elliott, M. (2019).** 3D geological modeling for mineral exploration: A review of methods and applications. *Earth-Science Reviews*, 199, 102952
- **Potts, P. J. (2008).** *An Introduction to Mineralogy and Petrology*. Wiley-Blackwell.
- **Postolski y Parker (2014).** Assessing Uncertainty with Drill Hole Spacing Studies – Applications to Mineral Resources. Verly, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- **Rojas, P. (2016).** Mineral exploration: Sampling and analytical approaches. *Resources Policy*, 47, 213–225.
- **Rupprecht, S.M. (2016).** SAMREC CODE 2016 - The Application of Modifying Factors. University of Johannesburg, Republic of South Africa.
- **Sagar, D., Cheng, Q., McKinley, J. & Agterberg, F. (2013).** *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*. Springer. 1705 p.
- **Sans, H. & Trotet, F. (2010).** A comprehensive QA-QC methodology designed to enhance the quality of the geological database. *Drilling and Blasting Bulletin*, December, pp. 42 – 54.
- **Scoble, M. J. & Moss, A. (1994)** Dilution in underground bulk mining: Implications for production management. Geological Society, London, Special Publications, 79(1), 95-108
- **Selley, R., Cocks R. & Plimer, I. (2005).** *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Ltd. Oxford United Kingdom. 807 p.
- **Simón, A. (2011).** A discussion on current Quality-Control practices in mineral exploration. En: *Applications and Experiences of Quality Control*. IntechOpen, pp. 595 – 610
- **Smith, N., & Jones, R. (2017.)** *The Economics of Mining Operations: Cost Control and Optimization*, Springer.
- **Schmid, M., & Dabbous, A. (2013).** Hydrothermal ore deposits. Geological Society, London, Special Publications, 377(1), 121–144.
- **Simpson, J., & Barnhart, S.** “Financial Modeling in Mineral Exploration Projects.” *Journal of Mineral Economics*, 2022.
- **Stanley, C. & Smee, B. (2007).** Strategies for reducing sampling error in exploration and resource definition drilling programmes for gold deposits. *Geochemistry Exploration, Environment, Analysis*, v. 7, pp. 329 – 340.
- **Starnes, M. (2017).** The geological assessment of mineral resources. *Geology Today*, 33(4), 56–60.
- **Stephenson, R. J., & Stoker, T. J. (1999).** The classification of mineral resources: A contextual approach. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 108(1), 21-30.
- **Stewart, R., & Thorsen, J. (2021).** Modern techniques in mineral exploration: The role of GIS and remote sensing. *Journal of Mining Science*, 57(1), 1–16.
- **Taylor, S.** “Price Sensitivity in the Mining Sector.” *Engineering and Mining Journal*, 2020.

- **Tephenon, R. J., Osadetz, K. G., & Leuangthong, O. (2006).** Mineral resource classification: A critical review of current practice and implications for the future. Natural Resources Canada, Geological Survey of Canada, Open File 5343
- **Tuckwell, S. (2008).** Field Guide to the Geology of Southern Alberta. University of Alberta Press.
- **Young, R. A. (2015).** Quantitative X-ray Diffraction Analysis. In X-ray Diffraction: A Practical Approach. Springer.
- **Vann, J., Jackson, S., & Bertoli, O. (2003).** Kriging for estimating the in situ rare-earth element grades of lateritic nickel ores. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science, 112(1), 33-43.
- **Verly, G., Postolski, J., & Parker, H. (2014).** Kriging in the mining industry: A review of best practices. CRC Press.
- **Whateley, M. K. G., & Evans, A. M. (2012).** The Exploration and Mining of Mineral Resources. Blackwell Publishing.
- **Williams, J. M., & Arendt, C. (2022).** Data integration in mineral exploration: Challenges and opportunities. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 22(2), 109–120.



Agencia
Nacional de Minería

