

# GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS DE LA ESMERALDA COLOMBIANA

Cómo desarrollar un proceso de buenas prácticas orientadas a la exploración y estimación de recursos y reservas sobre un depósito esmeraldífero en Colombia.





Idolfo  
**Romero  
Rodríguez**

*Asesor en asuntos regulatorios  
y sectoriales en APRECOL y  
FEDESMERALDAS*

La presente Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana es la antesala a la profesionalización y estandarización de la exploración, la estimación y reporte de recursos y reservas de la piedra preciosa insignia de Colombia. Este documento se convierte en una herramienta imprescindible para afrontar el desafío más retador de este sector: La Incertidumbre.

Se ha cultivado el paradigma de considerar la exploración de esmeraldas como un negocio incierto o de azar por la aleatoriedad de este tipo de recurso, aunque es cierto, creemos que la presente guía propone metodologías, por primera vez, para mitigar y gerenciar el riesgo minero de la producción de esmeraldas.

Esta incertidumbre se arraiga ante la ausencia de la información geológica y comercial de los proyectos mineros e impacta negativamente la cadena de valor ante la carencia de trazabilidad y consiguiente transparencia, creando un ambiente donde se construyen modelos de negocio impredecibles, aquí es fundamental el aporte que esta Guía hace a la industria al entregarle a los productores, inversionistas y demás interesados una metodología detallada, didáctica, implementable y necesaria que aumenta la aspiración del inversionista en aumentar la certeza del proyecto minero mediante una exploración y gerencia asertiva del recurso mineral.

Estamos en un punto de quiebre y es imprescindible mejorar nuestra competitividad y representatividad en el mercado tomando como base que la esmeralda de Colombia dada su calidad y propiedades únicas es uno de los productos mejor posicionados en el mundo. Sin embargo, la esmeralda colombiana que otrora tuviera el 63% de la cuota de participación en el mercado internacional ha sido rezagada actualmente a un 20%, ocasionado por un declive en la producción ante la falta de estrategia técnica en la extracción y en el desconocimiento geológico.

Los resultados nos han demostrado que la industria es buena identificando áreas de interés, pero no viabilizando económicamente proyectos, y es aquí cuando cobra especial importancia esta Guía, cuyo impacto se medirá con el aumento de nuevos depósitos y eventualmente con el incremento y la obtención de nuevas producciones.

Esta herramienta es un punto de encuentro entre el conocimiento científico y el financiero, unidos para viabilizar un proyecto minero a través de la correcta valoración y la proyección futura, abriendo oportunidades en la actividad bursátil como un atractivo más para sus fondos, también en un incentivo para la inversión extranjera en el país, así como posibilitando el acceso al financiamiento de las bolsas de valores, y de los bancos.

Por último, quisiera destacar el papel histórico que desempeña esta Guía al ser la primera dedicada específicamente a la esmeralda dentro del marco del CRIRSCO (*Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards*), convirtiéndose en un instrumento dinamizador del sector minero de la esmeralda colombiana, y esto ocurre gracias a la iniciativa de la Agencia Nacional de Minería, Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, Federación Nacional de Esmeraldas FEDESMERALDAS-, Asociación de Productores de Esmeraldas de Colombia -APRECOL- y al profesionalismo de sus autores: Germán Eduardo Bonilla Osorio, Angélica Castaño López, Marco Antonio Nieto Patarroyo, y Sergio Daniel Parra Bastidas.

No siendo más, la invitación es a poner en práctica esta metodología.



**Idolfo Romero Rodríguez**

*Abogado consultor de la industria minera y del subsector de piedras preciosas. Especialista en derecho financiero, derecho de los contratos de la Universidad del Rosario y candidato a magister en Fintech e Innovación Digital de Universidad Politécnica de Cataluña*



Wilfredo  
**López  
Piedrahita**  
*Presidente CCRR*

## **PRESENTACIÓN DE GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS EN LA ESMERALDA COLOMBIANA POR PARTE DE LA COMISIÓN COLOMBIANA DE RECURSOS Y RESERVAS**

Para la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR) es un motivo de gran satisfacción poder presentar al sector minero del país, y en especial al sector esmeraldífero de la región Cundiboyacense, la primera versión de la Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana (GBPEC).

Se entiende por Guía de Buenas Prácticas (GBP) a un conjunto de acciones alineadas que han tenido éxito en su aplicación en proyectos de diferente connotación. Se espera entonces, que en situaciones similares generen resultados al mismo nivel. Una de las limitaciones de la aplicación de este concepto es que las Guías de Buenas Prácticas dependen del momento, son dinámicas y por ende se deben actualizar regularmente. En ese sentido fue concebida la GBPEC. Mientras el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR) nos indica “qué” debemos hacer para desarrollar Buenas Prácticas, la GBPEC nos dice “cómo” desarrollar los procesos para adelantar Buenas Prácticas en estudios geológico-mineros, tipo PTO, reportes públicos, estudios de factibilidad, etc.

Dicho esto, la Comisión Colombiana (CCRR) pretende desarrollar una serie de GBP para diferentes tipos de minerales importantes para Colombia, con el fin de estandarizar los estudios alrededor de estos minerales. Esto traerá grandes beneficios a las autoridades mineras del País, a la industria, la academia, los profesionales del sector minero y a las comunidades. La gran ventaja es que podremos estimar, clasificar recursos y reservas minerales siguiendo una metodología detallada, y definiendo con mayor claridad y precisión, qué cantidad de recursos y reservas tiene Colombia y cuáles son las regalías que el País recibiría por la explotación de sus recursos minerales. Este propósito nos permite generar confianza y atraer capitales a invertir en el sector minero. Las Buenas Prácticas deben ser un propósito nacional.

En este sentido y con gran orgullo, hemos podido articular el desarrollo de la primera Guía de Buenas Prácticas de un mineral específico en Colombia, en este caso, de la Esmeralda Colombiana, liderado por talento nacional. Para la preparación de esta GBP contamos con el apoyo económico de FEDESMERALDAS, en cabeza del Dr. Óscar Baquero Reyes y el Dr. Idolfo Romero Rodríguez, así como el gran apoyo de la Agencia Nacional de Minería, en cabeza de la expresidenta, la Dra. Silvana Habib y del equipo de Recursos y Reservas, a cargo de la Ing. Alba Mery Bustamante.

El proyecto lo desarrolló un equipo multidisciplinario de profesionales colombianos liderado por el Geólogo M. Sc., con estudios avanzados de Doctorado en Geología, Germán Eduardo Bonilla Osorio; y los profesionales Marco Antonio Nieto Patarroyo, Sergio Daniel Parra Bastidas y Angélica Castaño López.

De igual manera la CCRR desea destacar el apoyo importante del Centro de Desarrollo de la Esmeralda Colombiana (CDTEC), la Asociación de Productores de Esmeralda Colombiana (APRECOL) y las empresas: Minería Texas Colombia, Esmeraldas Santa Rosa y Andino Commodities con su proyecto La Roca.

Esta GBPEC es un gran aporte al sector minero del país, conteniendo los conceptos más actualizados en la minería del mundo.



**Ing. Wilfredo López Piedrahíta, M.Sc.**  
**Presidente CCRR**  
**USA, SME Registered Member: 1944130**  
**Colombia, CCRR Miembro Registrado: MR03190001**



Juan Miguel  
**Durán Prieto**  
*Presidente ANM*

Como autoridad minera hemos trazado estrategias de impacto para el sector minero con el fin de que se traduzcan en una reactivación efectiva de la economía nacional y de las regiones. Para cumplir con nuestro propósito de ser aliados del desarrollo sostenible del país, a través de la generación de valor, con una gestión moderna, transparente y eficiente de los recursos minerales de los colombianos, se han definido líneas estratégicas de mediano plazo, que buscan estandarizar la información presentada en los proyectos mineros, en cada una de sus etapas.

Con la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas - CCRR estamos aunando esfuerzos desde un Convenio Marco de Cooperación, para generar herramientas técnicas que permitan las buenas prácticas en toda la cadena de valor de la industria minera en el país, bajo los principios de transparencia, materialidad, competencia e imparcialidad que plantea el Estándar Colombiano y todos los de CRIRSCO en general.

La información confiable es clave para el éxito de los negocios mineros y el acompañamiento de la autoridad en este proceso es determinante para lograr un sector fortalecido. Esperamos que esta Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana haga parte de la gestión estratégica para la exploración y estimación de recursos y reservas de cada uno de los proyectos mineros, dando continuidad desde “el qué hacer” a partir de un estándar y “el cómo hacer” que lo constituye este documento guía, estructurado con los lineamientos, definiciones y clasificaciones del Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales, edición 2018 (ECRR).

Este documento es producto del esfuerzo del sector de la Esmeralda, realizado por profesionales de la CCRR con gran experiencia en el sector y con el apoyo de la Agencia Nacional de Minería, por medio del cual se ofrecen recomendaciones con secuencia lógica, que le permita a los mineros en cada etapa de su proyecto recopilar, analizar y tomar las mejores decisiones con el fin de contribuir al aumento de la rentabilidad de su negocio minero y a su vez a la economía del país.

Cordialmente,



**JUAN MIGUEL DURÁN PRIETO**  
Presidente Agencia Nacional de Minería

## **AUTORES**

Esta guía fue desarrollada por la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, y fue llevada a cabo por los siguientes profesionales:

Germán Eduardo Bonilla Osorio, Geólogo, MSc, Persona Competente – Líder.

Angélica Castaño López, Geóloga, Especialista en Geomática.

Marco Antonio Nieto Patarroyo, Geólogo, MSc, Persona Competente.

Sergio Daniel Parra Bastidas, Geólogo.

Bogotá D.C., Colombia, 29 de septiembre de 2020.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores de la Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, reconocen la cooperación y el apoyo de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, a su presidente el Ingeniero de Minas Wilfredo Lopez, M.Sc., el equipo de Recursos y Reservas de la Agencia Nacional de Minería, el Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (CDTEC), al Ingeniero de Minas Jairo Botero, a la Asociación de Productores de Esmeralda Colombiana (APRECOL), a los profesionales técnicos de las empresas Minería Texas Colombia, Esmeraldas Santa Rosa y Andino Commodities con su proyecto La Roca, al Doctor Idolfo Romero y al Profesor Ariel Cadena de la Universidad Nacional; mediante su valiosa contribución en aportes y recomendaciones significativos para el desarrollo de La Guía.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE TABLAS .....	14
INTRODUCCIÓN.....	16
CONTEXTO DE LA ESMERALDA EN COLOMBIA.....	20
Geología de las esmeraldas en Colombia.....	20
Estadísticas de producción.....	22
GUÍA DE USO .....	24
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	25
PARTE 1: INFORMACIÓN GENERAL.....	30
1.1. Objetivo de la Guía de Buenas Prácticas.....	30
1.2. Descripción del proyecto .....	31
1.3. Antecedentes históricos .....	33
1.4. Localización.....	34
1.5. Propiedades adyacentes .....	36
1.6. Geología .....	38
1.7. Aspectos legales y tenencia de propiedad minera .....	41
1.8. Verificación de la información .....	43
PARTE 2: TÉCNICAS DE MUESTREO.....	46
2.1. Localización de la información.....	46
2.2. Tipos de muestreo .....	50
2.3. Técnicas de perforación.....	55
2.4. Recuperación de muestras .....	61
2.5. Cadena de custodia.....	63
2.6. Preparación y tratamiento de las submuestras o incrementos .....	68
2.7. Mapeo de sondaje, <i>loggeo</i> geológico .....	70
2.8. Métodos analíticos.....	73
2.9. Calidad de los datos y pruebas de laboratorio.....	80
2.10. Verificación de resultados.....	83
2.11. Densidad de la información .....	84
2.12. Archivos de respaldo.....	87
2.13. Auditorías de muestreo .....	88
PARTE 3: REPORTES DE RESULTADOS DE EXPLORACIÓN .....	94

3.1. Trabajos de exploración previos .....	94
3.2. Métodos de agregación o actualización de la información .....	95
3.3. Relaciones entre el ancho de la mineralización y el largo de los interceptos.....	96
3.4. Información Gráfica .....	99
3.5. Balance del reporte.....	102
3.6. Información adicional de exploración.....	103
3.7. Trabajos adicionales.....	105
3.8. Geofísica .....	107
<b>PARTE 4: ESTIMACIÓN Y REPORTE DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES .....</b>	<b>112</b>
4.1. Seguridad de la información .....	112
4.2. Interpretación geológica .....	116
4.3. Técnicas de estimación y modelamiento .....	118
4.4. Metales equivalentes u otras representaciones combinadas de múltiples componentes...	125
4.5. Tenor de corte .....	129
4.6. Densidad .....	132
4.7. Factores modificadores.....	135
4.8. Factores mineros .....	139
4.9. Técnicas de extracción .....	147
4.10. Estimación del recurso mineral para conversión a Reserva Mineral .....	151
4.11. Costos y rentabilidad .....	157
4.12. Estudio de mercado .....	159
4.13. Otros .....	161
4.14. Categorización .....	165
4.15. Auditorías para estimación .....	170
4.16. Discusión de la confianza relativa .....	172
<b>PARTE 5: REPORTE DE ESMERALDAS, PIEDRAS PRECIOSAS Y SEMIPRECIOSAS.....</b>	<b>174</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estados de un proyecto exploratorio y su articulación con la GBPEC. Fuente: Modificado de Eimon, 1988. ....	16
Figura 2. <i>Títulos mineros vigentes en Colombia. Fuente ANM, 2020 y Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020</i> .....	17
Figura 3: Relación de los títulos de esmeraldas a mitad del 2020. Fuente ANM, 2020 y Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....	18
Figura 4: Ejemplo de organigrama de una compañía minera orientada a la exploración y explotación de esmeraldas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020 .....	19
Figura 5: Localización Geográfica de los Cinturones Esmeraldíferos Colombianos. Fuente: Modificado de Reyes et al (2006) y Moreno et al. (2009).....	21
Figura 6: Producción mundial de esmeraldas entre el año 2013 al 2017. Fuente: UPME .....	22
Figura 7: Producción nacional de esmeraldas entre el año 2016 al 2019. Fuente: FEDESMERALDAS.....	23
Figura 8: Producción de esmeraldas por municipio en el año 2019. Fuente: ANM 2020.....	23
Figura 9: Representación gráfica del muestreo en canales. Fuente: Modificado de Mineral Exploration - Principles and Applications (Haldar S.K) .....	52
Figura 10: Representación gráfica del muestreo por fragmentación. En estrellas rojas se muestran los puntos de muestreo con diferente densidad. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	53
Figura 11: Controles asociados a una campaña de perforación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	56
Figura 12: Esquema de perfil de perforaciones direccionadas con diferentes ángulos desde una misma plataforma. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....	57
Figura 13: Esquema de corte con perforaciones con diferentes azimuts y ángulos, así generando diferentes intersecciones con el cuerpo mineralizado. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	58
Figura 14: Controles de la anomalía objetivo a partir del loggeo en una zona de interés. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	59
Figura 15: Ejemplo de formato de cadena de custodia para envío de muestras a laboratorio. ....	67

Figura 16: Ejemplo de toma de muestra por incremento o submuestras y selección mediante cuarteo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	69
Figura 17: Microfotografía de una venilla de plagioclasa (gris-blanco) con mica muscovita (amarillo) rodeada de lodolita carbonosa (negro) dificultando la identificación en estas áreas. Imagen en polarización cruzada, 10X. Muestra del sector de Quipama. Cortesía: CDTEC. ....	76
Figura 18: Espectro Raman de un mineral de albita. Cortesía CDTEC. ....	77
Figura 19: Difractograma de rayos X donde se muestra la identificación y cuantificación de minerales por peso. Cortesía CDTEC. ....	78
Figura 20: Propuesta para al análisis de control y el análisis especializado en zonas con mineralizaciones evidentes en muestras de núcleos de perforación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	79
Figura 21: Relación entre exactitud y precisión. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	82
Figura 22: Ilustración que representa la importancia de un manejo adecuado de la densidad de la información y la calidad de los modelos. A) Baja densidad, mayor incertidumbre y B) Alta densidad, menor incertidumbre Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	86
Figura 23 Diagrama de planificación de auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	90
Figura 24: Diagrama de ejecución de la auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	91
Figura 25: Diagrama de informe de auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	92
Figura 26: A) Ejemplo de mapa geoquímico mostrando la concentración de un elemento químico de acuerdo con su ubicación. Tomado de: Paisagens Geoquímicas - Naturais e Antrópicas - no Estado do Paraná. B) Ejemplo de perfil geológico mostrando diferentes discontinuidades y C) Ejemplo de Modelo Geológico 3D, donde se muestra la geometría de las capas de roca en el subsuelo afectadas por un sistema de fallas. Tomado de ISAM Holding. ....	101
Figura 27: Diagrama de métodos geofísicos aplicados a la esmeralda colombiana. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....	108
Figura 28: Actividades asociadas a la garantía de la seguridad de la información. Modificado de Icontec, 2013. ....	112
Figura 29: Ejemplo de modelo geológico realizado con software. Fuente: Seequent. ....	117

Figura 30: Esquema de clasificación de recursos (modificado de Geoestima, 2018) .....	123
Figura 31: Diagrama de paso de Recursos a Reservas mineras (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2018).....	124
Figura 32: Cristales de parisita (par) en secciones delgadas de muestras de rocas del cinturón occidental. A y B) cristal de parisita en corte longitudinal asociado a calcita (cal). C y D) cristal de parisita en corte perpendicular al eje C asociado con calcita y pirita (Py). Tomado y modificado de: Verbel, 2017. Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas.....	126
Figura 33: Imagen de microsonda electrónica de secciones de rocas del cinturón esmeraldífero occidental. Se observan cristales de calcita (Cal) y fluorita (Fl) con exsoluciones de bastnaesita (BaS). Tomado y modificado de: Verbel, 2017. Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas. ....	127
<i>Figura 34: Ejemplar de Euclasa. Imagen tomada de: <a href="https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2019/07/la-euclasa.html">https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2019/07/la-euclasa.html</a> .....</i>	127
Figura 35: Modelo de bloques 3D para determinar el tenor de corte. Tomado de: Maptek Vulcan 9.1130	
Figura 36: Diagrama de Factores Modificadores. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020 .....	136
Figura 37: Factores mineros asociados a la extracción de piedras preciosas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....	140
Figura 38: Relación entre planificación y ejecución (Modificado de Alegre y Smith, 2012). ....	145
Figura 39: Tunelería con labores de sostenimiento realizadas para la extracción de esmeraldas. Fuente: CDTEC, 2020.....	147
Figura 40: Modelo isométrico que ejemplifica el método Block Caving. (Hamrin, 1998).....	149
Figura 41: Modelo que ejemplifica el método Cut and Fill. Tomado de: Harmin, 1998. ....	150
Figura 42: Diagrama de paso de Recursos a Reservas mineras (CRIRSCO modificado por Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2019).....	153
Figura 43: Sistema de Clasificación de la UNFC (Comisión Económica de las Naciones Unidas, 2010). ....	154
Figura 44: Estimación de producción de esmeraldas en millones de quilates. Fuente CRU y UPME (2018). ....	160
Figura 45: Principios fundamentales para la cuantificación de la incertidumbre. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....	166
Figura 46: Procedimiento para la categorización de recursos y reservas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....	167

Figura 47. Interacción de las 3C's de calidad. Fuente: CDTEC, 2020 .....	174
Figura 48. Ejemplo de zonación en esmeralda colombiana, vista sagital. Fuente: CDTEC, 2020.....	175
Figura 49. Escala de Tono y Saturación del color verde. Modificado de Munsell Book of Color. Fuente: CDTEC, 2020 .....	177

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1: Especificaciones técnicas de la nueva cartografía oficial de Colombia, Fuente: IGAC, 2020. ....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2: Principios de un programa de muestreo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3: Propuesta de muestreo en Canales. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4: Sugerencias para el muestreo por fragmentación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 5: Diámetros de perforación utilizados en exploración de proyectos mineros. (Mod. Gandhi y Sarkar, 2016) .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6: Calidades de la perforación a partir del porcentaje de recuperación de núcleo. Modificado de Gandhi y Sarkar, 2016. ....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 7: Etapas y procedimientos de la cadena de custodia. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 8: Archivos de respaldo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020..</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 9: Documentación sugerida para auditoría en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 10: Resumen de diagramas y representaciones gráficas en estimaciones de recursos y reservas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 11: Propuesta de aseguramiento de la información en muestras de roca, sedimentos y suelo en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 12: Propuesta de aseguramiento de la información digital en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.....</i>	<i>114</i>

*Tabla 13: Métodos de estimación de recursos tradicionales y actuales. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020..... 120*

*Tabla 14: Densidades medias de rocas sedimentarias. Tomado y modificado de Clark, S. P. (1966) ... 131*

*Tabla 15: Tipos de densidad. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. .. 134*

*Tabla 16. Recomendaciones legales y ambientales para tener en cuenta en el desarrollo y planeación de un proyecto minero de esmeraldas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020. .... 162*

## INTRODUCCIÓN

La Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana o GBPEC, se realiza basada en una serie de recomendaciones enfocadas en cada una de las etapas de un proyecto minero, a lo largo de cuatro capítulos se establecen parámetros, observaciones, errores comunes y enlaces que llevan al profesional a profundizar en cada aspecto articulándose con el actual Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales ECRR, publicado en el 2018. El desarrollo minero de las esmeraldas colombianas tiene dos objetivos generales que son: la exploración de nuevos depósitos y la reducción del riesgo exploratorio a medida que se avanzan los trabajos. Para lograr estos objetivos, se requiere generar una secuencialidad en los procesos exploratorios, interconectar las diversas etapas del proyecto minero y analizar los resultados obtenidos para tomar decisiones sobre la sostenibilidad del proyecto.

En la Figura 1 se simplifican las actividades de un proyecto de minero de esmeraldas desde el planeamiento conceptual pasando por una exploración de reconocimiento hasta una perforación de evaluación, importante en la estimación de recursos y reservas. La línea roja expresa la inversión en cada etapa y como esta va incrementándose a lo largo del proyecto exploratorio. Sin embargo, cada inversión estará sustentada en un punto crítico de toma de decisión, minimizando el riesgo y dando tranquilidad al inversionista.

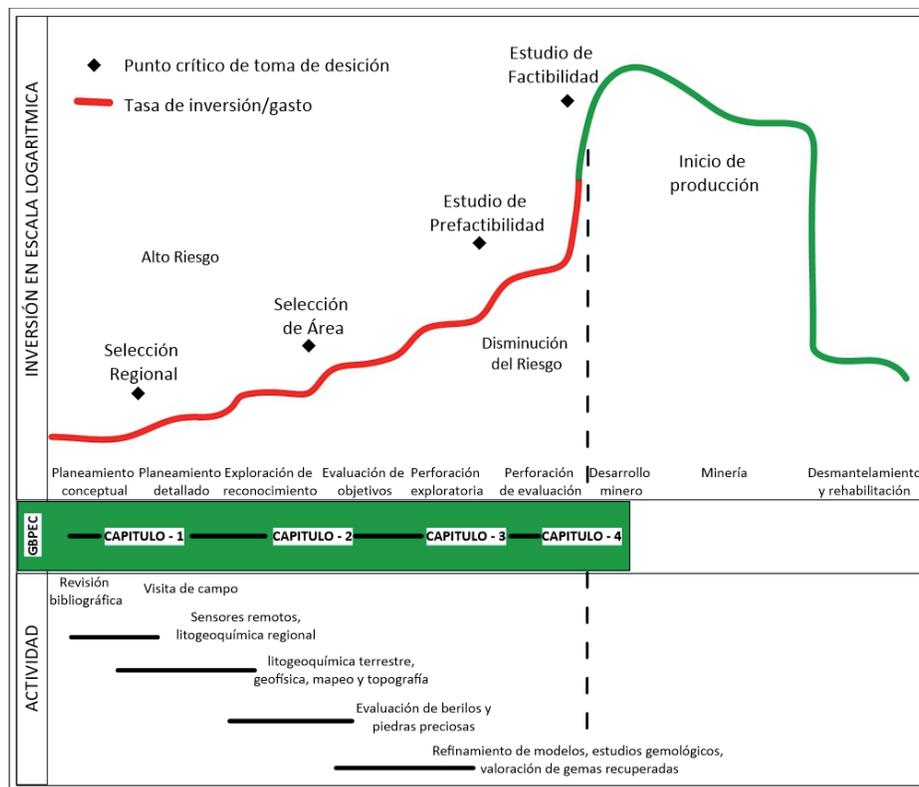


Figura 1: Estados de un proyecto exploratorio y su articulación con la GBPEC. Fuente: Modificado de Eimon, 1988.

En la Figura 1, la línea de inversión cambia de pendiente y de color a verde una vez el estudio de factibilidad determina la posibilidad de llevar a cabo el proyecto de extracción, garantizando la recuperación de la inversión realizada y por supuesto las ganancias esperadas hasta la etapa final de desmantelamiento y rehabilitación, porque está fundamentado en la estimación de reservas.

Es importante recalcar quienes exploran y como estos actores suelen organizarse.

La exploración mineral es un compromiso a largo plazo y de esta manera debe planearse cuidadosamente con base a los objetivos de la compañía. Hay que tener especial consideración por parte de la empresa exploradora y el entorno cambiante en el que opera. Actualmente los retos de las empresas esmeraldíferas en Colombia se basan en la responsabilidad de adecuarse a un sector cambiante que está pasando de una minería tradicional a una industrializada donde la implementación de nuevas metodologías lleva consigo el riesgo implícito y el costo asociado de establecer la viabilidad de estas.

En la Figura 2 se muestra el estado actual de la titulación minera en Colombia con 6.132 títulos de los cuales, solo 290 (5% del total) corresponden a esmeraldas. De los títulos asociados a esmeraldas sólo 221 (76% con respecto a la cantidad de títulos de esmeraldas) se encuentran en exploración y 69 (24% con respecto a la cantidad de títulos asociados a esmeraldas) cuentan con un PTO aprobado. Esto refleja el estado actual, pero también refleja el potencial para desarrollar ese 95% restante ya titulado y expandir con base en el conocimiento adquirido las zonas potenciales para nuevos proyectos (Figura 5).

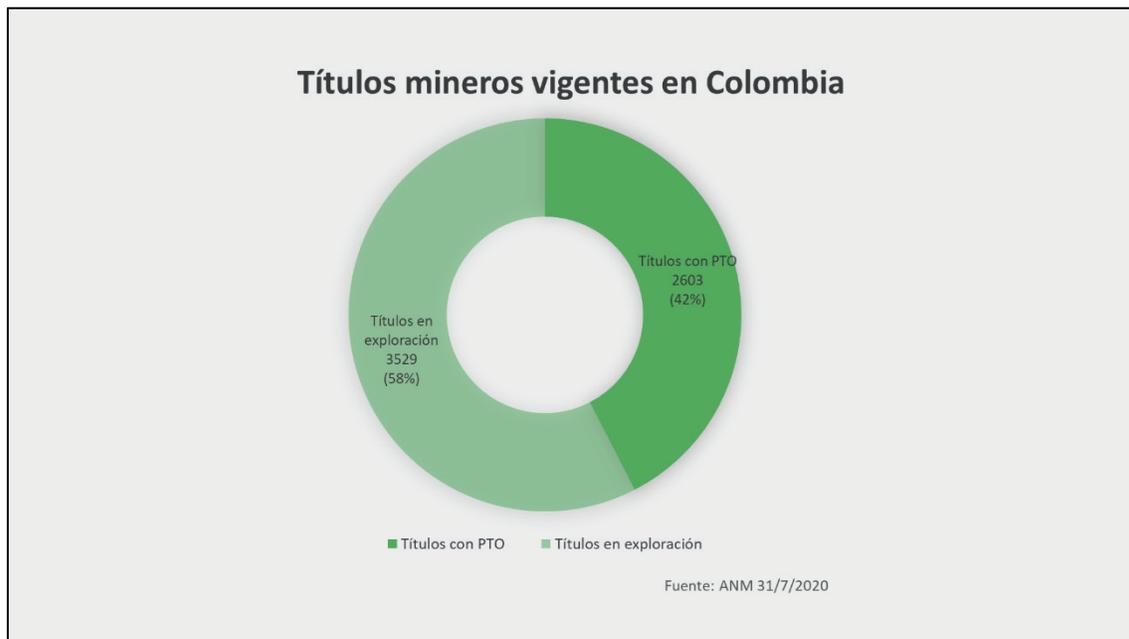


Figura 2. Títulos mineros vigentes en Colombia. Fuente ANM, 2020 y Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020

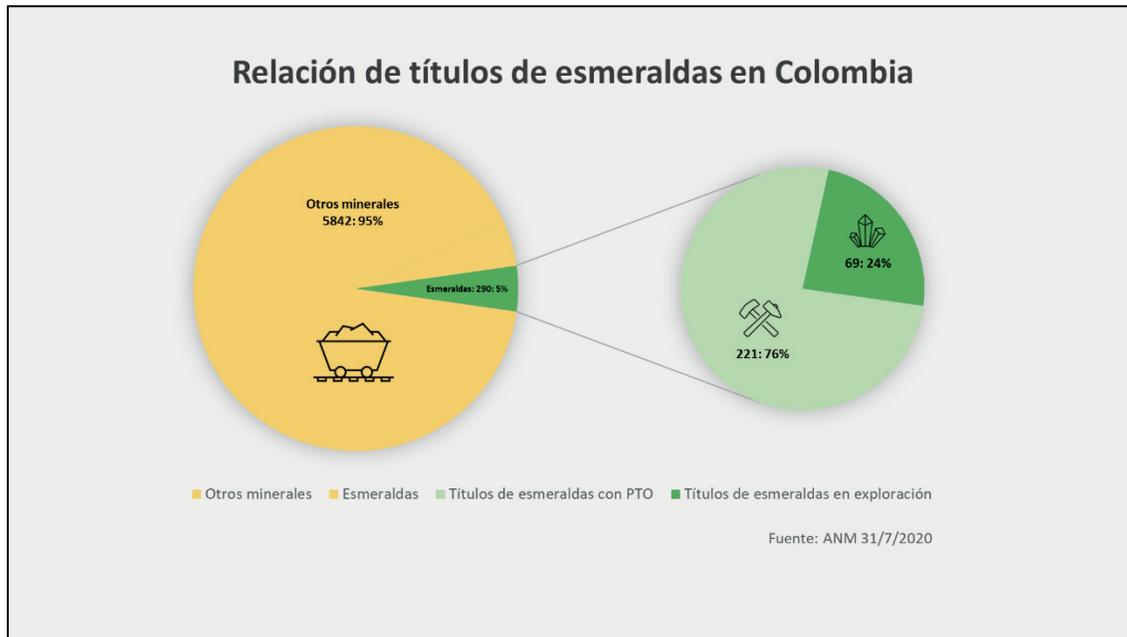


Figura 3: Relación de los títulos de esmeraldas a mitad del 2020. Fuente ANM, 2020 y Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020

La organización adecuada de las compañías y las jerarquías bien establecidas en los equipos de exploración pueden significar la diferencia entre optimizar los resultados y evaluar adecuadamente la siguiente etapa de exploración o detener un proyecto por completo a falta de claridad en los objetivos exploratorios.

Contar con el personal calificado en cada una de las áreas del conocimiento es indispensable, crear confianza en el grupo de trabajo y una sinergia adecuada caracteriza un grupo exitoso al momento de explorar, las compañías deben contar con una serie de valores al interior de los grupos de trabajo tales como:

- Identidad corporativa enfocada a resultados.
- Transmisión de experiencia y el conocimiento a los miembros del equipo a través de capacitaciones y entrenamientos al interior y exterior de la empresa.
- Establecer una atmosfera creativa y productiva, enfocando a los profesionales a ideas innovadoras que lleven los trabajos a nuevos objetivos de manera ágil, siempre basados en el método científico que soporta las distintas ramas de las geociencias.
- Promulgar altos estándares basados en la integridad y la ética.

Motivar el emprendimiento sobre una base de alto riesgo/alta recompensa que motive al equipo de exploración a probar y desarrollar nuevas metodologías y técnicas orientadas a objetivos claros.

Una alta calidad en la comunicación entre los equipos de trabajo, esta se logra a través de la interacción de las personas y la documentación de los procedimientos en las operaciones.

Figura 4 se presenta un ejemplo de organigrama básico de una empresa minera en etapas de exploración y explotación. A la cabeza se encuentra el presidente de la compañía quien orienta los objetivos corporativos a su equipo de colaboradores quienes son los vicepresidentes de exploración y de mina respectivamente. Cada Vicepresidente tiene consigo la responsabilidad de todo un equipo de trabajo. Dado el objetivo de la GBPEC, se centra esta explicación alrededor de las actividades exploratorias, estimación de recursos y reservas. El Vicepresidente de Exploración generalmente un profesional de alta experiencia en el área tendrá a cargo los objetivos de la compañía los cuales transmitirá al Gerente de Exploración quien con el apoyo del Equipo de exploración definirá las actividades a desarrollar para identificar las mineralizaciones al interior de los títulos. El apoyo en los otros grupos de trabajo es indispensable para una buena articulación, el desarrollo de cada actividad debe estar enmarcado en estándares claros de calidad, compromiso ambiental definido por los profesionales especialistas en estas áreas así como la seguridad de cada actividad a cargo del personal de Gestión Seguridad y Salud en el Trabajo (GSST).



Figura 4: Ejemplo de organigrama de una compañía minera orientada a la exploración y explotación de esmeraldas.  
Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020

Una recomendación para las organizaciones se basa en la importancia de contar con objetivos claros y un equipo dedicado a la investigación y desarrollo de nuevas metodologías en las diferentes áreas del conocimiento, aportando herramientas claves para la optimización de procedimientos que se verán reflejados en los resultados de exploración y en una inversión estratégica del presupuesto.

## CONTEXTO DE LA ESMERALDA EN COLOMBIA

### Geología de las esmeraldas en Colombia

Los yacimientos esmeraldíferos en Colombia se encuentran ubicados en la zona andina del país, en la región central de la cordillera oriental, específicamente en sus flancos occidental y oriental, en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Santander (ver Figura 5). La región sobre el flanco occidental de la cordillera, se le denomina el Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEOCC). Este cinturón se localiza al occidente de los departamentos de Boyacá (Quípama, Muzo, Maripí, San Pablo de Borbur, Coper), Cundinamarca (Paime, La Palma, Yacopí) y Santander (Florián, La Belleza). La región sobre el flanco oriental de la cordillera recibe el nombre de Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR), y abarca el oriente de los departamentos de Boyacá (Chivor, Macanal y Santa María) y Cundinamarca (Gachalá, Ubalá) (Se sugiere al lector consultar los trabajos del Ingeominas realizados por Reyes *et al.*, 2006 y Moreno *et al.*, 2009, además del documento de Carrillo, 2009). Aunque no existen reportes oficiales aparte de los dos cinturones ya mencionados no se puede descartar la probabilidad de apariciones de esmeraldas en otros sitios de Colombia.

La Cordillera Oriental colombiana se formó hace 5 millones de años aproximadamente, producto de una inversión tectónica, lo que originó un fuerte levantamiento de los sedimentos acumulados en ambiente marino desde hace más de 100 millones de años. Estos sedimentos se caracterizan por ser finogranulares, de composición silícea y calcárea, rica en materia orgánica y minerales accesorios con Be, Cr, V, S, Fe, REE, etc. en su estructura. Las rocas formadas por estos sedimentos son conocidas como Shales negros o lutitas en interacción con fluidos ricos en sales de Na, Ca y K.

Este levantamiento generado por grandes esfuerzos compresivos que afectaron estos sedimentos. Dichos esfuerzos produjeron un aumento drástico de presión y temperatura, generando complejos sistemas de pliegues, fallas y fracturas. El cambio repentino de la presión y la temperatura desencadenó la expulsión de estos fluidos ricos en sales a través de fallas y fracturas, entrando en contacto con los sedimentos, generó un intercambio químico y mineralógico entre ellas. El fluido que pasó a través de las fallas formó brechas hidráulicas e hidrotermales, producto de la disminución de la presión. Gracias a la despresurización, ocurre la precipitación de los minerales que son característicos en las brechas, venas y vetas de los yacimientos esmeraldas. En las condiciones óptimas, a su vez, ocurre la precipitación de Berilo ( $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_6)_3$ ), acompañado de elementos cromóforos como Cr, V y Fe que proporcionan el color verde característico de las esmeraldas colombianas. (CDTEC, 2018)

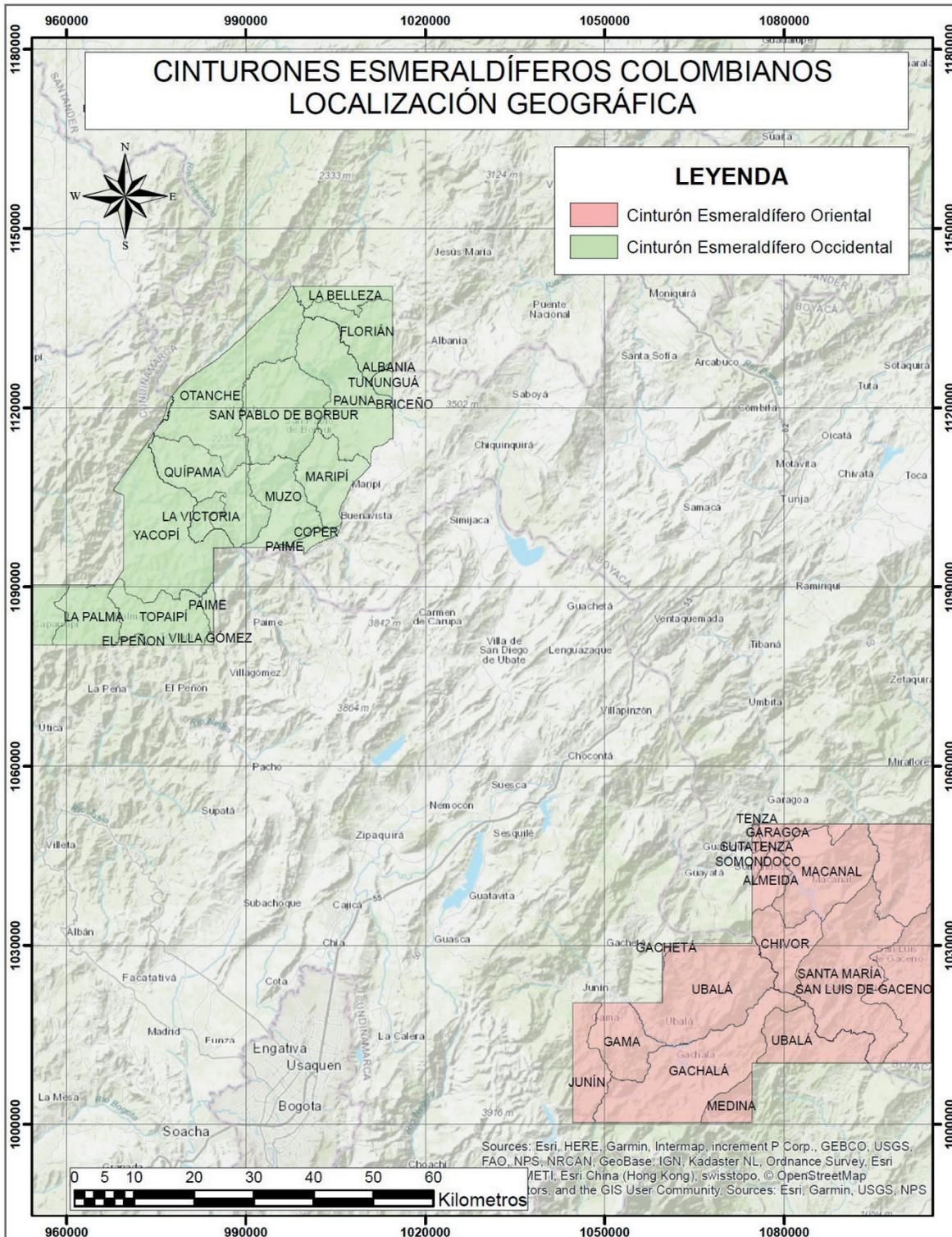


Figura 5: Localización Geográfica de los Cinturones Esmeraldíferos Colombianos.  
Fuente: Modificado de Reyes et al (2006) y Moreno et al. (2009).

## Estadísticas de producción

Según datos oficiales de la Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME, desde el año 2013, Zambia es el mayor productor de esmeralda del mundo, seguido de Colombia en el segundo lugar y de Brasil en el tercer lugar. Colombia es el primer productor de esmeraldas en América, sin embargo, gracias a la calidad de las piedras colombianas, éstas son las más apetecidas en el mercado internacional (Figura 6).



Figura 6: Producción mundial de esmeraldas entre el año 2013 al 2017. Fuente: UPME

En Colombia, durante los últimos años se ha visto una fuerte disminución de la producción de este mineral, pasando de producir 2'212,385 quilates en 2018, a 829,682 quilates en 2019, lo que equivale a una disminución del 62.5% (Fedesmeraldas, 2019) (Figura 7).

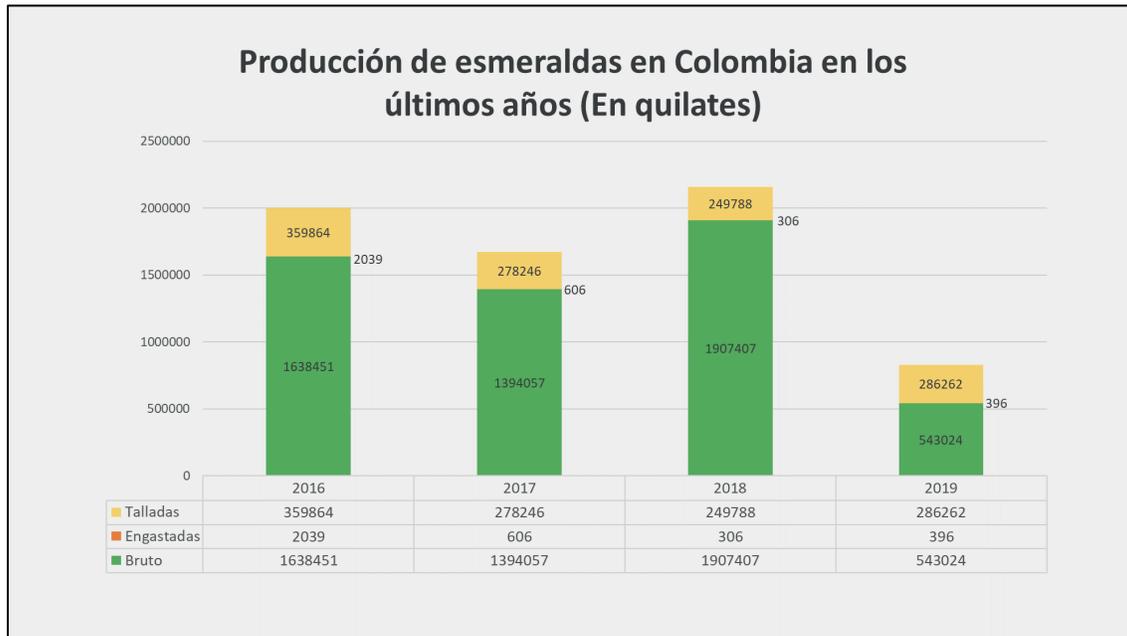


Figura 7: Producción nacional de esmeraldas entre el año 2016 al 2019. Fuente: FEDESMERALDAS

Las producciones de esmeraldas por municipio reflejan que el municipio de Muzo es el principal productor de esmeraldas en el País, responsable del 47% de la producción nacional, equivalente a 304,144 quilates. Le siguen los municipios de Maripí y San Pablo de Borbur, con un 27% y 15% (ANM, 2020), respectivamente (Figura 8).

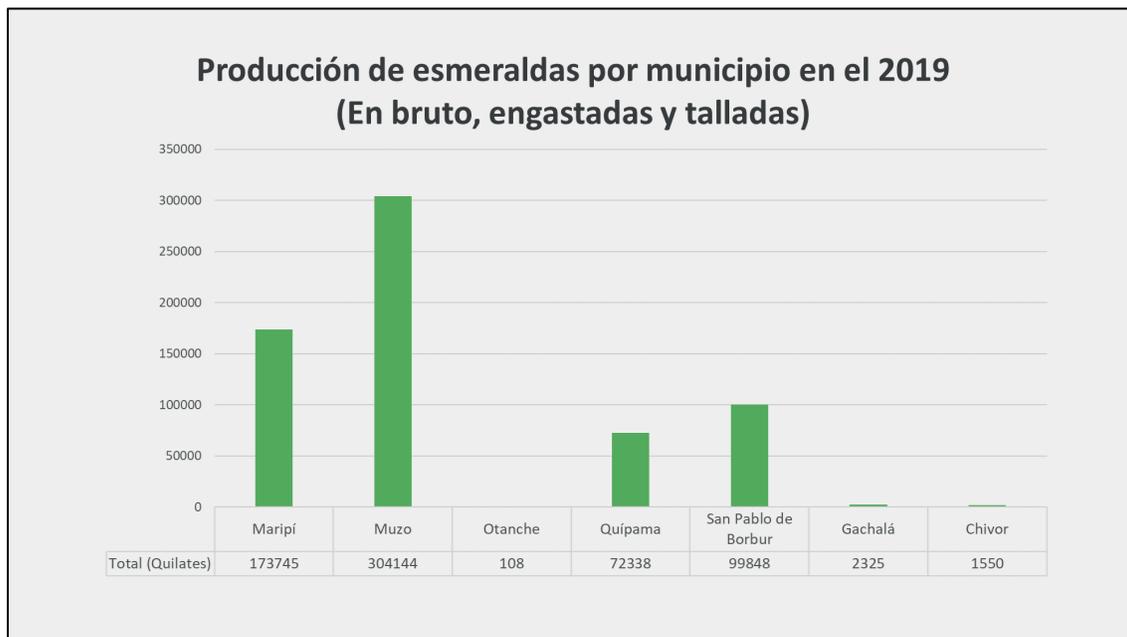


Figura 8: Producción de esmeraldas por municipio en el año 2019. Fuente: ANM 2020

## GUÍA DE USO

La Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana (GBPEC) está dividida en 4 capítulos relacionados con la Tabla 1 del Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR), enfocado a los depósitos esmeraldíferos colombianos. De esta manera, la GBPEC y el ECRR se encuentran articulados y en armonía.

Para un correcto uso de esta Guía, se recomienda leerla y utilizarla en el orden que se encuentra presentada teniendo en cuenta los ítems anteriores buscando una **secuencialidad de los procesos que lleven a una optimización de los recursos y a una disminución de incertidumbre en el conocimiento de los depósitos esmeraldíferos.**

Con base en lo anterior, luego de los títulos de cada ítem se muestra un recuadro verde relacionado con las actividades de Exploración, Recursos, Reservas en las que se enmarca el capítulo y está marcado con una “X” lo que significa que el ítem aplica para esa actividad.

 Exploración

 Recursos

 Reserva

Al interior de cada ítem el lector encontrará las distintas secciones con las siguientes características:

- Descripción: se presenta la introducción al ítem que se va a tratar, junto con un pequeño resumen del ítem y su utilidad o finalidad.
- Desarrollo: Se trata del grueso del ítem, en donde se dictan una serie de recomendaciones y sugerencias sobre las buenas prácticas a seguir para el correcto desarrollo del tema en el proyecto, teniendo en cuenta que la finalidad es la exploración y estimación de recursos y reservas de esmeraldas.
- Errores comunes: En esta parte se muestran una serie de posibles malos procedimientos que se deben evitar a lo largo del desarrollo del ítem en el proyecto minero.
- Más información: Fuentes de información adicionales en donde se puede ahondar sobre el tema tratado. Libros, páginas web, archivos multimedia, etc.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### **Buena práctica:**

Se entiende por buena práctica a una acción que ha tenido éxito en su aplicación en proyectos de diferente connotación. Se espera entonces, que en situaciones similares generen resultados al mismo nivel.

Una de las limitaciones de la aplicación de este concepto es que las Buenas prácticas dependen de la época y no se pueden aplicar para siempre, o hay regiones o países donde el modelo no se puede aplicar, porque no dan los resultados esperados.

Fuente: Presentación Wilfredo López, 2020

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.

Fuente: FAO, 2015(Good Practices team & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015)

Good Practices team, F., & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Plantilla de buenas prácticas. 1–5. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-as547s.pdf>

**Compósito:** Medida estándar de la longitud de los núcleos de perforación, con el objetivo de que cada núcleo tenga el mismo peso estadístico.

**Distancia de la corrida de Perforación:** Hace referencia a la medida del tubo de perforación. Normalmente, esta distancia es de 3 metros. Los intervalos de esta distancia generalmente se separan por medio de tacos de madera.

**GSI (*Geological Strength Index*):** Índice de Resistencia Geológica. Sistema de caracterización de las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos, a través de la fácil identificación por evaluación visual de las propiedades geológicas en el campo. Las observaciones se basan en la apreciación del macizo a nivel estructural y de las condiciones presentes en su superficie (discontinuidades), por lo cual, el criterio toma en cuenta el nivel de alteración – meteorización de las rocas, su historia geológica y condiciones de formación, estado de fracturación presente en ellas, así como la disposición de las juntas o discontinuidades.

**IRMR (In-Situ Rock Mass Rating):** Método que define la calidad geotécnica del macizo rocoso in situ.

$$\text{IRMR} = \text{P}(\text{BS}) + \text{P}(\text{JS}) + \text{P}(\text{JC})$$

P(X) = puntaje asociado a parámetro x.

BS = resistencia a la compresión uniaxial. Puntaje varía de 0 a 25

JS = espaciamiento de estructuras abiertas. Puntaje varía de 3 a 30

JC = Condición de las estructuras. Puntaje varía de 4 a 40

**Krigging:** método de interpolación geoestadístico con el cual es posible establecer superficies o zonas de predicción de una variable de acuerdo con los datos suministrados, además de suministrar la medida de confianza sobre la probabilidad de acierto de dicha predicción.

**Métodos de estimación asistidos por software mineros (MEASM):** procedimiento matemático y estadístico realizado en computadoras, que permite realizar estimaciones en bloques más pequeños, definidos en función del motivo de la estimación y la densidad de la red de exploración.

**MRMR (Mining Rock Mass Rating):** Sistema de clasificación del macizo rocoso que subdivide macizos de roca que han sufrido cambios debido a actividades mineras en años anteriores, de acuerdo con comportamientos similares, caracterizando su competencia. Tiene en cuenta factores mineros operacionales producidos por el hombre como: estrés inducido, daños por voladuras, exposición a la meteorización, orientación de túneles y acción del agua de mina en la roca, etc.

**Óptimo de producción:** Nivel de producción en donde se minimizan los costes medios totales de la empresa en el corto plazo. En este nivel, la mina produce a los costos más bajos posibles y utiliza de manera eficiente sus factores productivos.

**Parafina:** Sustancia sólida, blanca, translúcida, inodora y que funde fácilmente, que se obtiene de la destilación del petróleo o de materias bituminosas naturales y se emplea para fabricar velas y para otros usos.

**Persona Competente:** Profesional en la industria minera (geólogos, geocientíficos, ingenieros geólogos, ingenieros de minas y/o metalurgia extractiva) registrado en la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, sujeto a su código de ética. La persona competente debe tener un mínimo de 10 años de experiencia profesional en la industria minera y un mínimo de 5 años de experiencia relevante en el estilo de mineralización o en el tipo de depósito en consideración, y en la actividad en la cual esa persona se está desempeñando.

**Profesional:** Persona formada académicamente para realizar una ocupación específica. En el caso de la exploración y estimación de recursos y reservas, el profesional hace referencia a cualquier persona que esté formada y acreditada académicamente para ejercer actividades relacionadas con geología, ingeniería geológica, operación minera, administración, contabilidad, evaluación financiera, etc.

**Profesional con Experiencia** Profesional con experiencia comprobada en dirección de proyectos sobre exploración y estimación de recursos y reservas de esmeralda. Corresponde a un profesional con matrícula profesional, asignada por la entidad correspondiente.

**Pulpa:** Mezcla de mineral molido o pulverizado con agua o una solución acuosa.

**RQD (*Rock Quality Designation*):** Designación de la calidad de la roca. Se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo. Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trozos de testigo mayor de 10 cm en el intervalo de testigo de 1.5 m. a partir de los testigos obtenidos en la exploración.

**Testigo:** 1) Muestra de roca que es representativa de un yacimiento o mineralización. Puede ser resultado de las perforaciones realizadas o del levantamiento geológico en campo. 2) Sección de roca sobrante del proceso de elaboración de una sección delgada, pulida, o doblemente pulida, realizada para análisis petrográficos.

## TABLA DE CONVENCIONES Y UNIDADES

### Siglas:

ANM: Agencia Nacional de Minería.  
 CCRR: Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales.  
 CDTEC: El Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda.  
 CE OCC: Cinturón Esmeraldífero Occidental.  
 CEOR: Cinturón Esmeraldífero Oriental.  
 CIM: Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo.  
 DEM: Modelo de elevación digital del terreno.  
 DRX: Difracción de rayos X.  
 ECRR: Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas. Minerales.  
 FM: Factores Modificadores.  
 FRX: Fluorescencia de rayos X.  
 GBPEC: Guía de Buenas Prácticas en la Esmeralda Colombiana.  
 GPS: Sistema de posicionamiento global.  
 ICPMS: Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente.  
 IGAC: Instituto geográfico Agustín Codazzi.  
 INGEO MINAS: Antiguo Instituto de Geología y Minas, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC).  
 PEA: Evaluación económica preliminar.  
 PPB: Partes por millardo (corresponde al billón inglés o 10<sup>9</sup>).  
 QA/QC: Aseguramiento y control de calidad, del inglés *Quality Assurance / Quality Control*.  
 RAMAN: Es una técnica espectroscópica usada en química y física de la materia condensada para estudiar modos de baja frecuencia como los vibratorios, rotatorios, y otros.  
 REE: (*Rare Earth Elements*) - Elementos de tierras raras.  
 SEM: (*Scanning Electron Microscope*) - Microscopía electrónica de barrido.  
 SGC: Servicio Geológico Colombiano  
 UAV: (*Unmanned Aerial Vehicle*) - Vehículo aéreo no tripulado.

### Tabla de Unidades:

<b>Unidad</b>	<b>Explicación</b>
\$/t	Pesos Colombianos por tonelada
$\rho$	Densidad
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
ct	Quilate
ct/t	Quilate por tonelada métrica
g	Gramo

<b>Unidad</b>	<b>Explicación</b>
g/cm <sup>3</sup>	Gramo por centímetro cúbico
g/t	Gramo por tonelada
kg	Kilogramo
km	Kilómetros
m	Metro
mg	Miligramo
mg/t	Miligramo por tonelada
mm	Milímetros
ppb	Partes por millardo (10 <sup>9</sup> ). Su nombre se debe al billón inglés.
ppm	Partes por millón
t	Tonelada
tm	Tonelada Métrica
US\$/t	Dólares estadounidenses por tonelada

## PARTE 1: INFORMACIÓN GENERAL

### 1.1. Objetivo de la Guía de Buenas Prácticas

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

La Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana (GBPEC) se desarrolló con el fin de recomendar los diferentes procesos a ser llevados a cabo durante las fases de exploración, estimación de recursos, aplicación de factores modificadores para convertir los Recursos Minerales a Reservas Mineras de la esmeralda colombiana

Estas recomendaciones son importantes aun cuando los resultados de exploración no vayan a reportarse públicamente ya que pueden realizarse para la elaboración documentos técnicos al interior de la compañía.

La guía es parte del apoyo a los procesos de los reportes públicos realizados bajo el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales, de tal manera que el estándar corresponde al QUÉ HACER y la guía sea el CÓMO HACERLO.

#### ***Más información:***

Carrillo, V. (2009). Esmeraldas de Colombia: patrimonio geológico de la Humanidad (pp 76). Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de Geología.

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2018) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

Moreno, G., Terraza, R., Montoya, D. (2009). Geología del Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR). Boletín de Geología. Vol. 31 No2, pp 51 – 67. Bogotá D.C., Colombia. Revisado el 26 de agosto, 2020, en <http://www.scielo.org.co/pdf/boge/v31n2/v31n2a04.pdf>

Reyes, G., Montoya, D., Terraza, R., Fuquen, J., Mayorga, M. (2006). Memoria del Cinturón Esmeraldífero Occidental. Instituto Colombiano de Geología y Minas INGEOMINAS. Bogotá D.C., Colombia. pp 42. Revisado el 26 de agosto, 2020 en <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010002777/documento/pdf/2105027771102000.pdf>

## 1.2. Descripción del proyecto

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### ***Descripción:***

La descripción consiste en el resumen de los diversos aspectos del proyecto, tales como alcance, el estado en el que se encuentra y su vida útil en el caso de estar en nivel de minas. También resume las características geológicas regionales, la naturaleza del depósito, los minerales primarios y secundarios, localización y alcance.

### ***Desarrollo:***

La descripción del proyecto sintetiza las características más relevantes del mismo, y permite entender, de manera general parámetros que caracterizan el proyecto.

Entre ellos se encuentran:

- Fase del proyecto.
  - Muestreo preliminar.
  - Exploración avanzada.
  - Exploración conceptual.
  - Prefactibilidad.
  - Factibilidad.
- Planta de vida útil de la mina o plan de cierre.
- Aspectos geológicos.
  - Marco geológico regional y local.
  - Características geológicas.
  - Tipo de depósito.
  - Productos y subproductos.
  - Localización.
- Estructura del negocio.
  - Estudio de mercado.
  - Plan o modelo de negocio.
- Recursos minerales: En esta etapa se sugiere hacer un resumen sobre la estimación de recursos:
  - Controles geológicos.
  - Definición de dominios de interés económico.
  - Variabilidad espacial,
  - Modelo Geológico,
  - Definición de Dominios
  - Validación de la Estimación de Recursos.
- Factores Modificadores (FM): Los factores modificadores son el filtro que permite transformar recursos a reservas. Por ejemplo, si el proyecto tiene dificultades ambientales o sociales, se debe mencionar el estado de estos y su posible viabilidad. Otros aspectos técnicos que se deben analizar y que podrían incidir en la viabilidad económica del proyecto tales como factores

técnicos ligados a procesos extractivos, mercado, legales y gubernamentales deben ser mencionados. El análisis apropiado de los FM permite evidenciar potenciales riesgos.

#### **Recursos \* FM = Reservas**

- Reservas Minerales: Una reserva mineral es la parte económicamente explotable de un recurso indicado y/o medido. En general el concepto básico definido por estudios de prefactibilidad o factibilidad se podría definir como: Las Reservas Minerales corresponden a la relación de los recursos minerales y el efecto de la aplicación de los Factores Modificadores.

#### ***Errores comunes:***

- Descartar la descripción detallada del proyecto, ya que algunos inversionistas, al tener una larga carga de trabajo, hacen una valoración de proyecto leyendo el resumen ejecutivo del proyecto.

#### ***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2018) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

Committee for mineral reserves international reporting standards. (2019). CRIRSCO International reporting template. Revisado el 26 de agosto, 2020, en <http://www.criusco.com/template.asp>

### 1.3. Antecedentes históricos

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

#### ***Descripción:***

Los antecedentes históricos permiten comparar los datos obtenidos anteriormente con los adquiridos en las fases más recientes facilitando el diagnóstico del potencial de un proyecto. Estos cambios ocurren a medida que el proyecto va avanzando en cualquier fase, bien sea en los resultados de exploración o en las estimaciones de recursos y reservas. Además, los antecedentes históricos permiten generar estadísticas que pueden ser utilizadas en las proyecciones del proyecto minero.

#### ***Desarrollo:***

Los antecedentes históricos de un proyecto minero son útiles para evaluar si los objetivos del proyecto están bien encaminados y describir las estrategias a desarrollar en un futuro. En las fases de exploración, los antecedentes históricos apoyan la comprensión del depósito y pueden establecer patrones en la exploración del proyecto. Además, a medida que aumenta el conocimiento exploratorio se pueden proponer otras metodologías que reduzcan la incertidumbre del proyecto minero.

En las fases de exploración y en la estimación de recursos minerales, los antecedentes históricos sirven de soporte para identificar las geometrías de las zonas mineralizadas, así como la distribución de las gemas. Mientras, en la fase de estimación de reservas, las estadísticas de desempeño y las reconciliaciones mineras sirven para validar la confiabilidad de los análisis realizados anteriormente.

Debido a que cada una de las fases del proyecto minero genera diferentes tipos de información; a continuación, se enuncian categorías para tener en cuenta a la hora de presentar los antecedentes históricos.

- Resultados de Exploración
  - Todas las actividades exploratorias realizadas
    - Tipo de trabajos
    - Calidad de los trabajos
    - Cantidad de los trabajos
    - Resultados de los trabajos
    - Trabajos de desarrollo
  - En el caso de utilizar fuentes externas, nombrarlas.
  - Reportar los cambios de titularidad minera.
- Recursos minerales
  - Discutir qué cambios han tenido, en diferentes tiempos, las estimaciones de recursos mineros realizadas.

- Mencionar las modificaciones que han llevado a la variación de la nueva estimación de recursos. Por ejemplo, el aumento de número de perforaciones exploratorias o tomas adicionales de muestras en túneles exploratorios.
- Sustentar las razones que permiten que el proyecto se considere económicamente viable.
- Factores Modificadores
  - Técnicos.
  - Económicos.
  - Sociales.
  - Ambientales.
  - Políticos.
  - Legales.
  - Infraestructura.
- Reservas minerales
  - Presentar las diferencias con las estimaciones de reservas anteriores.
  - Realizar estadísticas de desempeño y producción para las operaciones pasadas y actuales.

#### ***Errores comunes:***

- Descartar los datos recolectados anteriormente, sin tener en cuenta una revisión de los mismos.
- No registrar datos.
- No contar con protocolos para el almacenamiento de datos.
- No actualizar las estimaciones de recursos y reservas.

#### ***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2018) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

### **1.4. Localización**

 Exploración

 Recursos

 Reserva

#### ***Descripción:***

La correcta localización del proyecto es fundamental. Los aspectos geográficos y administrativos repercuten en las necesidades del proyecto minero. Adicionalmente, la localización impactará en

las operaciones logísticas y técnicas a suplir para desarrollar las actividades asociadas al proyecto minero.

### **Desarrollo:**

La localización del proyecto permite entender la posición del título minero y las facilidades de infraestructura entre las que se encuentran, cómo poder acceder y cuántos recursos se requieren para alcanzar las zonas de interés. Los mapas tienen unos requerimientos mínimos para que el lector pueda localizar proyecto.

Fase de exploración: Deben ser descritos los siguientes parámetros en la localización.

- País.
- Departamento(s).
- Municipio(s).
- Vereda(s).
- Coordenadas según convenciones actuales según IGAC.
- Mapas de localización con coordenadas según convenciones actuales y escalas convenientes. Se sugiere el uso de escalas convencionales para facilitar el entendimiento de mapas y su uso en papel.
  - Norte.
  - Este.
  - Altura.
  - Ubicación de vías de acceso.
  - Infraestructura existente.

Fases de estimación de recursos y reservas.

A medida que el proyecto minero avanza, aumenta la complejidad de la información y los mapas a generar. Es importante mantener el mismo sistema de coordenadas durante la vida del proyecto. Se sugiere que las normas sigan la Resolución 40600 del 27 de mayo de 2015 o consultar la normatividad vigente frente a la presentación de planos y uso de coordenadas para el territorio colombiano.

Todo mapa debe presentar un título que indica su principal función, la cual está soportada por la leyenda y otras características expuestas. Se sugiere no sobrecargar los mapas de información, debido que dificultan el entendimiento de los mismos. Por ejemplo, en un mapa geológico las características como infraestructura o curvas de nivel pueden ir en un nivel inferior al de las unidades geológicas.

Se sugiere que los planos posean convenciones que permitan su lectura, el título, la leyenda, la fecha de elaboración y el nombre de los profesionales que hayan participado en la preparación de dichos planos. Adicionalmente, se sugiere la creación de plantillas que den homogeneidad al archivo y permitan realizar una comparación de mapas cuando así se requiera.

Las secciones y perfiles deben tener una localización en un mapa en vista de planta, así como la escala vertical, para determinar los cambios de ángulos en caso de haber exageración vertical.

Cuando el mapa posea fuentes externas, dichas fuentes deben ser incluidas en la información del mapa, de tal manera que el lector pueda conocer el origen de dicha información.

#### ***Errores comunes:***

- Carencia de elementos cartográficos que permitan entender el mapa.
- Saturación de datos que hacen el plano incomprensible.
- Falta de datos como fechas, título del mapa.
- Omitir la información del autor del mapa.
- Usar distintos sistemas de coordenadas para los mapas

#### ***Más información:***

Agencia Nacional de Minería (2015). Resolución 40600 del 27 de mayo de 2015 "Por medio de la cual se establecen requisitos y especificaciones de orden técnico minero para la presentación de planos y mapas aplicados a la minería". Bogotá, Colombia.: Agencia Nacional de Minería. Revisado el 23 de agosto, 2020 de [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res\\_40600\\_27\\_may\\_2015.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_40600_27_may_2015.pdf)

Servicio Geológico Colombiano. (2012) Estándares de cartografía geológica digital para planchas a escala 1:100.000 y mapas departamentales versión 2. Bogotá, Colombia.: Servicio Geológico Colombiano. Revisado el 4 de agosto, 2020 de <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/Documents/PDF%20PUBLICACIONES/Estandares-Cartograficos-Mapas-Geologicos.pdf>

### **1.5. Propiedades adyacentes**

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

#### ***Descripción:***

El objetivo de identificar las propiedades vecinas es determinar estructuras o seguimientos de zonas mineralizadas que puedan continuar hacia la propiedad minera (ECRR, 2018). El conocimiento de las propiedades vecinas también da un marco del desarrollo de infraestructura asociado a la minería e indirectamente la aceptación de la actividad minera en un área determinada.

### ***Desarrollo:***

La información de las propiedades adyacentes busca identificar el vecindario minero en el que se encuentra un proyecto, la repercusión de la minería en la zona de trabajo y el adelanto de actividades exploratorias y de explotación minera en un área determinada. Las zonas con mayor inversión en infraestructura asociada a minería, también reconocidas como distritos mineros, hacen que dichas zonas tengan proveedores mineros más especializados y gobiernos locales con mayor afinidad al sector.

La información minera de las propiedades adyacentes puede ser encontrada ocasionalmente de manera pública cuando son responsabilidad de empresas que están listadas en bolsa de valores. Otro valor de conocer la información de las propiedades adyacentes consiste en identificar los patrones geológicos que caracterizan el depósito, lo cual puede apoyar al programa de exploración en el título minero propio.

Tener en cuenta que ciertas concesiones mineras mantienen su información reservada debido a que son administradas por compañías privadas. Para estos casos se puede utilizar información pública recolectada por agremiaciones mineras o por la información que puede encontrarse en el Sistema Integral de Gestión Minera, Anna Minería (ANM, 2019) o cualquier otra información pública disponible en las diferentes plataformas del sector minero.

### ***Errores comunes:***

- Ignorar las características geológicas y de infraestructura de las propiedades adyacentes.
- No insertar el origen de las fuentes de información utilizada.
- Soportar estimaciones con el trabajo en propiedades adyacentes sin labores exploratorias en el área objetivo.

### ***Más información:***

Agencia Nacional de Minería (2019). Procedimiento para acceder al Anna Minería. Agencia Nacional de Minería. Revisado el 9 de agosto, 2020 en <https://www.anm.gov.co/?q=informacion-anna-mineria>

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2018) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

## 1.6. Geología

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### ***Descripción:***

La prospección geológica es uno de los primeros pasos de un proyecto de exploración y estimación de recursos y reservas.

El objetivo de la prospección geológica en un proyecto de exploración y estimación de recursos y reservas de esmeraldas es generar cartografía temática detallada sobre las unidades litológicas, rasgos tectónicos y estructurales, características de geomorfología y relieve, y mineralizaciones visibles en campo.

Además, durante la prospección geológica, se lleva a cabo una campaña de recolección de muestras, la cual tiene el fin de identificar de forma más precisa y detallada, la determinación de las diferentes litologías presentes dentro del título minero, la identificación (si es posible) de las asociaciones paragenéticas características de una mineralización de esmeraldas y la determinación de las cualidades y características microestructurales de las litologías identificadas.

La consolidación de la información recolectada a través de mapas geológicos es de vital importancia, dado que de este trabajo y sus resultados, se desprenden las siguientes labores de exploración y estimación de recursos y reservas de esmeraldas. Los mapas geológicos son la puntada inicial para obtener una visión tridimensional del modelo geológico que se necesita para desarrollar una campaña de exploración y una estimación de recursos y reservas

### ***Desarrollo:***

Con la prospección geológica, el geocientífico debe desarrollar un modelo geológico y una interpretación de este, que sea acorde con la roca caja de las mineralizaciones y sus características. La naturaleza de las esmeraldas colombianas las asocia de manera directa con la secuencia sedimentaria que las hospeda. Por lo tanto, la recolección de información estratigráfica detallada en cada proyecto consta de una base fundamental sobre la cual deben realizarse los estudios exploratorios.

Con base a lo anterior, se relacionan algunas recomendaciones al momento de hacer una campaña de prospección geológica.

1. Para comenzar, el geocientífico y su equipo de trabajo deben realizar una recopilación, análisis, validación y verificación de toda la información bibliográfica disponible sobre la geología del terreno a evaluar. Esto, con el objetivo de tener una visión general de las

principales características geológicas de la zona, antes de proceder a realizar la prospección. Es importante aclarar que la información de mapas generados por entidades públicas o privadas, universidades, artículos de investigación, etc.; deben ser tomados solo como base, ya que no reflejan en detalle la situación geológica del título minero.

2. Antes de entrar a las labores de campo, se recomienda que el equipo de trabajo realice un análisis geomorfológico y de relieve por medio de fotografías aéreas, imágenes satelitales o modelos de elevación del terreno (*DEM*). Con este análisis, el equipo de geocientíficos puede establecer la prioridad de las áreas a evaluar; teniendo en cuenta ciertos factores como: cambios bruscos en los cursos de los cauces, cauces paralelos que caen perpendicularmente a un cauce mayor, lineamientos en el relieve que son cortados por lineamientos en rumbos opuestos, o lineamientos en varias direcciones sin dirección preferencial.
3. Después del análisis geomorfológico, es conveniente seguir con el trabajo de campo para el levantamiento de la información geológica correspondiente. Para esta operación, se recomienda llevar el mapa topográfico del título y la libreta de campo, con el objetivo de registrar las características litológicas, estructurales, mineralógicas y de alteraciones que se vayan recolectando mediante puntos de control o estaciones. Estos puntos de control deben estar correctamente georreferenciados, tanto en el mapa como en la libreta, y deben ser suficientes para obtener una representación total de toda la extensión del título. Como medida de referencia, es recomendable tomar entre 3 a 5 puntos de control por cada hectárea de extensión que tenga el título.
4. Las muestras que se recolecten para los análisis geoquímicos y mineralógicos deben ser representativas, mostrando las características principales de la roca encajante del depósito, tipos de alteración, mineralizaciones, etc. Las ubicaciones de las muestras también deben ser registradas en el mapa y en la libreta de campo, declarar los protocolos de muestreo, así como en el lugar geográfico en campo para que pueda ser visitado nuevamente en cualquier oportunidad.
5. Con la información recopilada, es conveniente proceder a la realización de la cartografía correspondiente. Es recomendable hacer un mapa por cada temática (litología, geomorfología, estructural, alteraciones, mineralizaciones, trabajos antiguos, apiques, estaciones, etc.) y un mapa final con toda la información. Por otra parte, para obtener el nivel de detalle adecuado para un proyecto de exploración y estimación de recursos y reservas, se recomienda que la información de los mapas esté a una escala adecuada (1:2000 ó 1:5000 para proyectos de alrededor de 500 Ha).
6. Posterior a la adquisición de la información estructural y litológica del título, se recomienda hacer el levantamiento de la(s) columna(s) estratigráfica(s). Este trabajo se debe realizar en zonas donde la continuación de la secuencia sedimentaria sea lo más clara posible. Para proyectos de esmeraldas, es recomendable hacer el levantamiento a un detalle 1:50 o 1:100, describiendo características sedimentológicas, granulométricas, de color, alteraciones, mineralogía, etc. Dicha información debe ser recolectada en formatos

específicos para levantamientos estratigráficos y debe estar georreferenciada. Las muestras tomadas en el levantamiento de la columna también deben ser georreferenciadas, tanto en el formato como en campo y deben ser ubicadas en la columna estratigráfica.

7. Es de gran utilidad que los mapas geológicos y estructurales estén acompañados de secciones o cortes verticales lo que permite tener una visión preliminar del comportamiento de la litología del área de estudio en profundidad.
8. Para un mayor control en el proceso, se recomienda que todos los datos recolectados se encuentren documentados, georreferenciados, con la metodología aplicada, fecha de elaboración, responsable(s), registro fotográfico (con fecha, escala y ubicación).
9. La información bibliográfica o de otras fuentes debe ser validada y verificada (ver verificación de la información).
10. Se recomienda que toda la información sea guardada en una base de datos (preferiblemente una GDB) y la presentación de la cartografía esté acorde con los requerimientos de la autoridad competente facilitando los tiempos de entrega.

#### ***Errores comunes:***

- Establecer las cartografías geológicas realizadas por fuentes externas como el Servicio Geológico Colombiano, investigaciones científicas de universidades, o artículos científicos, como las cartografías propias y finales del proyecto minero. Es de vital importancia conocer que un mapa geológico posee una vida útil antes de que requiera una revisión debido a la generación de nuevos datos.
- Realizar levantamientos estratigráficos en el título minero sin haber determinado antes la geología estructural a detalle.
- Realizar las interpretaciones geoquímicas sin haber establecido antes la correlación entre la secuencia sedimentaria y los datos geoquímicos.
- Documentar procedimientos y observaciones de campo documentados de manera incompleta en las libretas de campo y registros.
- La recolección de muestras de campo y un manejo desordenado de los datos no satisface los objetivos de la exploración geológica.

#### ***Más información:***

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Chapter 13 Mineral Resources Classification. In Essentials of mineral exploration and evaluation (pp. 309-320). Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

## 1.7. Aspectos legales y tenencia de propiedad minera

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### **Descripción:**

La Persona Competente o el profesional encargado del proyecto deben revisar toda la información legal correspondiente al título minero. Debido a la importancia de la actividad, el profesional encargado del proyecto debe estar actualizado en la normatividad vigente del país, tener la capacidad de consultar en plataformas dispuestas para ello, así como las fuentes oficiales. De esta manera el profesional puede acompañar a los distintos actores interesados en los proyectos mineros en diversos procesos como seguimiento del contrato de concesión o cualquier otro proceso ante la autoridad minera.

### **Desarrollo:**

La Persona Competente o el profesional encargado del proyecto minero deben conocer el estado de la tenencia legal del título minero.

Además, el profesional debe tener en cuenta los siguientes aspectos legales en las etapas de exploración y estimación de recursos:

- Definir tipo de derecho minero que cobija al título minero, la legislación correspondiente y la etapa de desarrollo minero.
- Naturaleza de los derechos obtenidos (exploración y explotación).
- Derecho de uso y/o propiedad del suelo.
- Principales términos y condiciones de los acuerdos existentes.
- La seguridad de la tenencia en el momento del reporte.
- Proporcionar una declaración de cualquier procedimiento legal.

### **Aspectos legales para tener en cuenta en la etapa de estimación de reservas**

La Persona Competente debe estar al tanto del estado de todos los impuestos, contraprestaciones económicas y regalías que se pagan con respecto a cada propiedad. Las regalías son una contraprestación económica que se genera sobre toda la explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal, y consiste en un porcentaje fijo o progresivo del producto bruto explotado objeto del título minero y sus subproductos, calculado o medido al borde o en boca de mina, pagadero en dinero o en especie.

***Errores comunes:***

- No tener conocimiento de la normatividad vigente en el país.
- No revisar la documentación necesaria antes de solicitar un título minero.
- Desconocer las condiciones de pago de contraprestaciones económicas.

***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. (2018). Estándar Colombiano de Recursos y Reservas. Revisado el 1 de agosto, 2020 en <https://Comisioncolombianarecursosyreservas.Com/Estandar-Colombiano-Reporte-Publico-Resultados-Exploracion-Recursos-Minerales-Reservas-Ecrr/>

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 Colombiana.

Molina, JC (1945). El Dominio Minero en Colombia. La Propiedad Minera del Estado | Molina Revista de la Universidad Nacional (1944 - 1992). Revisado el 1 de agosto, 2020 en <https://Revistas.Unal.Edu.Co/Index.Php/Revistaun/Article/View/13418>

## 1.8. Verificación de la información

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### **Descripción:**

Uno de los primeros pasos para llevar a cabo un proyecto de exploración y reporte de recursos y reservas, radica en la revisión, verificación y validación de los trabajos previos en la zona del proyecto, al igual que toda la información regional de dominio público que se encuentre disponible.

La información por validar puede incluir mapas geológicos y estructurales, levantamientos geofísicos y geoquímicos, programas de *loggeo* y perforación, reportes de recursos y reservas anteriores, entre otros.

El objetivo de este proceso es que la persona encargada del reporte o documento técnico valide la exactitud y verifique la idoneidad de la información recolectada, antes de ser utilizada en el programa de exploración y en el reporte de recursos y reservas, para que los datos sean razonables.

### **Desarrollo:**

El profesional a cargo o persona competente debe realizar dos procesos: la **validación de la información** recolectada y la **verificación de los datos** contenidos en dicha información.

El objetivo de la validación de la información es cerciorarse de que no haya errores en los datos recolectados. Por otro lado, el objetivo de la verificación de los datos corresponde a establecer de la manera más concreta posible, la precisión y exactitud de los datos contenidos en la información recolectada.

Con base en lo anterior, a continuación, se presentan algunas recomendaciones a la hora de llevar a cabo la validación de la información y la verificación de los datos:

### **Validación de la información**

El sistema de coordenadas de los mapas recolectados, así como su leyenda y convenciones, debe estar acorde con la normativa legal y técnica vigente.  
Las coordenadas de los mapas deben corresponder a la proyección y origen cartográfico acorde a la localización del título, acorde a la reglamentación vigente.

Toda información bibliográfica recopilada, es importante que se pueda documentar en una base de datos digital, con su autor(es), tipo de publicación, año de publicación y fecha de revisión de la información, etc.

Si se recolectan muestras o datos de laboratorio analizados anteriormente, se sugiere revisar que el etiquetado esté correcto, que no exista superposición ni mezcla de muestras ni de análisis, que los procedimientos de laboratorio cumplan con los estándares internacionales y que la información esté correctamente georreferenciada. Esto también aplica a los programas de *loggeo* y perforación.

En caso de usar resultados de análisis de laboratorio (RAMAN, DRX, FRX, SEM, etc.), se recomienda revisar que los datos recolectados incluyan la información acerca del laboratorio donde se realizaron dichos análisis, tipo de equipo, fecha, metodología y la identificación del profesional responsable del procedimiento.

En caso de recopilar reportes de recursos y reservas previos, se recomienda extraer únicamente la información firmada por un geocientífico o profesional con experiencia. Así mismo, se sugiere que esta información sea contrastada con los reportes de producción de la compañía.

Se aconseja describir y documentar todas las actividades de validación realizadas

### Verificación de los datos

En caso de recopilar datos geoquímicos, geofísicos, de perforación, muestreo, etc.; de anteriores programas de exploración o de proyectos de investigación realizados por el gobierno u otras instituciones, se recomienda que dichos datos sean revisados y aceptados por el profesional encargado o la persona competente. Para realizar esta revisión la persona puede contrastar los datos con estudios similares como los realizados en zonas aledañas al título minero, en ambientes geológicos semejantes, o con tablas estandarizadas de concentraciones, porcentajes, distancias, composiciones, etc.

Si existen datos que fueron tomados con anterioridad en el proyecto, y no generan confianza al profesional encargado o persona competente, se recomienda no usar dichos datos. En su lugar, se propone una verificación de dichos datos con las técnicas propuestas y de persistir la incertidumbre proceder a repetir trabajos de muestreo e incluso perforaciones. Esto, con el objetivo de brindar total confianza en la persona competente y su equipo de trabajo.

Esta guía invita a describir y documentar todas las actividades de verificación realizadas.

#### **Errores comunes:**

- Presentar información recopilada sin su correspondiente bibliografía, así como copiar y pegar dicha información en los informes, sin leer su contenido de fondo.
- Utilizar datos de muestreos, análisis, perforaciones, entre otros; desconociendo la localización de dichos datos y sin conocer la custodia, protocolos y procedimientos
- Usar datos previos sin tener en cuenta su contexto geológico (contexto estructural y litológico de los datos).

***Más información:***

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), (2013) - Propuesta Estándares para Valoración de Recursos y Reservas Mineras. Unidad de Planeación Minero-Energética. Revisado el 11 de agosto, 2020 en [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Valoracion\\_Recursos\\_Reservas\\_Mineras.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Valoracion_Recursos_Reservas_Mineras.pdf)

## PARTE 2: TÉCNICAS DE MUESTREO

### 2.1. Localización de la información



#### **Descripción:**

La localización espacial de la información recolectada en la fase de exploración del proyecto minero debe ser lo suficientemente clara y concisa, con el objetivo de que dicha información pueda ser representada fácilmente en mapas, secciones transversales y otras representaciones en dos o tres dimensiones.

Algunos ejemplos de información que debe ser georreferenciada correctamente, son: muestras en perforaciones, apiques, trincheras, trabajos subterráneos, etc.

La localización adecuada de una muestra o cualquier tipo de información resultante de un proyecto exploratorio debe contener mínimo: una localización en coordenadas (norte - este o Y-X) y la altura respecto al nivel del mar (Z) o al collar en perforación.

Adicionalmente, durante la etapa de exploración es necesario elaborar mapas con una topografía de detalle, aunque por lo general, en las etapas tempranas de exploración, no se dispone de una capa adecuada de curvas de nivel. Se recomienda que los trabajos topográficos se realicen con puntos topográficos certificados por el IGAC, garantizando a su vez la resolución adecuada al área de estudio.

#### **Desarrollo:**

Localizar de manera adecuada la información recolectada en los trabajos exploratorios y las posteriores actividades sugiere la selección del sistema de coordenadas de referencia. Para ello, en Colombia existen distintos sistemas de referencia los cuales son expuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y sobre el cual se respalda la información geográfica del país. Por lo tanto, es necesario reconocer los sistemas vigentes dados por la autoridad al momento de georreferenciar cada proyecto.

#### **Nuevas especificaciones técnicas para la cartografía oficial de Colombia**

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) expidió la **Resolución 471 de 2020**, a través de la cual se establecen las especificaciones técnicas de referencia que tienen que considerar los productos de la cartografía básica oficial de Colombia, es decir, ortoimágenes, modelos digitales de terreno y bases de datos cartográficas. Esta resolución establece un sistema de proyección cartográfico, el cual trae un único origen para Colombia. Este origen se denomina **Origen Nacional**.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas para la cartografía oficial de Colombia

*Tabla 1: Especificaciones técnicas de la nueva cartografía oficial de Colombia, Fuente: IGAC, 2020.*

Parámetro	Valor
Proyección	Transversa de Mercator
Elipsoide	GRS80
Origen: Latitud	4°N
Origen: Longitud	73°W
Falso Este	5.000.000
Falso Norte	2.000.000
Unidades	Metros
Factor de escala	0.9992

### Recomendaciones para la localización de la información

Para definir correctamente la localización de la información recolectada en un programa de exploración de esmeraldas, se presentan a continuación una serie de recomendaciones para este proceso:

1. Establecer desde un principio el sistema de coordenadas a utilizar para el proyecto, de esta manera se evita confusión o errores involuntarios al momento de hacer conversiones entre diferentes sistemas de coordenadas. En ocasiones, las empresas mineras utilizan su propio sistema de coordenadas, por lo tanto, es importante recordar que para la presentación de información a las entidades públicas, deben acogerse a la normativa vigente al respecto.
2. De acuerdo con la localización de los dos cinturones productores de esmeraldas en Colombia se recomienda el uso del origen MAGNA – Colombia Bogotá o la proyección Origen Nacional para el manejo de coordenadas.
3. Para la localización de las muestras en túneles es necesario contar con levantamientos topográficos a detalle de los mismos para garantizar la correcta ubicación de las muestras, ya que los equipos de GPS no operan bajo tierra.
4. En el caso de las columnas estratigráficas, se recomienda contar con puntos de amarre en superficie debidamente georreferenciados para la base y tope de las columnas.
5. La localización de las muestras en columnas debe contar con información de la localización en superficie y adicionalmente se recomienda el registro de la posición relativa en los formatos de levantamiento estratigráfico.

6. Una buena práctica es dejar una marca en campo del sitio exacto de donde se recolectó la muestra. Esto, en dado caso que sea necesario volver recolectar o verificar dicha información.
7. Se recomienda que el registro de muestreo se realice como mínimo en la libreta de campo y en los formatos de campo estandarizados para la empresa.

### **Mapas Base para perforaciones**

Tienen la finalidad de representar los elementos del terreno necesarios para la georreferenciación. Estos son documentos cartográficos de base, donde se representan, según normas y convenciones: las vías de comunicación y sus respectivas variaciones e importancia, las construcciones, la red hidrográfica, la naturaleza del relieve (curvas de nivel), los nombres de los lugares, ríos y centros poblados, así como todos los elementos del terreno que tengan interés en ser representados.

Con el mapa de topografía inicial de la empresa se planifica la ubicación de los “collar” o cabeza de los pozos, dejando en el terreno una marca visible (esta marca debe llevar el nombre y el número del pozo). Esta ubicación normalmente se toma con GPS y el azimut (orientación) del pozo se da con la brújula geológica. En ocasiones, por inconvenientes topográficos en el terreno o por respetar cercanías a las quebradas que pasan por el título minero, se debe modificar la ubicación original del pozo de perforación.

Primordial la ubicación de las plataformas en un mapa y una vez se lleva a cabo la perforación, la localización del pozo “collar” debe ser registrada con un instrumento topográfico de alta precisión registrando la ubicación final del pozo la cual será nuevamente consolidada en los mapas y secciones para llevar a cabo todas las interpretaciones que de esta información se deriva

### **Comportamiento del pozo en profundidad**

Localizar de manera adecuada la información debe ser una buena práctica ya que normalmente con la profundidad, los pozos tienden a desviarse tanto en buzamiento como en azimut. Para medir esta desviación, existen varios programas de software ofrecidos por las empresas que llevan a cabo la perforación. Estos programas ofrecen toma de datos en tiempo real y así se puede analizar la trayectoria del pozo en cada metro perforado.

La tecnología actual de los sistemas de topografía proporciona a los proyectos mineros los medios necesarios para producir planos de alta precisión, uso de los datos de estudios para entregar representaciones 3D de las operaciones y proyectos. Además, la disposición subterránea se ha simplificado mediante el uso de equipos láser de túnel “*tunnel laser*,” mientras que los sistemas de nivelación con láser han añadido un nuevo nivel de precisión a las actividades en superficie.

También se pueden producir modelos de elevación digitales de terreno de alta definición, los cuales pueden ser utilizados para aplicaciones tan diversas como identificar objetivos de exploración bajo una espesa vegetación y monitorear hundimientos inducidos por las minas.

### ***Errores comunes:***

- Completar los formatos de recolección de muestras en oficina y no en campo. Esto puede acarrear errores de confusión en la numeración y denominación de las muestras recolectadas.
- Utilizar un sistema de coordenadas para la localización de las muestras, diferente al usado en todas las demás actividades del proyecto. Es recomendable usar el mismo sistema de coordenadas para todo el proceso de exploración, reporte de recursos y reservas.
- Documentar los datos de localización de las muestras solamente en la libreta de campo o en los formatos de localización de muestras.
- No hacer verificación de la ubicación final de los pozos de perforación.
- No contar con la topografía adecuada para el proyecto.

### ***Más información:***

Equipo Minero. (2014). Herramientas del siglo 21 del topógrafo. Revisado el 1 de agosto, 2020 en <https://www.Equipo-Minero.Com/Contenidos/Herramientas-Del-Siglo-21-Del-Topografo/>

Fernández, L. (1990). Topografía minera. Revisado el 1 de agosto, 2020 en <http://Catalogo.Unican.Es/Cgi-Bin/Abnetopac/?TITN=45448>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2020). Resolución 471 de 2020. Revisado en 1 de agosto, 2020 en [https://igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion\\_471\\_de\\_2020.pdf](https://igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/normograma/resolucion_471_de_2020.pdf)

## 2.2. Tipos de muestreo

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### **Descripción:**

El muestreo se define como la acción mediante la cual se toma una porción de un objeto, de tal manera que esta porción debe representar de la mejor manera posible, todas (o la gran mayoría) de las características y propiedades de dicho objeto. Aplicando esta definición a aspectos geológicos, el muestreo es el procedimiento mediante el cual se realiza la recolección de porciones o muestras de un afloramiento, suelo, depósitos aluviales, mineralización o núcleos de perforación, etc. que sean representativas de éstos.

La finalidad del muestreo es generar la mejor representación de las características y ambiente del mineral objetivo. El intervalo, tamaño y la cantidad de muestras, depende de las características geológicas y estructurales asociadas a la esmeralda y las condiciones locales de cada proyecto.

Existen diferentes métodos de muestreo en exploración geológica. Cada uno tiene sus características y su utilidad depende de situaciones específicas y del tipo de mineralización que se esté estudiando. Como métodos de muestreo, se pueden encontrar:

- Muestreo en suelo.
- Muestreo en apiques (*pitting*).
- Muestreo en trincheras.
- Muestreo en apilados (*stack sampling*).
- Muestreo en depósitos aluviales.
- Muestreo en canal.
- Muestreo por fragmentación (*chip sampling*).
- Muestreo en núcleos de perforación.
- Muestreo aleatorio o de agarre (*grab sampling*).
- Muestreo en carros.
- Muestreo en masa.

### Desarrollo:

El proceso de un programa de muestreo correctamente realizado debe cumplir con los siguientes principios.

Tabla 2: Principios de un programa de muestreo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

<b>Principios de un programa de muestreo</b>	
1.	Representatividad, integridad y seguridad de las muestras.
2.	Exactitud y precisión de los ensayos de laboratorio.
3.	Preparación de las muestras.
4.	Realizar control de la cadena de custodia desde la extracción de la muestra hasta su llegada a laboratorio.
5.	Aseguramiento y control de calidad (QA/QC).
6.	Inserción de “blancos”, muestras estándar o duplicados en intervalos determinados, al momento de realizar los análisis.
7.	Continuidad de la mineralización.

En el caso de un programa de muestreo para la exploración y reporte de recursos y reservas de esmeraldas, se recomienda llevar a cabo los siguientes tipos de muestreo:

**Muestreo en canales:** este método de muestreo se puede aplicar en exploración de esmeraldas, ya que es propio de mineralizaciones en forma de venas, vetas y vetillas (Figura 9). Este método consiste principalmente en hacer canales o segmentos de muestreo a través de un cuerpo mineralizado que se encuentre expuesto en superficie o en las paredes, techos o bases de trabajos subterráneos. También suele ser útil cuando la mineralización no es evidente y se necesita cubrir exposiciones prolongadas de roca con condiciones similares de manera que los resultados de los análisis ayuden a orientar la exploración.

Para el muestreo en canales se recomienda tener en cuenta:

Tabla 3: Propuesta de muestreo en Canales. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

<b>Muestreo en canales</b>	
1.	Limpiar el área para que quede libre de cualquier tipo de contaminación
2.	Establecer un canal que corte las venas o vetas, marcando 2 líneas de un largo determinado de forma perpendicular a las vetas, incluyendo la mineralización que presente a ambos lados, para evitar sobreestimar el tenor.
3.	Para mineralizaciones de esmeralda, se recomienda que el ancho del canal sea de 4 o 5 centímetros aproximadamente, con una profundidad de 1cm. Su largo puede variar

	entre 1 o 2 metros. Se recomienda que las dimensiones escogidas se mantengan a lo largo de todo el programa de muestreo. Estas dimensiones y el tamaño mínimo de la muestra a extraer deben depender de un análisis previo de la heterogeneidad del depósito, el tamaño y frecuencia de distribución de las esmeraldas.
4.	Extraer las muestras del canal por medio de un martillo, sierra circular y cincel, o un martillo neumático. Mientras una persona corta el canal, otra persona recoge las muestras resultantes del corte en una bolsa o caja limpia. No se debe hacer ninguna reducción en el tamaño de la muestra primaria en el campo, toda la muestra extraída se debe identificar y sellar para su envío al laboratorio.
5.	Establecer marcas visibles de los muestreos con el uso de pinturas y cintas reflectivas. La marcación de la muestra a extraer debe tener su georreferenciación (X, Y, Z).

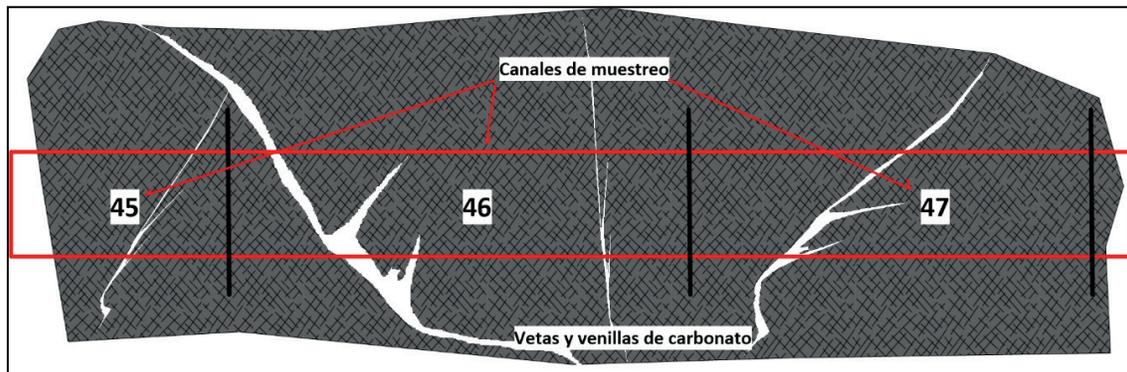


Figura 9: Representación gráfica del muestreo en canales. Fuente: Modificado de Mineral Exploration - Principles and Applications (Haldar S.K)

**Muestreo por fragmentación (*chip sampling*):** Debido a que las mineralizaciones de esmeraldas se encuentran irregularmente distribuidas, una alternativa al muestreo en canal puede ser el muestreo por fragmentación. En este tipo de muestreo consiste en tomar muestras de roca de manera ordenada y planificada, en intervalos regulares establecidos anteriormente, cubriendo todo el afloramiento o la superficie expuesta (Figura 10).

Para el muestreo por fragmentación se recomienda:

Tabla 4: Sugerencias para el muestreo por fragmentación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

<b>Muestreo por fragmentación (<i>chip sampling</i>)</b>	
1.	Limpiar el área para que quede libre de cualquier tipo de contaminación antes de empezar con el procedimiento.

### Muestreo por fragmentación (*chip sampling*)

2. Con ayuda de un martillo o un cincel, “dibujar” una rejilla con intervalos regulares, sobre el afloramiento o la superficie de roca expuesta, de tal manera que la rejilla esquematizada cubra dicha superficie.
3. Los intervalos de la rejilla dependen de las dimensiones del afloramiento o superficie de roca. Como guía, en una superficie de 3x3 metros se recomienda establecer una rejilla de 30x30 cm aproximadamente.
4. En los puntos de intersección de la rejilla, se extraen fragmentos de roca de 1-5 cm de tamaño aproximadamente.
5. Los fragmentos son recogidos en cajas o bolsas limpias.
6. Contar con registros fotográficos y documentación apropiada de este tipo de muestreo.

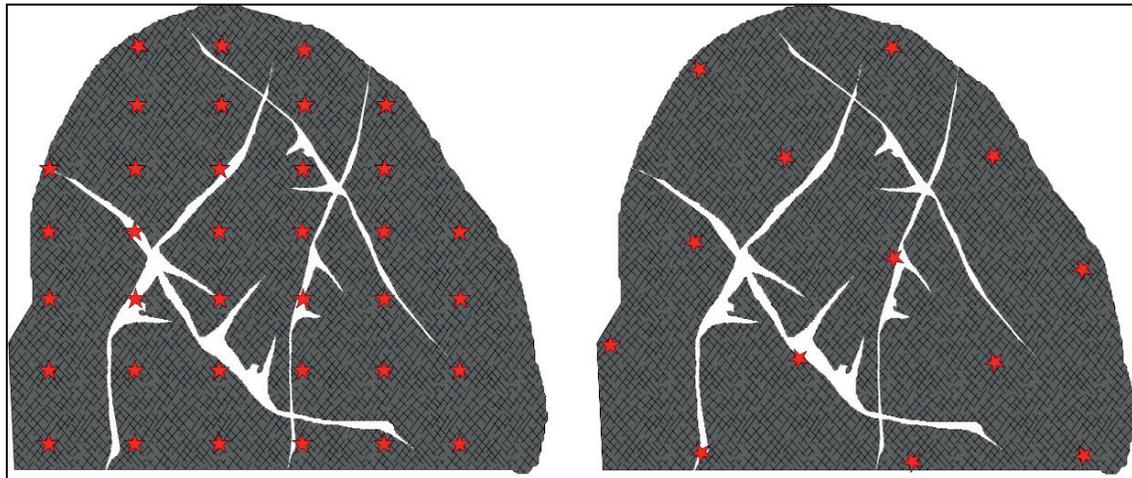


Figura 10: Representación gráfica del muestreo por fragmentación. En estrellas rojas se muestran los puntos de muestreo con diferente densidad. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

**Muestreo en núcleos de perforación:** ver sección 2.3 técnicas de perforación y sección 2.4 recuperación de las muestras.

**Muestreo aleatorio o de agarre (*grab sampling*):** Este método se puede aplicar en cualquiera de las etapas de un proyecto de exploración y en la etapa de producción de la mina (si aplica). Basta con escoger, aleatoriamente, muestras de mano de material suelto, ya sea de un afloramiento, trincheras y apiques, trabajos mineros, desechos estériles, carros mineros, etc. (Ver capítulo 2.6 Submuestras)

Para este método, se recomienda tener especial cuidado en no recoger e incluir en el muestreo objetos extraños o muestras de roca que no pertenezcan al sitio de dónde se está haciendo el muestreo. El registro de este tipo de muestras debe contener la justificación para la cual se decidió

recolectar la muestra, el tratamiento de homogenización para evitar sesgo analítico, localización geográfica de la muestra y otras observaciones de importancia.

***Errores comunes:***

- No limpiar adecuadamente la superficie de muestreo, ni el sitio de almacenamiento de las muestras, antes de empezar con los procedimientos.
- Registro incompleto de documentación relacionada con el muestreo.
- Recolectar muestras que representan preferencialmente algunas características del depósito. Por ejemplo, recolectar únicamente muestras de las partes más ricas en mineralización de toda la zona, por ejemplo, solo muestrear las vetas. Esto aumentará incorrectamente el contenido de mineral del muestreo general.
- Muestrear más material más blando que material más duro, especialmente si el muestreo se realiza en zonas donde hay intercalaciones de materiales competentes y poco competentes, o por medio de martillo y cincel. Se recomienda recolectar proporciones similares entre los diferentes tipos de materiales.
- Muestras que no son equiprobables
- No asegurar la cadena de custodia de la muestra.

***Más información:***

Haldar, S. K. (2013). Mineral exploration principles and applications. Waltham, MA, USA: Elsevier.  
Roonwal, G. S. (2017). Mineral exploration practical application. Singapore, Singapore: Springer.

### 2.3. Técnicas de perforación

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

#### ***Descripción:***

La perforación diamantina es una técnica de exploración y verificación que permite conocer el interior del depósito con un costo menor frente a realizar una tunelería exploratoria cuando se prevé una anomalía bajo la superficie. La ubicación en tres dimensiones (x, y y z) de los taladros y la dirección (azimut y rumbo) con que se realizará una perforación debe seguir un modelo geológico establecido con anterioridad.

De la perforación se obtiene el testigo o núcleo (muestra de roca) que será evaluada para mejorar el modelo exploratorio y conocer el depósito disminuyendo la incertidumbre. Por tal motivo, una ubicación estratégica permitirá tener una mayor certeza en la estimación de recursos.

Existe información adicional que se obtiene a través del estudio de los núcleos de perforación y que aporta datos geotécnicos e identificación de zonas de falla y zonas húmedas que cambian las condiciones de la roca y que son indispensables al momento de realizar una obra subterránea.

Debido a la naturaleza de los depósitos de esmeralda en Colombia y a la importancia de obtener una muestra con la menor ruptura posible, se sugiere realizar perforaciones diamantinas corazonadas. Este tipo de perforación permite conservar el testigo de la roca, adicionalmente se pueden recuperar esmeraldas, identificar los minerales y zonas de alteración, lo cual sirve como base para la planeación de las labores mineras de una forma eficiente.

#### ***Desarrollo:***

La perforación corresponde al método más efectivo para reconocer el subsuelo recuperando la roca que allí se encuentra. Esto permite identificar diferentes partes y zonas que son de interés en una labor minera. Sin embargo, como en todo proyecto se debe ser estratégico en el uso de los recursos económicos o de la inversión que se realiza, por tal motivo es importante planificar e identificar previamente los objetivos que pueden ser de interés.

Previo a cualquier programa de perforación es importante contar con información de geología de superficie, topografía, imágenes satelitales, geoquímica, geofísica, túneles exploratorios previos y demás técnicas de exploración. Los datos anteriormente mencionados permiten generar un modelo geológico conceptual con localizaciones y profundidades de los objetivos a perforar.

Basados en el modelo geológico conceptual como respaldo y la ubicación de los objetivos de interés, se debe diseñar el programa de perforación teniendo en cuenta la cantidad de pozos, el diámetro de la perforación, la profundidad final, el azimut y la inclinación. Es importante conocer cuántas perforaciones pueden salir de una misma plataforma; en algunos casos es mejor realizar las

perforaciones a partir de una plataforma por temas económicos, permisos y por supuesto el objetivo a identificar.

El diseño de una campaña de perforación puede realizarse a lo largo de la vida de un proyecto minero contemplando objetivos que pueden incluir exploración, confirmación, definición y delimitación de las zonas mineralizadas, comprobación de anomalías geoquímicas o geofísicas, verificación y actualización del modelo geológico, control de estructuras relevantes en el modelo geológico, identificación de características geotécnicas en los alrededores de la zona mineralizada e incluso pozos de cierre de modelo los cuales son intencionalmente perforados en zonas estériles que validen esta información.

### **Campaña de perforación**

La localización de los pozos y las trayectorias son claves en la construcción de un modelo geológico y sus posteriores productos. Por tal motivo se sugiere generar una base de datos que presente el nombre del pozo (o “collar”), con altura medida con precisiones de centímetros; la longitud total del pozo, el azimut, inclinación y la fecha de inicio y finalización, así como el nombre de la campaña de perforación.

Los controles fundamentales de una perforación se pueden resumir en cuatro aspectos: Geología, Permisos, Presupuestos y Control de la Operación. Estos conceptos están resumidos en la siguiente gráfica (Figura 11).



Figura 11: Controles asociados a una campaña de perforación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

### Control geológico en perforación:

Las tareas fundamentales en una campaña exploratoria están dadas por el grupo de exploración. En este caso se sugiere que el personal encargado realice la identificación del objetivo de la campaña exploratoria, localización de las plataformas, tipo de diámetros a perforar, metraje de perforación propuesto y la prognosis (pronóstico) de las perforaciones a realizar. Los productos anteriormente mencionados serán fundamentales para los controles de la campaña de perforación tales como Presupuestos, Permisos y Operación.

La ubicación de las plataformas es fundamental, porque desde este punto se va a desprender la logística, presupuesto y permisos asociados a la operación de instalar los taladros. Se sugiere realizar revisiones previas a la selección de los sitios, de esta forma se tiene un mejor control tanto de predios como de servidumbres.

Una buena práctica es que el plan de perforación incluya el número de perforaciones, el orden con que se realizarán, el número de metros de cada perforación y en el caso de realizar perforaciones con orientación, definir el ángulo y azimut de la perforación. Cualquier perforación debe ser constatada por el personal de geología de manera preliminar, de esta manera se comprueba que la maquinaria está en la disposición correcta para realizar la operación.

En la Figura 12 y en la Figura 13 se observa cómo se pueden planear perforaciones utilizando una misma plataforma.

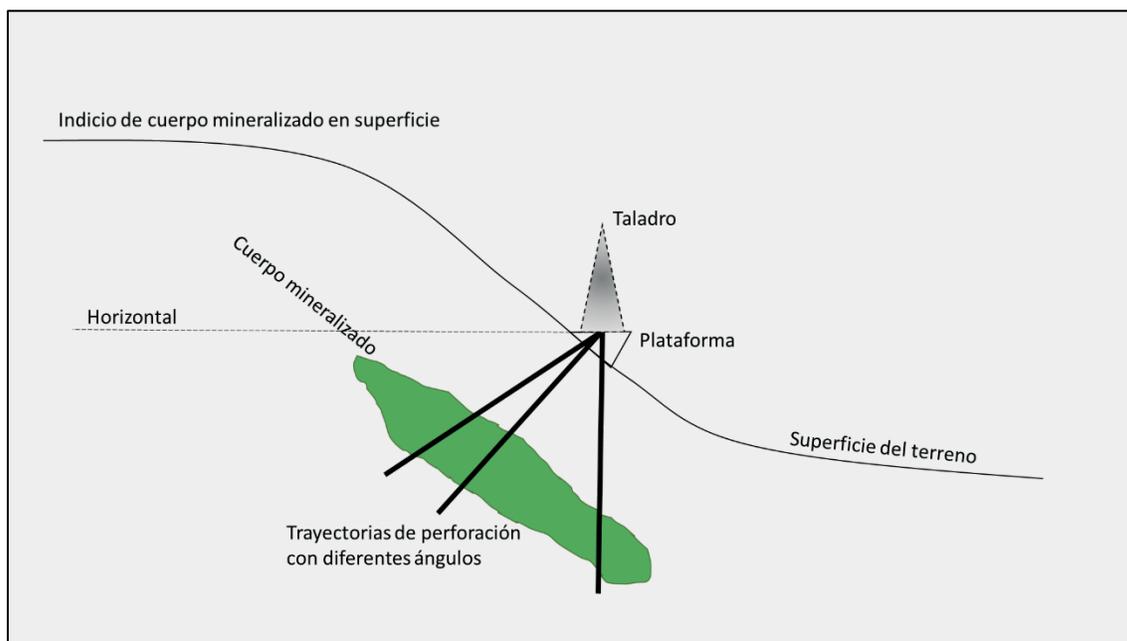


Figura 12: Esquema de perfil de perforaciones direccionadas con diferentes ángulos desde una misma plataforma.  
Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

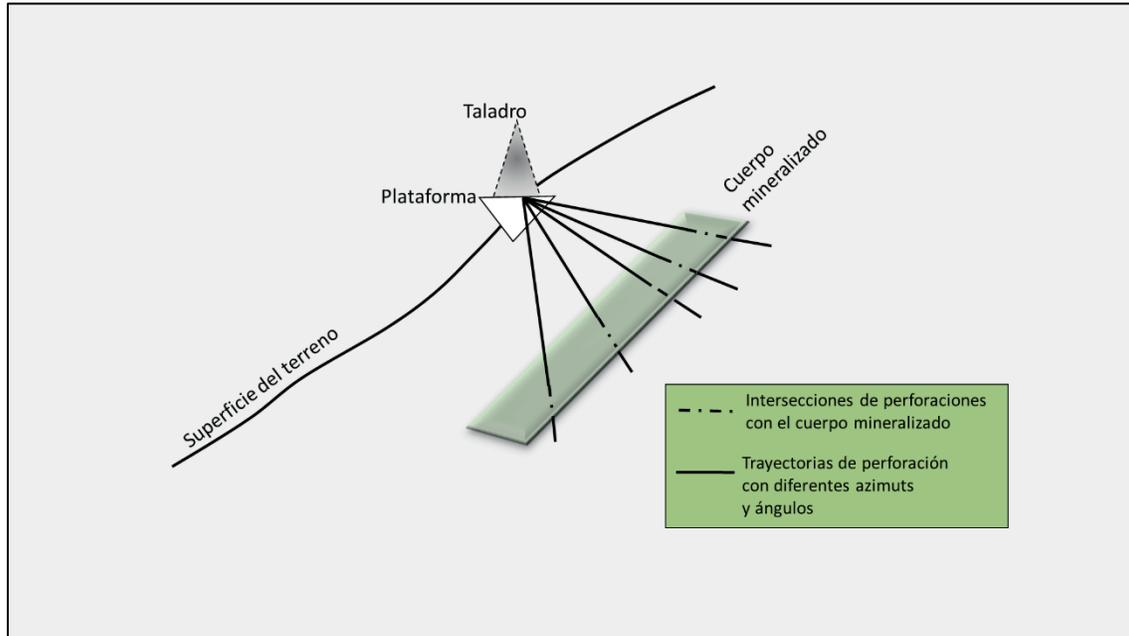


Figura 13: Esquema de corte con perforaciones con diferentes azimuts y ángulos, así generando diferentes intersecciones con el cuerpo mineralizado. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

La selección del diámetro de perforación es otro de los aspectos fundamentales en un programa de perforación. Los mayores diámetros requieren que la maquinaria tenga más potencia, por lo cual los taladros son más grandes y se necesitarán mayores áreas para poder hacer la operación. Adicionalmente, es más fácil perforar con menores diámetros, pero también se debe tener en cuenta que se obtiene una menor cantidad de muestra.

A continuación, se presentan los cuatro diámetros más utilizados en la perforación corazonada que permite la recuperación de núcleos.

Tabla 5: Diámetros de perforación utilizados en exploración de proyectos mineros. (Mod. Gandhi y Sarkar, 2016)

Referencia	Diámetro núcleo (mm – pulgadas)	Diámetro pozo (mm – pulgadas)
BQ	36.4 mm (1-7/16 in)	60 mm (2-3/8 in)
NQ	47.6 mm (1-7/8 in)	75.7 mm (3 in)
HQ	63.5 mm (2-1/2 in)	96 mm (3-3/8 in)
PQ	85 mm (3-3/8 in)	122.6 mm (4-7/8 in)

Por otra parte, el grupo de geología debe estar atento a las cajas con núcleos que van llegando desde la perforación al lugar de almacenamiento. Esto principalmente porque hay que realizar controles geológicos, geoquímicos y mineralógicos para identificar en qué parte de la perforación se está llegando (Figura 14). Estos controles permiten identificar si el objetivo fue hallado o no, y cuáles son sus características, además de brindar información para toma de decisiones como determinar finalizar un pozo si así se requiere.

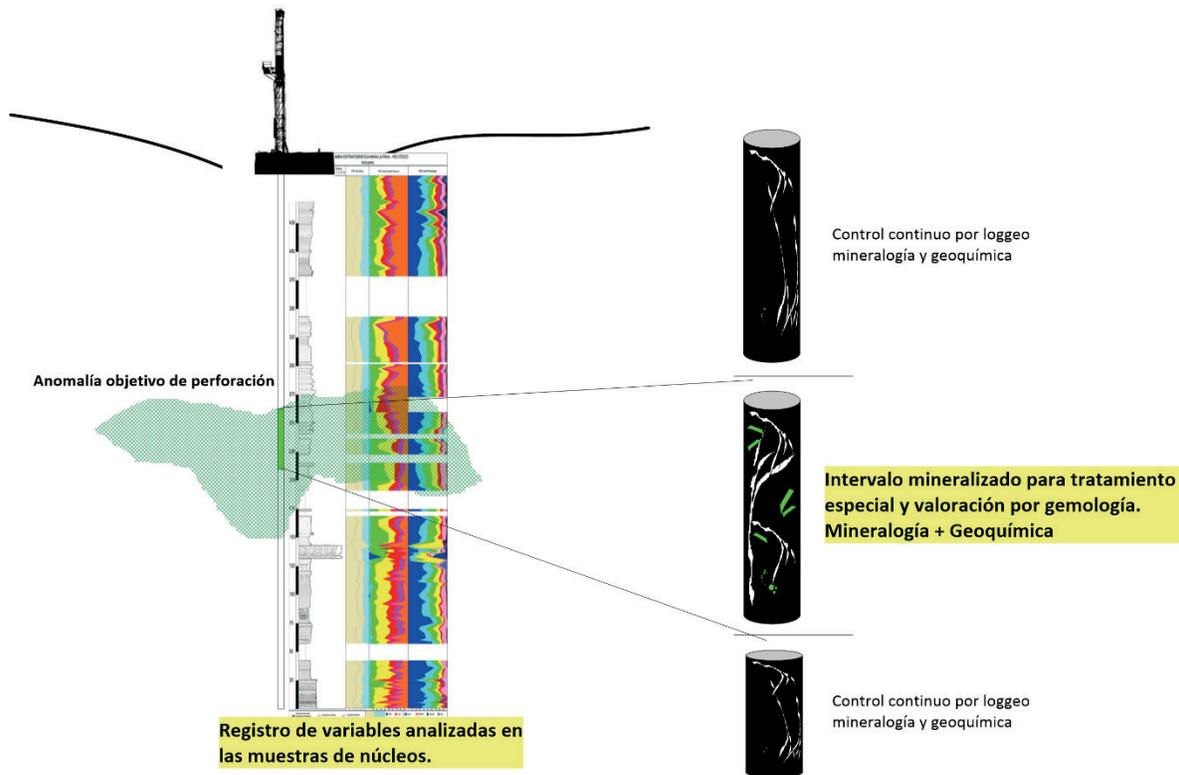


Figura 14: Controles de la anomalía objetivo a partir del loggeo en una zona de interés. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

### Control de presupuestos:

El presupuesto de perforación se establece a partir del número de metros a perforar, costos de las diligencias de permisos, vías de acceso de la maquinaria y la construcción de plataformas. Los presupuestos se desarrollan teniendo en cuenta las condiciones del mercado de la perforación, la facilidad de encontrar un proveedor confiable, los cronogramas y la movilización al área de trabajo.

Se recomienda tener una persona encargada de los controles presupuestales para evitar sobrecostos en la operación.

### Control de permisos:

Los permisos de perforación se dividen en permisos ambientales y servidumbres. Los permisos ambientales tienen en cuenta la afectación de las perforaciones, las remediaciones por plataformas y caminos, el uso de agua para utilizar los lodos y la disposición de los mismos. Es necesario consultar previamente los requerimientos de la autoridad ambiental correspondiente con respecto a la solicitud de estos permisos y los tiempos.

La servidumbre engloba los permisos de los propietarios de predios para realizar perforaciones y caminos. Es conveniente visitar los propietarios de predios con antelación y explicar los motivos de la perforación, buscando buenos acuerdos que faciliten realizar las tareas necesarias.

## Control de operación:

El control de la operación engloba la logística y los apoyos asociados a la perforación como:

- Determinar cuál es la mejor época para realizar estas tareas. En algunos casos las temporadas de lluvias dificultan el ingreso de la maquinaria o los derrumbes pueden impedir la llegada de los equipos a los sectores de interés.
- La elaboración de caminos, las instalaciones de acometidas eléctricas, el suministro de agua en caso de requerirse bombeo, y el montaje de tanques de almacenamiento requieren hacerse con antelación a la llegada de la maquinaria, de esta manera se evitan problemas de paro o *Standby* que da lugar a sobrecostos.
- Realizar las labores asociadas a seguridad y cuidado de la maquinaria y las muestras extraídas.
- Establecer una cadena de custodia, de tal manera que se pueda hacer un seguimiento de quién estuvo al cuidado de las muestras y cómo fueron sus entregas en los sitios indicados.
- Llevar un registro de la perforación y solicitar a los perforadores la bitácora de perforación, que incluye velocidades de perforación, metros avanzados por turno, operarios en el taladro y sus respectivos cargos, actividades realizadas y cajas de núcleos utilizadas.

## Errores comunes:

- Empezar una campaña de perforación sin tener en cuenta un modelo geológico conceptual previo.
- Tomar los datos de la boca del pozo con GPS de mano y no con un buen amarre topográfico.
- No dejar registro físico de la plataforma de perforación para una evaluación posterior.
- No realizar una planeación estratégica para realizar un programa de perforación.
- No evaluar otros escenarios en los procesos de perforación en caso de encontrar nuevas mineralizaciones o que la perforación no encuentre la zona mineralizada de interés.
- No verificar los ángulos de perforación.

## Más información:

CIM Estimation Best Practice Committee. (2008). Estimation of mineral resources & mineral reserves best practices guidelines. Revisado el 4 de Agosto, 2020 en <https://mrmr.cim.org/media/1069/rock-hosted-diamond-guidance.pdf>

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Chapter 8 Drilling. In Essentials of mineral exploration and evaluation (pp. 200-223). Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

Pitard, F. F., & Gy, P. M. (1989). Sampling correctness and sampling practice. Boca Raton, FL, FL: CRC Press.

The Southern African Institute of Mining and Metallurgic. (2019). SAMREC Guideline Document for the Reporting of Diamond Exploration Results, Diamond Resources and Diamond Reserves (and other Gemstones, where Relevant). Revisado el 4 de agosto, 2020 en <https://www.saimm.co.za/news/488-samcodes>

## 2.4. Recuperación de muestras

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### ***Descripción:***

La importancia de la recuperación de la muestra en una perforación para exploración de esmeraldas radica en que esta información será utilizada para la localización de los resultados en el subsuelo, las alteraciones alrededor de la zona mineralizada, la aparición de características de porosidad secundaria como vetillas o fallamiento entre otra información necesaria para el modelo geológico del yacimiento y la caracterización geotécnica del macizo rocoso.

Las muestras obtenidas por medio de perforación diamantina son piezas claves en el entendimiento del tipo de depósito y su geometría. Por tal motivo, se debe asegurar que el procedimiento de perforación permita la recuperación de las muestras en forma adecuada garantizando su posición en el subsuelo. Entre mayor sea el porcentaje de recuperación de muestras, más fiable será la información que respaldará el modelo geológico y la estimación de recursos. En caso de haber pérdidas del material, se debe tener en cuenta el sesgo de la muestra por ingreso o salida de material.

### ***Desarrollo:***

Para garantizar la recuperación y el manejo adecuado de las muestras de núcleos se recomienda tener un protocolo con la empresa perforista para determinar la ubicación de la muestra en profundidad y la marca del metraje en las cajas correspondientes.

El protocolo incluye el porcentaje de núcleo recuperado en cada corrida y el porcentaje de muestras que se miden en la cantidad de centímetros recuperados por cada corrida. Convencionalmente se utilizan corridas de tres metros con la respectiva recuperación de núcleo. Estas corridas van marcadas con el metraje correspondiente y ubicados en unas cajas para conservar las muestras de roca.

Es común que los primeros metros de perforación y las zonas falladas presenten mayor complejidad en la recuperación al ser materiales poco consolidados o fragmentados. Sin embargo, deben ser registrados correctamente para poder ser incluidos en el modelo geológico.

Todas las muestras recolectadas en el recuperador deben ir a cajas con la numeración correspondiente y las marcas físicas indicando la profundidad relativa. No se debe descartar ninguna

muestra así estén trituradas o húmedas ya que contienen información de interés que puede ser aprovechada en otras etapas del proyecto como geotecnia, hidrogeología y geología estructural.

En el caso de realizarse una perforación direccionada se debe tener en cuenta en dónde queda el tope de la muestra para poder luego utilizar la muestra en su posición real e identificar estructuras como fallas, vetas y estratificación en su posición real, apoyando el modelo geológico. Si la muestra no está orientada correctamente, aumenta la incertidumbre de las estructuras localizadas.

### Índices de recuperación de muestras

Una buena práctica es realizar un análisis de recuperación de muestra en cada corrida y en el total de metros de perforación. Este análisis se realiza obteniendo el porcentaje del metraje del material recuperado sobre la distancia de la corrida. También debe tenerse en cuenta que entre mayor el diámetro de la perforación, ésta será más costosa; así que la definición del diámetro debe ponderar la cantidad de muestra a extraer y el costo de su extracción.

En la siguiente tabla se encuentra una referencia de calidades de perforación teniendo en cuenta el porcentaje recuperado.

*Tabla 6: Calidades de la perforación a partir del porcentaje de recuperación de núcleo.  
Modificado de Gandhi y Sarkar, 2016.*

Calidad	Porcentaje de Recuperación
<b>Óptimo</b>	90 – 100%
<b>Bueno</b>	75 – 90%
<b>Regular</b>	50 – 75%
<b>Pobre</b>	25 – 50%
<b>Muy Pobre</b>	≤ 25%

Es importante tener en cuenta que el porcentaje de material recuperado está también asociado a los estratos y la competencia de la roca. Las condiciones del taladro, el tipo de broca y la experiencia del equipo de perforación son un aspecto que considerar para este tipo de operaciones con el fin de disminuir la posibilidad de ocurrencia de errores como excesivo lavado del material, exceso en la velocidad de la perforación, ajuste inadecuado de la maquinaria, excesiva vibración de la maquinaria, lodo de perforación mal calibrado acorde a las necesidades de la formación, exceso de presión en la inyección del lodo, valores de recuperación de la muestra por debajo de muestras representativas aceptables.

### Conservación de la muestra recuperada

Las muestras deben conservarse en cajas que tengan capacidad de aguantar la intemperie, resistir el peso de las muestras, que la tapa haga parte de la caja facilitando el transporte sin perder la integridad. Existen diferentes materiales para las cajas entre las que se encuentran el aluminio, la madera y el plástico de alta densidad. También es importante que las cajas no queden muy pesadas, porque dificultarán la movilización a la hora de hacer el *loggeo* o el corte.

Una buena práctica es que las cajas de núcleos estén marcadas tanto en la tapa como en los bordes de la misma. Es preferible que el rótulo contenga como mínimo: Nombre del proyecto, nombre del pozo, número de la caja, metro de inicio de la muestra, y el metro final. Se debe asegurar la cadena de custodia desde el sitio de perforación hasta la bodega de almacenamiento y desde la bodega hasta el laboratorio de análisis, así como el retorno de muestras y núcleos remanentes luego del análisis.

Una buena práctica es adecuar un sitio en donde se puedan almacenar las cajas y que sean fáciles de identificar con los rótulos laterales. Debe disponerse de estanterías en donde queden ubicadas las cajas y que puedan ser movilizadas fácilmente por el personal. Este sitio en donde se almacenan las cajas debe estar protegido de los factores meteorológicos como agua y sol. Adicionalmente la bodega de almacenamiento debe ser cerrada y que solo ingrese el personal autorizado. Contar con un inventario actualizado es indispensable para el control de las muestras almacenadas.

#### ***Errores comunes:***

- No llevar de manera adecuada la cadena de custodia de las muestras.
- Mala manipulación de las marcas físicas o tacos de medición de metraje.
- No disponer de la herramienta adecuada para la recuperación del testigo.

#### ***Más información:***

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Chapter 8 Drilling. In Essentials of mineral exploration and evaluation (pp. 200-223). Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

## **2.5. Cadena de custodia**

 Exploración

 Recursos

 Reserva

#### ***Descripción:***

La cadena de custodia de una muestra se define como el conjunto de procedimientos controlados que se aplica a las muestras recolectadas en un proyecto y que estén relacionadas con el objeto de la exploración. La cadena de custodia permite la trazabilidad de la muestra y el seguimiento por parte de peritos internos y externos de manera que no se genere pérdida de información a lo largo del manejo.

Contar con medidas adecuadas que garanticen de manera segura la identidad e integridad de las muestras y todos los procedimientos realizados a través de la documentación, permiten la correcta cadena de custodia de las muestras, testigos, rechazos, pulpas, preservación de gemas y cualquier otro tipo de muestra de interés para el proyecto.

## Desarrollo:

### Importancia de la cadena de custodia

La cadena de custodia permite garantizar cada uno de los procesos a los cuales se someten las muestras desde su recolección hasta el dato que representan después de los análisis en el modelo geológico. La confianza en el resultado lo es todo en un proyecto minero, por lo tanto la cadena de custodia cuenta con los procedimientos que aseguren este valor.

### Principios de la cadena de custodia

La cadena de custodia inicia al momento de la toma de la muestra y se rige por tres principios básicos.

- **Control** de todas las etapas desde la recolección de la muestra hasta su destino final, análisis realizados y responsables de la custodia de los mismos.
- **Preservación** de las muestras testigos, resultados de análisis y observaciones de manera que se garantice su inalterabilidad evitando daño, mala manipulación e incluso confusiones.
- **Seguridad** de las muestras basadas en el manejo adecuado, almacenamiento y custodia.

*Tabla 7: Etapas y procedimientos de la cadena de custodia. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.*

Etapa	Procedimiento
Extracción y recolección de la muestra	<p>Reportar la cantidad y relación de las muestras a salir del proyecto minero hacia el laboratorio, esta actividad debe quedar registrada y reportada al conductor encargado del transporte de muestras.</p> <p>Una buena práctica es utilizar etiquetas preimpresas con códigos de barras para facilitar su identificación. En caso de no ser posible, cada muestra debe estar debidamente identificada con la ficha de muestreo y el código asignado, preferiblemente.</p> <p>En el caso de muestras de perforación el procedimiento será idéntico salvo que el responsable será el encargado de muestreo en el taladro. Las muestras de núcleos son cortadas por la mitad, a lo largo del núcleo de tal manera que la geología quede representada de igual manera en ambas muestras, por ejemplo, si hay una veta predominante, el corte debe realizarse perpendicular a la misma.</p>
Preservación y empaque	El personal encargado del muestreo siguiendo los parámetros del profesional de QA/QC debe ingresar a los lotes de muestras los paquetes de muestras blancos, duplicados y estándares, para ello se recomienda el uso de saltos en la numeración de los lotes de

	<p>manera que permita el ingreso de las muestras de control. Una opción es generar números aleatorios para las muestras.</p> <p>El uso de códigos de barras suele ser una excelente herramienta para evitar confusiones o errores humanos, además de agilizar el proceso de asignación y marcado de las bolsas dirigidas a laboratorio o al lugar de almacenamiento.</p> <p>Las muestras deben estar empacadas en doble bolsa plástica, con la identificación en la parte interna y externa, así como el uso de un sello plástico para evitar pérdida o manipulación fraudulenta de las muestras.</p>
Transporte y traslado de muestras	<p>Contar con servicio de transporte responsable y de confianza que garantice la seguridad e integridad de la muestra.</p> <p>Diligenciar los formatos de entrega y recibo de muestras. Este procedimiento se realiza con representantes del grupo de geología y del laboratorio, para asegurar la entrega y recibo de todas las muestras.</p>
Envío de muestras a laboratorios internos y/o externos	<p>Se recomienda el uso de formatos para envío de muestras al laboratorio. Estos formatos deben ser validados por el profesional de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) y firmado por el jefe de geología.</p> <p>El llenado del formato de envío es crítico, ya que es donde más se suelen cometer errores. Este debe contener la relación de muestras y análisis a realizar, en muchos casos los laboratorios cuentan con sus propios formatos.</p> <p>El laboratorio deberá verificar las muestras relacionadas en el formato con las que le son entregadas para los análisis, hecha esta verificación deberán emitir un recibo así como el estado en el que le son entregadas las muestras. Adicionalmente se puede hacer un seguimiento a las guías de la empresa de mensajería utilizada para el envío de las muestras al laboratorio externo.</p>
Custodia y preservación de testigos y pulpas	<p>Por último, después de preparación y análisis se deberán recoger las pulpas y los rechazos para el respectivo almacenaje verificando los códigos y estados de las muestras.</p>

### Elementos básicos de la cadena de custodia

La selección de los elementos que incluyen la cadena de custodia estará a discreción del protocolo de trazabilidad del equipo de exploración o de la empresa. Sin embargo, algunos elementos son

considerados indispensables al momento de diligenciar la cadena de custodia, dentro de estos están:

- Identificación física de la muestra.
- Fecha de muestreo.
- Documentación y registros de control.
- Ubicación de la muestra.
- Tipos de análisis practicados.
- Fecha de recepción y análisis por parte del laboratorio.
- Estado de las muestras.
- Firmas de responsables de la empresa y el laboratorio.

Nombre de la empresa, logo, dirección y demás datos que se deban incluir		
<b>CADENA DE CUSTODIA</b>		
Lote No	Saco No	Sello de seguridad del saco
<b>22</b>	<b>3</b>	<b>EP000100</b>
Relación de muestras		Total muestras
<b>APA1282, APA1283, APA1284, APA1285, APA1286, APA1287,                  APA1288, APA1289, APA1290, APA1291</b>		<b>10</b>
Fecha empacado	Nombre Empacador	
Firma empacador		
Fecha despacho	Nombre Despachador	
Firma despachador		
Fecha transporte	Nombre Transportador	
Firma transportador		
Fecha recibido Lab	Nombre de quien recibe en laboratorio	
Firma de quien recibe en laboratorio		
Observaciones:	Sello del laboratorio	

Figura 15: Ejemplo de formato de cadena de custodia para envío de muestras a laboratorio.

**Errores comunes:**

- Diligenciar de manera incompleta los formatos de muestreo.
- La no verificación de los códigos asignados a las muestras puede generar duplicados no deseados.
- Realizar envíos sin la aprobación de los supervisores o responsables de cada proceso.

### **Más información:**

Ver capítulo 4.1 Seguridad de la información

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Essentials of mineral exploration and evaluation. Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>

## **2.6. Preparación y tratamiento de las submuestras o incrementos**

Exploración

Recursos

Reserva

### **Descripción:**

En las labores de muestreo se denomina **submuestra o incremento** a las fracciones que conforman una muestra compuesta. Este tipo de muestreo se puede realizar en cualquiera de las etapas del proyecto y puede ejecutarse de manera voluntaria con el fin de homogenizar información o de manera involuntaria cuando la naturaleza de la roca obliga a constituir una sola muestra a partir de submuestras buscando la representatividad. En cualquiera de los casos es importante especificar el tipo de procedimiento realizado, el equipo utilizado y el estado original de la muestra, por ejemplo: húmedo o seco.

### **Desarrollo:**

La toma de las submuestras puede llevarse a cabo de distintas formas y con intereses diferentes. Para el caso de la prospección de esmeraldas, el muestreo de canal (Capítulo 2.2) suele ser usado debido a la necesidad de homogenizar intervalos muy pequeños de estratos de lodolitas poco diferenciables y así optimizar cambios tan sutiles en la geoquímica y la mineralogía de las rocas que el nivel de detalle al que se puede llegar podría ser excesivamente costoso. En otros casos, se suelen encontrar paquetes métricos de composición similar que permiten la toma de una sola muestra representativa y recolectar muestras compuestas no es necesario.

Otra aplicación de las submuestras puede darse en las operaciones de la mina, donde el resultado de una voladura de avance genera grandes cantidades de roca desprendida siendo representativas y de importancia para los ajustes a los modelos geológicos. Al estar mezcladas producto de la explosión, se requiere la selección de fragmentos que pueden superar la cantidad de muestra recolectada normalmente, para ello se deberá mezclar, dividir y cuartear la muestra para obtener una fracción final para envío a laboratorio (Figura 16).

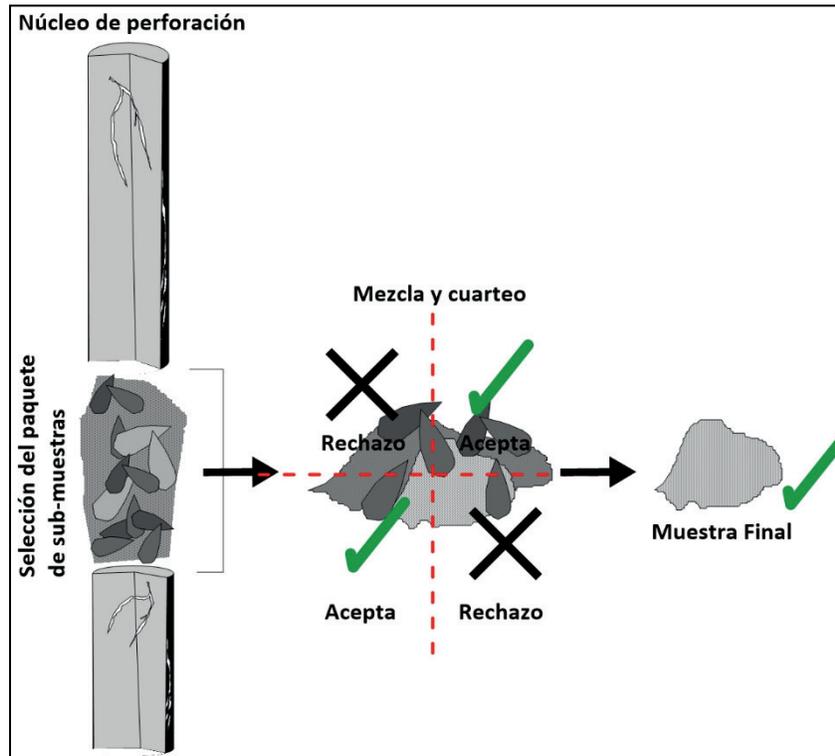


Figura 16: Ejemplo de toma de muestra por incremento o submuestras y selección mediante cuarteo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Adoptar procedimientos adecuados y llevar el registro de los mismos ayuda a maximizar la representatividad de las submuestras y así mismo la veracidad de los resultados a obtener.

**Errores comunes:**

- Seleccionar los incrementos de una misma zona.
- No homogenizar la muestra.
- No documentar el método utilizado para la toma de la muestra y las condiciones originales de la misma.

**Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Essentials of mineral exploration and evaluation. Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>

## 2.7. Mapeo de sondaje, *loggeo* geológico

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### ***Descripción:***

Parte de la información geológica básica se obtiene del mapeo de las perforaciones o sondajes, esta consiste en datos geográficos a los cuales se asocian datos relativos a distintos temas. El proceso de levantamiento de esta información ha sido tradicionalmente manual, dibujando las características reconocidas y anotando sus atributos en formatos diseñados para ello.

El objetivo del mapeo en la etapa de exploración es la construcción de un modelo geológico que incluya las características, distribución espacial y las relaciones temporales de los distintos eventos que controlan la mineralización de interés. El mapeo geológico debe ser realizado sobre bases científicas y sus observaciones registradas mediante una metodología estándar, de manera que esta información pueda ser de calidad, comparable y reproducible.

El mapeo de los sondajes describe la litología, mineralización y demás características geológicas, además permite conocer desde etapas tempranas datos importantes de geotecnia que se tendrán en cuenta más adelante para la elaboración de la mina, este mapeo se realiza en un formato establecido por cada compañía usando códigos numéricos o abreviaciones para la litología, alteración y la mineralización, parámetros geomecánicos, entre otras medidas. El formato de loggeo ya sea realizado en hojas de papel o de manera digital tendrá que contener la mayor información posible y ser adecuado para el tipo de perforación realizada.

### ***Desarrollo:***

Las muestras que se obtienen de las perforaciones son denominadas “testigos” o “núcleos”, de diámetro variado según la línea de tubería de perforación utilizada: Línea BQ (36,5 mm), línea NQ (47,6 mm) y línea HQ (63,5 mm). Es de gran importancia lavar los núcleos y tomarles fotos a las cajas antes de ser cortados. Luego de extraídos los núcleos, son puestos en cajas de plástico, identificadas con el nombre del proyecto, número del sondaje (perforación), ubicación, intervalo de perforación de la muestra y fecha.

En campo se sugiere hacer un registro rápido con la siguiente información:

### **Datos básicos de la perforación:**

Proyecto, nombre, localización, número de perforación, coordenadas, orientación contratista y supervisor.

### **Métodos de perforación:**

Máquina, tipo de perforación, diámetro, tipo de lodos si se emplean y características técnicas relevantes.

### **Progreso de la perforación:**

Maniobras, metros avanzados, velocidad a la que se está perforando, resistencia al avance, perdidas, recuperación filtración de fluidos, niveles freáticos ensayos realizados entre otros que se consideren necesarios y que deben ser registrados. Todos estos datos deben quedar registrados en documentos que más adelante puedan ser verificables o consultables por cualquier empresa o persona.

### **Loggeo geológico**

Normalmente, antes de hacer el corte de los núcleos, se realiza el *loggeo* geológico. Para este procedimiento se sugiere:

- Describir los tipos de roca encontrados.
- Dibujar la columna estratigráfica con cada cambio de litología, prestando atención a variaciones de tamaño de grano, estructuras sedimentarias y demás características que puedan documentarse.
- Describir las alteraciones y la mineralización. Los detalles para realizar este *loggeo* dependen de los parámetros internos de cada empresa o grupo de trabajo encargado en esta fase.

Detalles relevantes para incorporar en el *loggeo*:

- Litología: definir los tipos de roca.
- Tipo de mineralización: veta, *stockwork*, vetillas, relleno de brecha, diseminado, masiva, entre otras.
- Densidad/espaciamiento: vetas y/o vetillas.
- Definir secuencias de mineralización.
- Tipo de contacto mineral.
- Texturas.
- Mineralogía: aquí se sugiere registrar todos los minerales que puedan definirse por observación con lupa de mano, en lo posible diferenciar primarios de secundarios y de alteración.
- La información del *loggeo* debe usarse para retroalimentar el protocolo de muestreo, para definir las mallas de perforación o separación y tamaño de canales de muestreo.
- Alteración hidrotermal: tipo, estilo, intensidad, alteración y grado de meteorización.
- Otro parámetro muy importante que se obtiene en la etapa del *loggeo* es la toma de muestras para densidad con las cuales se determina el tonelaje en la estimación de recursos.

### **Loggeo geotécnico:**

Se realiza para entender la naturaleza del cuerpo rocoso y clasificarlo para un posterior análisis de estabilidad, es un aspecto crítico en cualquier estudio minero, ya que de él depende la selección del método de minado y los requerimientos de soporte, definiendo las condiciones geotécnicas en cada tramo de la perforación.

Este loggeo tiene como temas fundamentales:

- La recuperación: indica la calidad del terreno y la competencia de la roca, es cuantificada de 0 a 100 en %.
- RQD- *Rock Quality Designation*: este factor es definido por Deere, 1989." Longitud total de los trozos de núcleo no meteorizados mayores o iguales a 10 cm, expresada como un porcentaje".
- Numero de fracturas (frecuencia entre diaclasas): es el número de diaclasas en cada corrida, estas pueden estar mineralizadas o no.
- Condición de las fracturas *Joint condition*: cuantifica la textura de las superficies de las fracturas o diaclasas. Esto indica la fuerza de la roca.
- Grado de fracturamiento: aquí se definen las fracturas tanto naturales como artificiales.
- Grado de meteorización/ alteración: es una evaluación cualitativa y relativa de los efectos de la meteorización y la alteración sobre la competencia de la roca.
- Dureza: corresponde a una medida de la resistencia física de la roca mediante métodos sencillos como golpes del martillo, rayador, punzón y navaja. El valor más bajo corresponderá a una roca extremadamente débil.

El *loggeo* geotécnico se realiza para obtener la clasificación geomecánica de Bieniawski o clasificación *RMR (Rock Mass Ratio)* la cual fue desarrollada en 1973, actualizada en 1979 y 1989, el sistema consiste en una metodología de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo rocoso, criterios de excavación y sostenimiento.

Una buena práctica es el uso de tablas explicativas las cuales dan valor a cada propiedad que se debe evaluar y será criterio de cada empresa buscar los manuales de *loggeo* más adecuados para ser implementados en la campaña.

Los datos obtenidos del *loggeo* bien sea geológico o geotécnico deben ser registrados en una base de datos que servirá para realizar los diferentes modelos en 3D, mapas y secciones utilizados para el conocimiento en profundidad del proyecto, el modelamiento del depósito y los procesos de estimación.

La información adquirida en los sondeos es fundamental en el desarrollo del proyecto, por tal motivo es una buena práctica la estandarización de los procesos para poder utilizar la información extraída de la perforación. Entre los procesos a estandarizar se encuentra realizar trabajos topográficos que permitan una precisa ubicación espacial de las bocas o collar de pozo y sus direcciones, realizar procesos digitales que permitan el evitar errores o pérdidas de información como ocurre cuando se preserva la información en formato análogo y realizar la actualización de las bases de datos.

### **Errores comunes:**

- No georreferenciar la información.
- No validar la información a registrar en los formatos de *loggeo* de acuerdo con las características del proyecto.
- Iniciar perforaciones sin tener claro el objetivo a perforar y no contar con personal de *loggeo*.

### **Más información:**

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 6(4): 189-236, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496>

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Marjoribanks, R. (2010). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* (2nd ed.). Springer.

Rakmon, J. (2019, February 3). •Norma ASTM D2113-14 Práctica estándar para la perforación del núcleo de roca y el muestreo de roca para la exploración del sitio. Revisado el 1 de agosto, 2020 en <https://Es.Scribd.Com/Document/398825352/333439858-Norma-D2113-14-Pdf>

## **2.8. Métodos analíticos**

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### **Descripción:**

En la actualidad existe un sin número de métodos analíticos en torno a las geociencias. Sin embargo, las aplicaciones en exploración de minerales y en especial de piedras preciosas como las esmeraldas sugieren un reto dadas las particularidades de este tipo de yacimientos. Las distintas técnicas analíticas pueden ser agrupadas en mineralógicas y geoquímicas, cada una con sus puntos a favor y en contra al momento de programar campañas de exploración.

Una buena práctica es que los métodos analíticos a utilizar deben ser considerados y planeados por el profesional líder del equipo de exploración de acuerdo con las características específicas de cada yacimiento.

## **Desarrollo:**

### **Geoquímica**

Como su nombre lo indica, la geoquímica es el estudio de los elementos químicos constitutivos de las rocas, al entender el comportamiento de la química de la roca se pueden definir características especiales que ayudan a la identificación de prospectos y nuevos yacimientos. En las esmeraldas colombianas se han realizado numerosos estudios que han ayudado a definir ciertos patrones que se asocian a las mineralizaciones. Los procesos de alteración hidrotermal llevan a la aparición de nuevos minerales y precipitación de nuevos elementos o la concentración de elementos preexistentes como Na, K, Ca, Cr, V y elementos de tierras raras o *REE (Rare Earth Elements por sus siglas en inglés)*.

Al momento de realizar análisis geoquímicos existe un amplio portafolio de técnicas. Sin embargo, asociado a las campañas de exploración la relación costo/beneficio suele ser un criterio importante para tomar decisiones. El costo está en función de la capacidad de la empresa de exploración en donde la optimización de los recursos es una prioridad. De esta manera, se seleccionará la técnica que ofrezca mejor resolución al menor precio.

Dentro de las técnicas analíticas más utilizadas en las caracterizaciones geoquímicas están:

#### **Fluorescencia de rayos X (XRF)**

El análisis químico elemental por Fluorescencia de rayos X es una técnica ampliamente extendida en la exploración minera, permite realizar análisis de muestras de manera no destructiva, con rapidez y eficiencia, además necesita poca cantidad de material, lo cual es un punto a favor al momento de realizar varios análisis a una misma muestra.

Los resultados son presentados en rangos de porcentaje (%) normalizados al 100% o partes por millón (ppm), a manera de óxidos o elementos, dependiendo del laboratorio, se ofertan paquetes analíticos que van desde 12 hasta 40 elementos, la importancia del equipo técnico de exploración al momento de seleccionar estos paquetes repercute en los resultados y por supuesto en los costos asociados al desarrollo del proyecto.

#### **Ventajas**

- Poca cantidad de muestra (algunas decenas de gramos).
- Manejo de diversos tipos de preparación de muestra para analizar en el equipo: polvos, pastillas, perlas, roca.
- Rapidez.
- Amplio rango de medida.
- Bajo costo analítico.
- Se pueden implementar técnicas portátiles o semi-portátiles calibradas a un proyecto en particular con un costo razonable.

#### **Desventajas**

- Baja o nula resolución en elementos ligeros como el Na, F, Li y Be.

- La sensibilidad de la técnica es de ppm dificultando la identificación de anomalías en elementos traza.
- Requiere la implementación de curvas de calibración elemental para equipos propios.

### **Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICPMS)**

El ICPMS es una técnica analítica de alta sensibilidad de tipo inorgánico capaz de identificar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica así como varios de sus isótopos en un rango de hasta 6 órdenes de magnitud manejando límites de detección de partes por billón o ppb.

Al igual que otras técnicas, el rango de elementos está en función del paquete analítico ofrecido por el laboratorio, los más completos en análisis de roca total están alrededor los 50 elementos.

Los montajes de las muestras suelen ser líquidas lo que lleva a una preparación exhaustiva donde la digestión de la muestra se realiza mediante la utilización de ácidos, es importante conocer estos métodos utilizados por lo laboratorio ya que pueden llevar a la pérdida por disolución de algunos elementos de interés particular.

#### **Ventajas**

- Poca cantidad de muestra (algunas decenas de gramos).
- Bajos límites de detección y amplio rango analítico.
- Relativo bajo costo dependiendo del paquete ofrecido por el laboratorio.

#### **Desventajas**

- Compleja preparación de las muestras.
- Altos costos de los equipos lo que dificulta la implementación de laboratorios propios.
- Complejidad en la calibración de equipos si se considera implementar un laboratorio propio.

### **Mineralogía**

La mineralogía puede llegar a ser unas de las disciplinas más antiguas en torno al estudio de las ciencias de la tierra, identificar con precisión los minerales constituyentes de las rocas y su relación con las mineralizaciones de esmeraldas puede llegar a ser el factor determinante al momento de identificar un yacimiento. En la actualidad existen varios estudios realizados en los cinturones esmeraldíferos que soportan la existencia de asociaciones minerales relacionadas con la presencia de esmeraldas. Por lo anterior, el uso de técnicas apropiadas es indispensable en la caracterización de los depósitos y aquí se describen algunas de interés.

#### **Petrografía**

Los análisis petrográficos de secciones delgadas de roca se encuentran dentro de las técnicas primarias de caracterización mineralógica. Se basan en la preparación de un corte de roca de 0.03 mm de espesor para la identificación y cuantificación de minerales basados en las propiedades ópticas de los mismos.

La petrografía en la exploración de esmeraldas suele contar con limitaciones inherentes a las rocas, debido al alto contenido de materia orgánica y al tamaño de grano predominantemente entre limos y arcillas (0.002 a 0.063 mm) las propiedades ópticas se limitan a las partículas y microestructuras de mayor tamaño como las venillas. La materia orgánica dificulta el paso de la luz y hace prácticamente imposible una clara identificación de los rasgos de la roca (Figura 17).

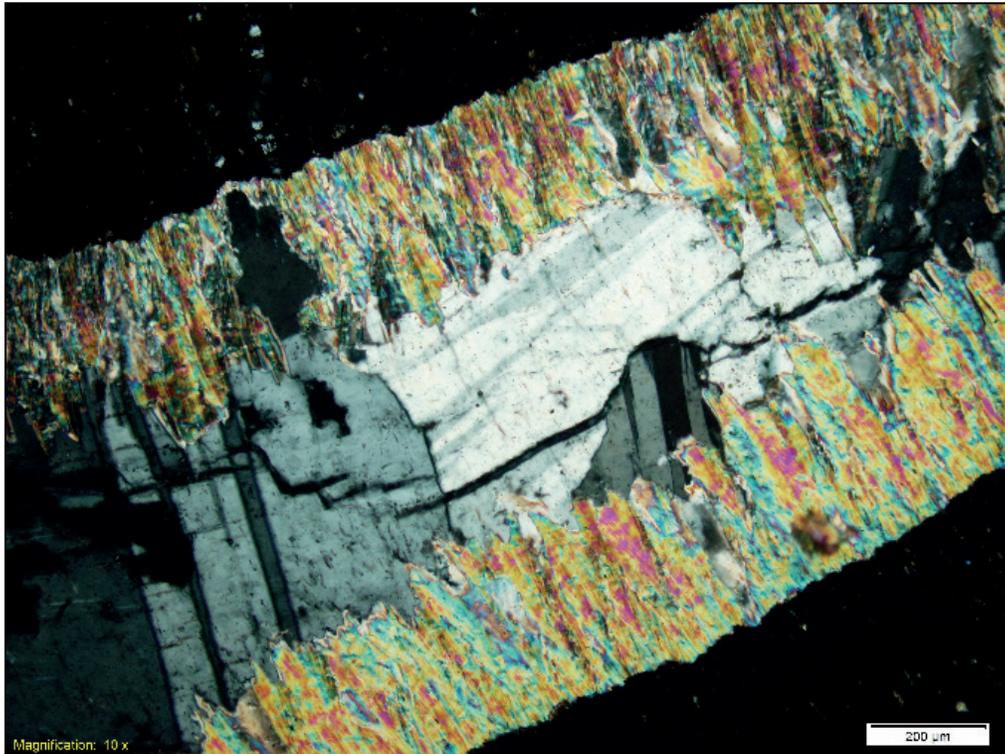


Figura 17: Microfotografía de una venilla de plagioclasa (gris-blanco) con mica muscovita (amarillo) rodeada de lodolita carbonosa (negro) dificultando la identificación en estas áreas. Imagen en polarización cruzada, 10X. Muestra del sector de Quipama. Cortesía: CDTEC.

Una buena práctica es elaborar secciones delgadas - pulidas de roca, el NO uso de cubreobjetos, permite que las placas estén habilitadas para el uso de técnicas adicionales de ser requeridas, tales como microscopía Raman, análisis por Catodoluminiscencia (CL), microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X en sección delgada, fluorescencia de rayos X en sección delgada entre muchas otras posibilidades.

### Microscopía por Espectroscopía Raman

Acoplada a un microscopio, la espectroscopía Raman permite estudiar los minerales presentes en las rocas a través de las secciones delgadas, de tal manera que la interacción entre un haz de luz láser en distintos rangos (visible, infrarrojo cercano y ultravioleta cercano) con los fotones de los minerales genere una respuesta característica que puede ser confirmada con la ayuda de un software alimentado por una base de datos y de esta manera identificar o confirmar minerales (Figura 18).

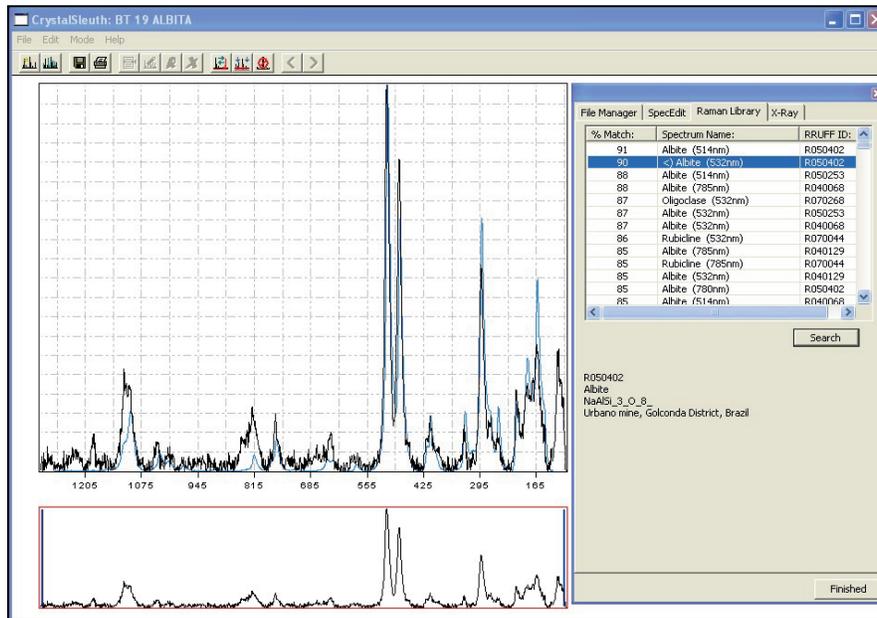


Figura 18: Espectro Raman de un mineral de albita. Cortesía CDTEC.

### Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X es una técnica analítica que permite la identificación de los minerales presentes en las muestras basados en la interacción de los rayos X con las estructuras cristalinas de cada mineral. Por más de 70 años, el XRD (*X Ray Diffraction*) ha permitido el análisis de muestras de suelos, rocas y minerales sin importar el tamaño de partícula logrando rangos de cuantificación del orden del 0.5% en peso. Este tipo de análisis ha sido implementado con éxito en los cinturones esmeraldíferos permitiendo la identificación de asociaciones minerales como illita – paragonita, albita – calcita – dolomita, parisita y otros minerales presentes que no llegan a identificarse a simple vista incluyendo berilos que por análisis de microscopía electrónica de barrido pueden estar en el rango de las 10 micras (Figura 19).

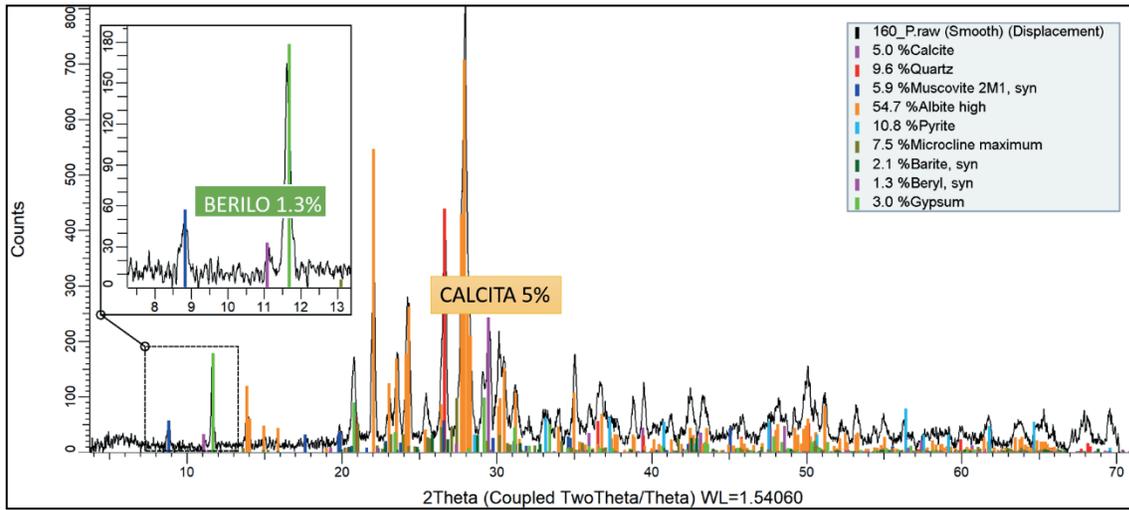


Figura 19: Difractograma de rayos X donde se muestra la identificación y cuantificación de minerales por peso. Cortesía CDTEC.

Al tener un amplio rango de medida, la difracción de rayos X se considera una excelente herramienta en la exploración de esmeraldas dado el alcance de la técnica y la posibilidad de trabajar con muestras de manera sistemática y a un costo razonable.

#### Aplicación combinada durante la perforación

Un ejercicio común en las labores exploratorias consiste en el uso de herramientas y análisis de manera sistemática acompañando la perforación. La implementación de técnica como la mineralogía por XRD y la geoquímica por XRF o ICPMS u otras técnicas equivalentes permite la correlación de los datos de laboratorio con la información adquirida durante el *loggeo*, facilitando el entendimiento de la evolución de los datos en un entorno de tres dimensiones.

El Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana cuenta con una propuesta metodológica en la que direcciona los análisis de perforación al control mineralógico y geoquímico (XRD + XRF) en unidades donde el *loggeo* no precisa la aparición de esmeraldas y/o mineralizaciones de interés. Adicionalmente, propone un aislamiento con digitalización del núcleo y un tratamiento especial mediante caracterización de esmeraldas, determinación de calidad y una valoración primaria mediante análisis gemológico para el caso de intervalo con mineralizaciones evidentes, permitiendo llevar un registro validado de las piedras preciosas recuperadas (Figura 20).

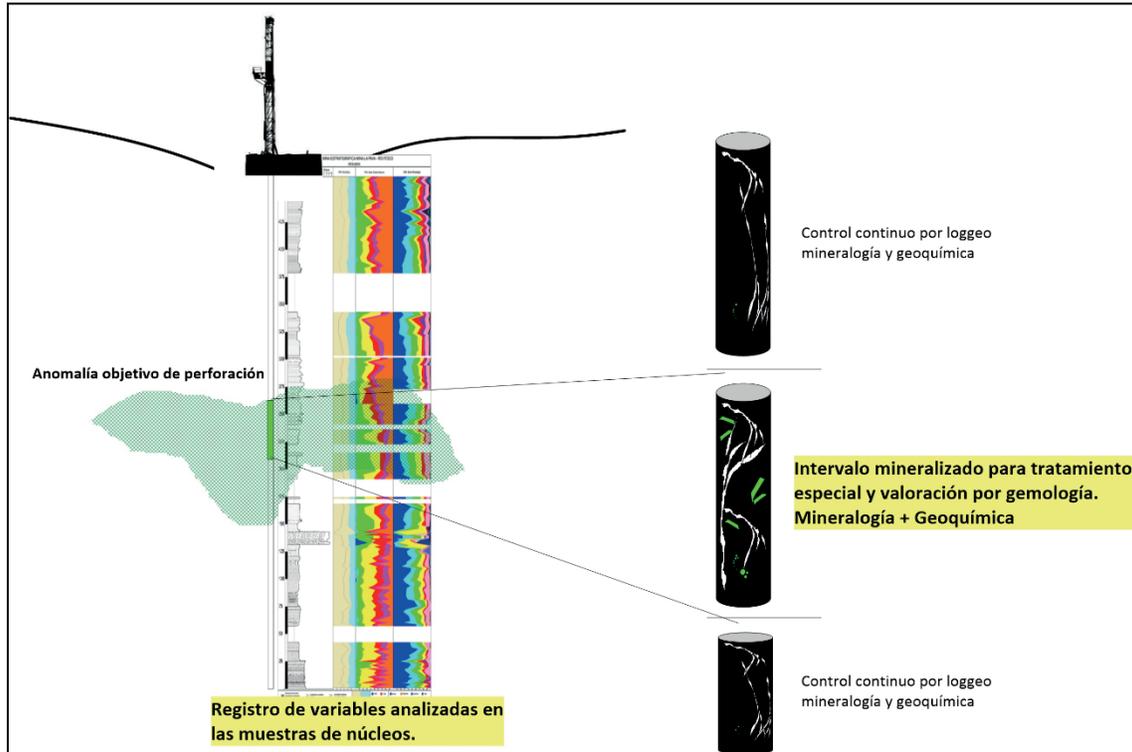


Figura 20: Propuesta para el análisis de control y el análisis especializado en zonas con mineralizaciones evidentes en muestras de núcleos de perforación. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

### Errores comunes:

- Seleccionar una sola técnica analítica sin base geológica preliminar.
- Trabajar una técnica de manera masiva sin llevar a cabo procedimientos de aseguramiento y control de calidad.

### Más información:

Bustillo Revuelta, M. (2018). *Mineral Processing*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>

Laboratorio del CDTEC [www.gemlabcdtec.com](http://www.gemlabcdtec.com)

## 2.9. Calidad de los datos y pruebas de laboratorio

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

### **Descripción:**

La declaración de la naturaleza y calidad de los datos de laboratorio debe estar relacionada de manera directa con los tipos de análisis realizados. Presentar de manera adecuada los resultados en exploración de esmeraldas sugiere un reto para el sector dadas las condiciones bimodales de los análisis (químicos y mineralógicos).

El manejo y presentación de los resultados puede depender tanto de procedimientos internos (laboratorios propios) como de procedimientos externos (laboratorios externos a la operación). En ambos casos, se recomienda la especificación de los procedimientos desde la preparación de las muestras hasta los estándares, acreditaciones y certificaciones que haya a lugar.

Los niveles de rigurosidad de estos controles irán aumentando a medida que el proyecto avance, de manera que la reducción del error a partir de duplicados de muestras, uso de muestras blanco y estándares aumentará al momento de entrar en etapas de estimación de recursos y por supuesto de reservas.

### **Desarrollo:**

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

También conocido por sus siglas en inglés como **QA/QC** (*Quality Assurance/Quality Control*), corresponde a protocolos establecidos entorno a los procedimientos involucrados en muestreo, análisis y almacenamiento de datos en las operaciones mineras que buscan garantizar la veracidad de la información recolectada. El Aseguramiento de la Calidad comprende aquellas acciones enfocadas a incrementar el nivel de confianza de un programa de exploración. De igual manera, el Control de la Calidad engloba los procedimientos que permiten monitorear la eficiencia de los procesos de Aseguramiento de calidad.

El programa de QA/QC no debe hacerse solo en el laboratorio, debe comenzar desde el grupo de geología donde se preparan las muestras de control de calidad que se insertan junto con las muestras normales que van al laboratorio. Adicionalmente, el laboratorio debe tener su propio QA/QC independiente.

La práctica más conveniente es tener una persona responsable del QA/QC de toda la empresa, el cual coordinará el trabajo de responsables de QA/QC en Geología, Mina, Planta y Laboratorios (Interno y Externos) y que preparará reportes mensuales sobre el cumplimiento con los protocolos de QA/QC de la empresa y acciones correctivas tomadas en caso de desviaciones.

Una manera de materializar el aseguramiento de la calidad es en la implementación de protocolos de trabajo orientados a minimizar errores aleatorios.

Otro principio para tener en cuenta es que estos procedimientos de aseguramiento y control se pueden realizar por laboratorios internos y externos a las empresas, garantizando la confiabilidad de los datos obtenidos. Así, se pueden establecer garantías para laboratorios acreditados y no acreditados.

El procedimiento de aseguramiento y control incluyen la utilización de muestras blancos, estándares y duplicados. Una recomendación en la que muchos autores y consultores concuerdan es en que al menos el 20% de la totalidad de las muestras sean de control mediante el uso de blanco, estándares y duplicados.

**Muestras blancos:** Se trata de muestras que garantizan la ausencia en su totalidad o muy cercana a ella de un elemento o mineral de interés, brindando la posibilidad de realizar un control a los laboratorios sobre la integridad de los procesos y que no se esté presentando algún tipo de contaminación. En la exploración de esmeraldas la selección de blancos puede llegar a ser compleja debido al amplio rango elemental y mineral que se ha encontrado en los dos cinturones esmeraldíferos del país. Por ello, es importante contar con el criterio adecuado del líder de exploración al momento de definir los elementos y minerales prospectivos y así seleccionar las muestras estériles de control.

**Muestras estándar:** Corresponden a muestras de referencia con valores de elementos y/o minerales conocidos facilitando el control de los resultados de laboratorio en un amplio rango analítico y con límites de detección variable evaluando la exactitud analítica. Este tipo de muestras pueden ser compradas o preparadas de manera exclusiva para el proyecto.

**Muestras duplicados internos:** Consiste en dividir una muestra seleccionada al azar y rotulada de manera diferente de tal manera que se garantice la precisión analítica del laboratorio independiente del método que se esté utilizando. El uso de duplicados gruesos o finos se realizará según la fase del proceso de preparación y el análisis que se requiera verificar.

**Muestras duplicados externos:** Son muestras ordinarias reanalizadas en un laboratorio secundario, útiles para evaluar la exactitud analítica del laboratorio primario complementando la evaluación con estándares. Es una buena práctica enviar entre un 10-15% de las muestras en duplicados a un laboratorio certificado.

## Exactitud y precisión

**Exactitud.** Todo procedimiento de análisis se basa en estos dos principios, donde la **Exactitud** se enfoca en la veracidad del resultado obtenido por el método de análisis realizado. Aunque es prácticamente imposible obtener un valor 100% real sobre alguna medida, es posible apoyarse en estándares basados en condiciones controladas y establecer el mejor valor para cada elemento y/o mineral en particular.

**Precisión.** Consiste en la habilidad para reproducir los mismos resultados en condiciones similares. De esta manera, el uso de muestras duplicadas o gemelas posibilita la evaluación exigiendo que los resultados sean lo más cercanos posibles. Es importante que las muestras gemelas sean tratadas en condiciones similares desde el muestreo, transporte y procedimientos analíticos.

En la Figura 21 se aprecia gráficamente los conceptos de exactitud y precisión.

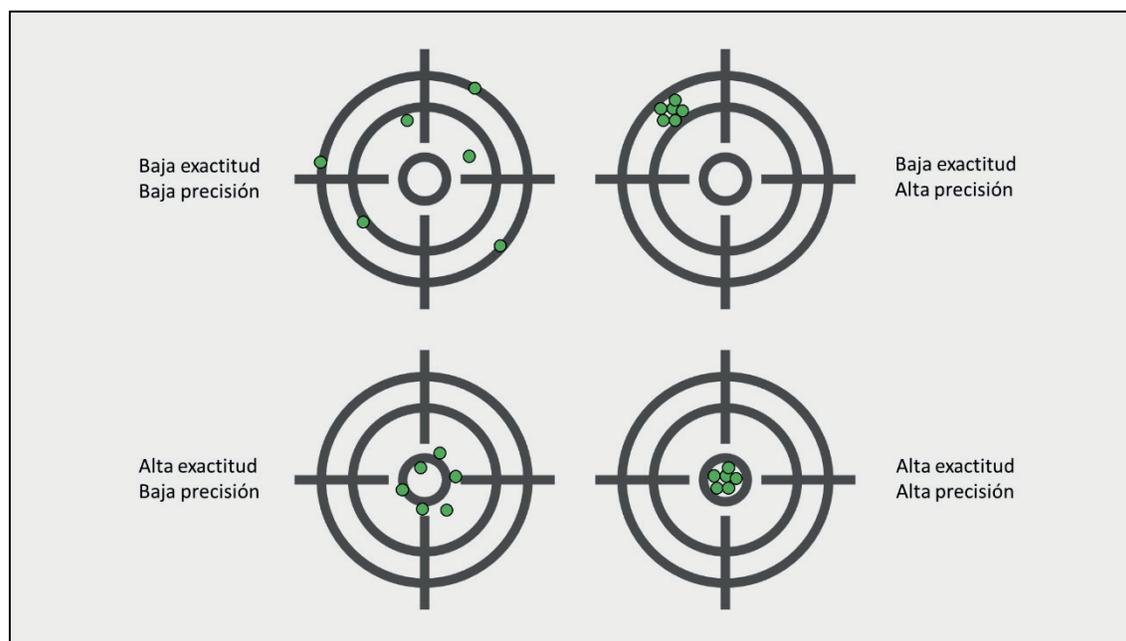


Figura 21: Relación entre exactitud y precisión. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

**Contaminación.** Ocurre cuando existe transferencia involuntaria de material de una muestra a otra o del medio alrededor, puede ocurrir durante el muestreo, en el transporte o en la preparación en el laboratorio e incluso en el análisis al quedar trazas de elementos de interés o minerales en el equipo o en la instrumentación del laboratorio. El uso de muestras blancas permite la identificación de la contaminación ya que son muestras estériles en torno a los minerales o elementos de interés.

**Errores comunes:**

- Utilizar sólo un tipo de duplicados.
- Comparar muestras no equivalentes, por ejemplo diferentes condiciones de muestreo (núcleos contra suelos), métodos de análisis diferentes (ICPMS contra ED-XRF).
- Tomar duplicados de preparación al final del proceso.
- Mala manipulación de las muestras, tener en cuenta los agentes de contaminación y utilizar herramientas, envolturas, etc.... que puedan contaminar.
- Usar porcentajes muy bajos de muestras de control dentro de los paquetes de muestras.
- Malos procedimientos en la preparación de las muestras.

### **Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). *Mineral Processing*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>

Norma técnica colombiana NTC-ISO/IEC 17025 «Requisitos generales para la competencias de los laboratorios de prueba y calibración»

## **2.10. Verificación de resultados**

 Exploración

 Recursos

 Reserva

### **Descripción:**

Garantizar los resultados a través de verificar las zonas de mineralización resulta indispensable en cualquier proyecto minero, esta labor debe hacerse por la misma empresa o por un grupo externo al equipo de exploración permitiendo corroborar que los datos han sido trabajados correctamente y así evidenciar errores o procedimientos que afecten las interpretaciones y medidas en los modelos geológicos.

En cualquier tipo de depósito mineral es necesario determinar que los datos obtenidos puedan ser verificables. Debido a la representatividad de una muestra obtenida en un depósito esmeraldífero con respecto a sus alrededores, es fundamental tener cierto análisis de muestras. El peso estadístico de las muestras con valores mayores de mineralización puede incrementar las expectativas de un depósito, de allí que sea fundamental tener una confirmación al respecto.

Hay variedad de técnicas para comprobar que los valores de mayor interés no tengan sesgos que afecten la valoración de un depósito. Por este motivo es necesario tener un protocolo para determinar la calidad de la toma de muestras y de los resultados obtenidos.

### **Desarrollo:**

La verificación de la información puede hacerse con el mismo grupo técnico u optar por delegar esta responsabilidad a un equipo externo. Hay varias metodologías para lograr estos objetivos, entre los que se rescatan:

- Perforaciones gemelas o paralelas: Consiste en realizar una perforación paralela a la que se generó anteriormente y verificar que existe una similitud con la perforación que es objeto de estudio.
- Muestras de campo, duplicados gruesos o de pulpas anteriormente analizadas.
- Generación de interpretaciones geológicas nuevas: Realizar nuevas interpretaciones o modelos geológicos a partir de los valores obtenidos. Las nuevas interpretaciones geológicas ayudan a entender la variación espacial de los datos químicos e identificar cómo es la variación espacial de las muestras.
- Contar con un cronograma para la revisión de protocolos, de manera que los responsables de calidad aseguren el valor de las muestras y la trazabilidad.
- Verificación y validación de datos: Los protocolos y los análisis estadísticos deben permitir realizar el seguimiento de la verificación y validaciones de los datos generados. Las bases de datos de control de calidad y los gráficos correspondientes son válidos para identificar la distribución de las muestras. Adicionalmente, se deben verificar las muestras que den resultados anómalos para determinar el por qué dan dichos valores y si es el caso, corregir los errores que puedan estar generando falsas anomalías.
- Protocolos de almacenamiento: Se debe constatar que las muestras y las pulpas están siendo almacenadas de una manera que sea fácil comprobar la existencia de una muestra, o en caso de determinar alguna anomalía, poder observar si hay alguna alteración o mineral que no fue detectada en el momento de realizar el muestreo.

#### ***Errores comunes:***

- Obviar la revisión de los datos anómalos.
- No conservar las muestras analizadas y los rechazos generados por el laboratorio.

#### ***Más información:***

Capítulo 2.5 Cadena de custodia

Capítulo 2.9 Calidad de datos y pruebas de laboratorio

### **2.11. Densidad de la información**

 Exploración

 Recursos

 Reserva

#### ***Descripción:***

Cuando se habla de densidad de la información se hace referencia a la cantidad de datos recolectados por unidad de área. La información puede ser de todo tipo de manera que agreguen datos relevantes al objeto de la exploración, en este caso en particular de esmeraldas colombianas.

La densidad de información existente establece un criterio de evaluación para cada uno de los proyectos de manera que se puede garantizar las interpretaciones geológicas de los depósitos de esmeraldas, los modelos realizados y las estimaciones de recursos y reservas.

### ***Desarrollo:***

La densidad de la información irá variando a medida que el proyecto se desarrolle debido a la cantidad de datos que se generan. El inicio de actividades comienza con la cartografía base y la selección de una escala apropiada. De esta manera, a medida que se adquiere más cantidad de información, el detalle será mayor en las zonas de interés o con potencial de mineralización.

El muestreo es un claro ejemplo del manejo de densidad de información y puede recolectarse en superficie o en profundidad a través de las perforaciones. Una sola muestra no es representativa de un proyecto entero y mil muestras mal recolectadas tampoco lo son, de esta manera el profesional responsable del diseño de muestreo tiene la responsabilidad de distribuir la malla de muestreo y la frecuencia de este.

### ***“Una golondrina no hace verano”***

La representatividad estadística de las muestras recolectadas proporcionará la confianza a los inversionistas y a los responsables de los trabajos de exploración. Por lo anterior, la cantidad de información recolectada será el respaldo de la tranquilidad en la toma de decisiones.

En la Figura 22 se ilustra un ejemplo típico que relaciona la importancia en la densidad de la información, en la figura 22 “A” el alto grado de incertidumbre se encuentra representado en la falta de información relacionada con el depósito y presentando dos panoramas para el proyecto. Un panorama basado en la poca información que puede descartar un proyecto probablemente exitoso. Por otra parte, la figura 22 “B” ilustra la verificación de los recursos a través de una mayor densidad de perforaciones, obteniendo información de primera mano, verificable y con el testigo asociado mejorando la confiabilidad y disminuyendo la incertidumbre del proyecto minero.

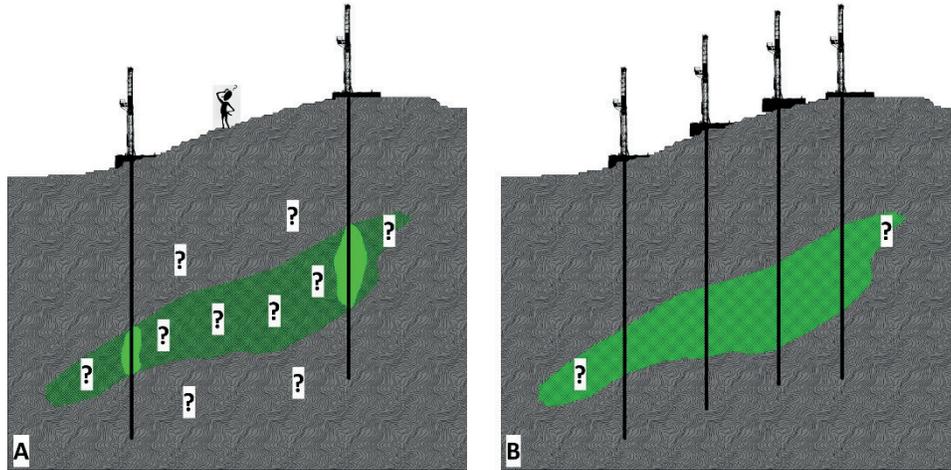


Figura 22: Ilustración que representa la importancia de un manejo adecuado de la densidad de la información y la calidad de los modelos. A) Baja densidad, mayor incertidumbre y B) Alta densidad, menor incertidumbre Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Existen distintas formas de representar la densidad de información, a continuación se mencionan algunas:

- Número de muestras por hectárea.
- Número de muestras por metro de perforación.
- Tamaño del área vs Escala de trabajo.
- Número de puntos de control o estaciones por hectárea.
- Número y tamaño de celdas vs modelo de recursos.

#### **Errores Comunes:**

- Desconocer la importancia de contar con abundante información.
- Reportar resultados con poca densidad de información, sin reportar la incertidumbre.

#### **Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral Processing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. Essentials of Mineral Exploration and Evaluation. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-04648-2>

## 2.12. Archivos de respaldo



### **Descripción:**

Los archivos de respaldo se definen como aquellos archivos que guardan toda la información relevante de procedimientos, análisis e interpretaciones realizadas, de principio a fin, en un proyecto de exploración y reporte de recursos y reservas.

Estos archivos hacen parte de los informes de valoración de un recurso y/o una reserva minera. Así mismo, los informes públicos sobre recursos y reservas mineras se basan y reflejan de manera transparente estos archivos. La persona competente calificada o el personal encargado en realizar dichos informes, debe aceptar la responsabilidad por las estimaciones realizadas en estos, así como por la documentación de respaldo que ha sido preparada para sustentar el informe preparado.

### **Desarrollo:**

En la tabla 8, se presentan una serie de buenas prácticas para almacenar y organizar correctamente los archivos de respaldo de un programa de exploración y reporte de recursos y reservas mineras:

*Tabla 8: Archivos de respaldo. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.*

<b>Archivos de respaldo</b>
Se recomienda que toda la información recolectada a lo largo del proyecto esté consignada en formatos estándar desarrollados por la compañía minera o por la persona competente encargada del reporte.
La información debe ser recolectada y almacenada tanto física como digitalmente. Dicha información debe ser aprobada siempre por la persona competente encargada del reporte.
Se recomienda que la información digital esté consignada en bases de datos, discriminada de acuerdo con el tipo y/o origen de dicha información. Se sugiere que esta sea almacenada tanto en discos como en servidores remotos
Una buena práctica para los resultados de laboratorio consiste en consignar en un formato estándar, toda la información referente a dichos análisis (fechas de análisis, equipo y metodología empleada, métodos de calibración, responsables de la actividad, registro fotográfico, etc.). Estos formatos, así como los resultados de dichos análisis, deben ser almacenados física y digitalmente.

Es de gran importancia que los análisis y reportes QA/QC realizados, sean añadidos a la base de datos de forma periódica.

Es ideal que toda la información obtenida en el proyecto, que haya sido rechazada por diferentes razones, sea almacenada en los registros físicos y digitales, informando sobre el porqué de su rechazo y el responsable de esta decisión

Una buena práctica es definir procedimientos de auditoría regular de un porcentaje determinado de la información digital contra los formatos físicos originales, para detectar posibles errores de digitación. Se debe definir un procedimiento de respaldo de esta información en servidores ubicados en sitios diferentes, para minimizar riesgos de pérdida.

#### **Errores comunes:**

- Guardar toda la información recopilada en diferentes sitios, y no en uno solo de manera ordenada. Esto puede llevar a posibles pérdidas de la información.
- No establecer una persona encargada de todo el almacenamiento y adecuada organización de la información. Cuando este proceso se lleva a cabo por diferentes personas, siempre existen errores en los empalmes de entrega de información y en la manera en cómo se deben organizar y compilar los archivos.
- Se considera una mala práctica el no guardar copias de seguridad.

#### **Más información:**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), (2013) - Propuesta Estándares para Valoración de Recursos y Reservas Mineras. Unidad de Planeación Minero-Energética. Revisado el 1 de agosto, 2020 en

[http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Valoracion\\_Recursos\\_Reservas\\_Mineras.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Valoracion_Recursos_Reservas_Mineras.pdf)

Ver Capítulo 4.1 (Seguridad de la información)

### **2.13. Auditorías de muestreo**

✘ Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

#### **Descripción:**

Una auditoría es un proceso sistemático, independiente y documentado para obtener datos y evaluarlos de manera objetiva con el fin de determinar el grado en que se cumplen los criterios de auditoría (políticas, procedimientos o requisitos). Las auditorías son una herramienta de análisis que

permite que las organizaciones identifiquen posibles fallas en sus procesos para que se puedan generar acciones correctivas o de mejora, todo con un enfoque hacia la calidad.

¿Que se audita?

Se auditan los procesos, entendidos como conjuntos de actividades mutuamente relacionadas para proporcionar un resultado previsto. En un proyecto minero son susceptibles de auditar los procesos de:

- a. Reporte de resultados de exploración
- b. Reporte de recursos minerales
- c. Reporte de reservas minerales

Cada uno de estos procesos tiene objetivos diferentes y están conformados por las actividades mencionadas en la presente guía, las cuales deben generar la información que será revisada o auditada.

En el caso de los resultados de exploración, la auditoría al muestreo es uno de los puntos críticos y esto se debe a la importancia que representan las muestras recolectadas y la información que aportan en un proyecto minero.

Son aspectos relevantes al momento de realizar la auditoría de las muestras:

- a. Fichas de muestreo.
- b. Cadena de custodia.
- c. Reportes de resultados de laboratorio.
- d. Resultados de Aseguramiento y Calidad de los resultados de laboratorio (QA/QC).
- e. Estado de los testigos de muestreo, pulpas y rechazos.

¿Quién realiza la auditoría?

Las auditorías pueden ser Internas (realizadas por la misma organización) o Externas (por terceros) en este caso posibles inversionistas, otras fuentes de financiación o Estado.

Es importante que la persona encargada de auditar un proceso no haga parte del mismo, por ejemplo: el geólogo o experto que haga parte del reporte de resultados de exploración no puede realizar la auditoría de este proceso, podría en este caso participar como observador, pero no intervenir.

Beneficios de las auditorías:

- Evalúan la eficacia de los controles establecidos en los procesos.
- Facilitan la mejora continua de los procesos.
- Validan el cumplimiento de las normas y la estructura documental de la organización.
- Ayudan a identificar nuevos riesgos y sus posibles causas.

## Desarrollo:

A continuación (Figura 23, Figura 24 y Figura 25), se presenta un paso a paso de la auditoría interna para los procesos de Reporte de resultados de exploración, Reporte de recursos minerales y/o Reporte de reservas minerales.

### Planificación de la auditoría:

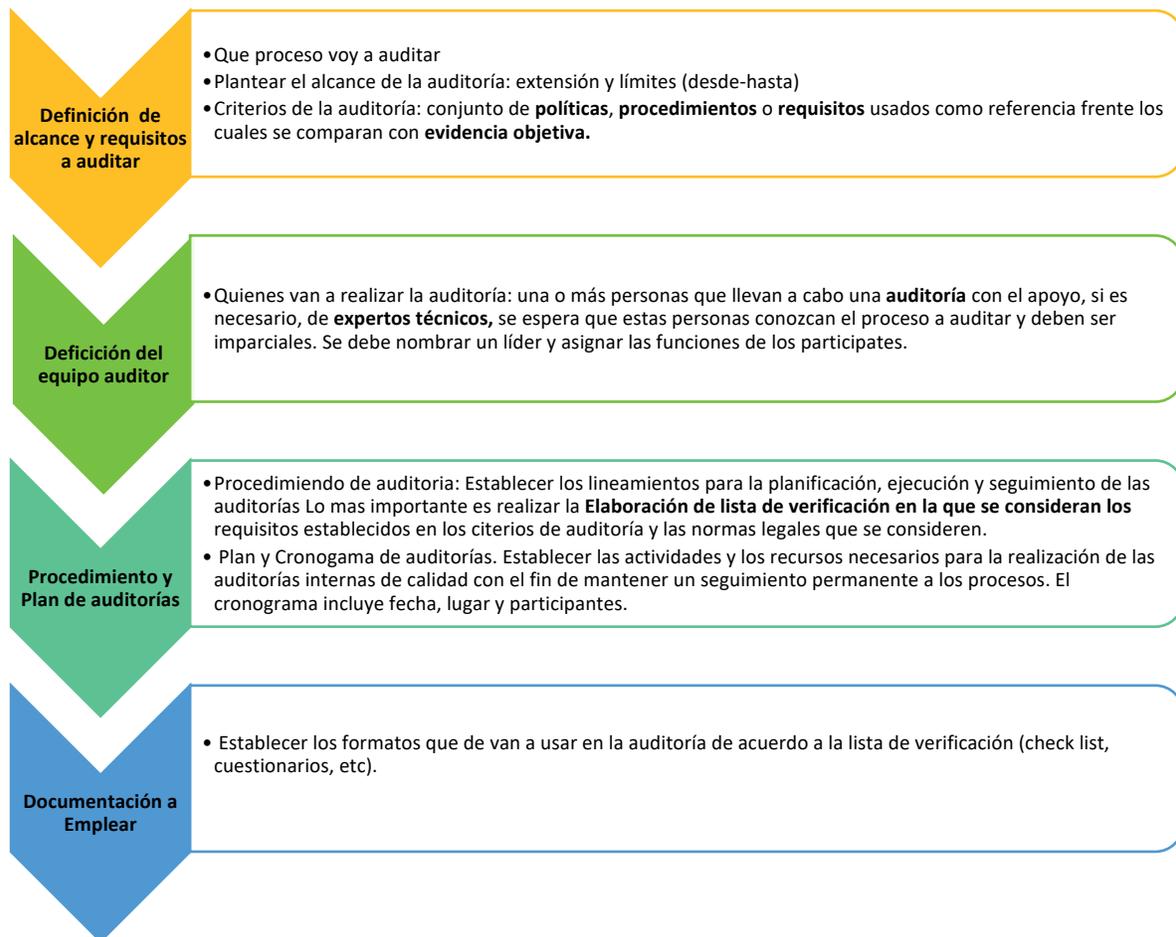


Figura 23 Diagrama de planificación de auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

## Ejecución de la auditoría

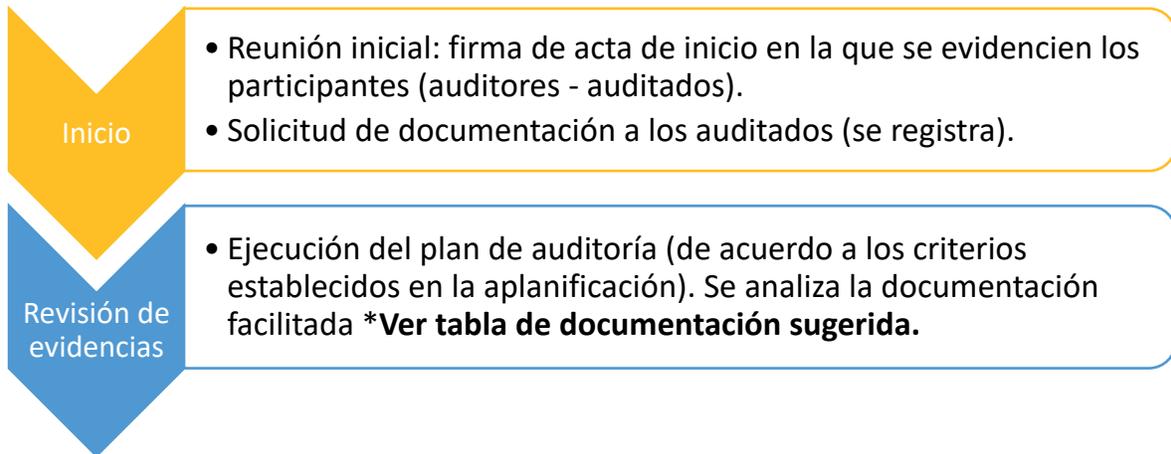


Figura 24: Diagrama de ejecución de la auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

## Documentación sugerida

Tabla 9: Documentación sugerida para auditoría en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Ítem	Documento o soporte	Ejemplo
1	Requisitos legales inherentes a la propiedad y permisos de ley	Títulos Licencias
2	Aspectos técnicos	Documentación de manuales, procedimientos, instructivos, registros, libros y actas. Cartografía Muestreo y cadena de custodia Resultados de métodos Geofísicos Almacenamiento de la información (física y digital) Almacenamiento de testigos Resultados de métodos Geoquímicos Informes de geología Reportes

## Informe de auditoría

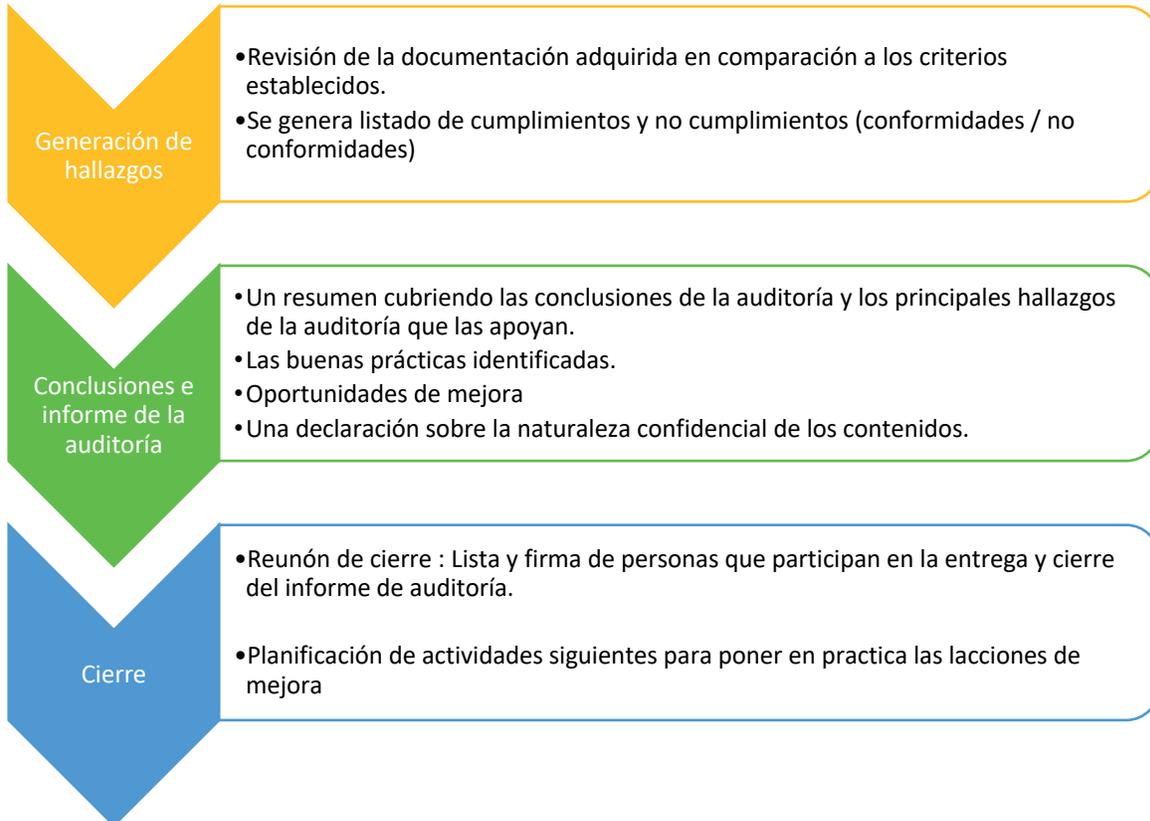


Figura 25: Diagrama de informe de auditoría. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Una buena práctica es hacer auditorías a los procesos financieros/contables, al Sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo y de los recursos humanos con el fin de tener una visión global del proyecto.

Si se tercerizan o subcontratan actividades como (muestreo, laboratorio etc.) el proveedor debe entregar informes detallados de actividades, procedimientos, metodología y estándares utilizados.

***Errores comunes:***

- Que la Alta Dirección (dueños de la mina, gerentes o líderes) no participen del proceso de auditoría y de las reuniones de apertura y cierre. El compromiso de la alta dirección es de vital importancia para que se puedan generar las acciones de mejora y correctivas.
- No realizar un seguimiento como es debido de las acciones correctivas emprendidas: tan importante como definir las acciones correctivas para eliminar las causas de las No conformidades detectadas, es igualmente imprescindible, efectuar el oportuno seguimiento de cómo las mismas se están llevando a cabo y si están contribuyendo de manera efectiva a la mitigación del problema.

***Más información:***

Norma Internacional ISO 9000-2015 e ISO 9001-2015 para el Sistema de Gestión de Calidad.

<https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>

## PARTE 3: REPORTE DE RESULTADOS DE EXPLORACIÓN

### 3.1. Trabajos de exploración previos



#### **Descripción:**

Los trabajos anteriores o de reconocimiento que hayan sido realizados dentro del proyecto minero, son fundamentales en el proceso de exploración. No sólo los elaborados por los anteriores responsables de la concesión minera, sino también aquellos realizados desde de los inicios del proyecto.

#### **Desarrollo:**

Los estudios y evaluaciones previas permiten apoyar las hipótesis actuales del proyecto. En algunos casos, la información previa permite establecer algunas directrices en el programa de exploración actual. Identificación de alteraciones, rasgos estructurales o localización de antiguos trabajos de explotación ayudan a fortalecer el modelo geológico.

Se recomienda convertir la información análoga existente a digital de manera que permita la integración. El hecho de tener toda la información en formatos estándar permite realizar mejores apreciaciones.

La información análoga suele estar en diferentes tipos de formatos como papel, cintas radiofónicas, acetatos, fotografías, diapositivas y demás. Por tal motivo una buena práctica es digitalizar la información de los trabajos de exploración previos en formatos estándar de alta calidad, con el objetivo de que sean utilizados correctamente en el programa de exploración existente.

Una buena práctica es archivar la información de los trabajos previos, que se encuentre de manera análoga, de tal manera que se puedan preservar los elementos físicos. Mapas, pruebas de laboratorio, planos o perfiles geológicos pueden ser de utilidad para el entendimiento y desarrollo del proyecto.

Adicionalmente, es necesario hacer controles de campo a los trabajos de exploración previos. Perforaciones o túneles exploratorios previos, sirven de sustento al trabajo exploratorio actual. Se recomienda verificar y validar las muestras y realizar análisis a los testigos para identificar que los valores estudiados son consistentes con los análisis químicos anteriormente reportados.

En el caso de trabajos previos de exploración como túneles o pozos, se sugiere realizar nuevamente la identificación y corroboración de los puntos de control y realizar un levantamiento topográfico

de túneles y pozos sobre los cuales exista evidencia de información faltante o deficiente, que permita utilizar dicha información en los programas de exploración posteriores.

En la exploración y explotación de esmeraldas es común almacenar los datos de producción, junto con la ubicación de las producciones y la cantidad de material extraído. Esta información permite establecer patrones que ayuden a identificar las áreas de mineralización e identificación de estructuras.

#### ***Errores comunes:***

- Desconocer los trabajos exploratorios previos.
- Subvalorar la información recolectada previamente sin hacer un estudio a fondo de la misma.
- No digitalizar la información que se encuentra en formato análogo o físico.
- No verificar la integridad y la calidad de la información de proyectos exploratorios previos.

#### ***Más información:***

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

### **3.2. Métodos de agregación o actualización de la información**



#### ***Descripción:***

Los programas exploratorios deben tener en cuenta una serie de parámetros que permitan llegar a un modelo geológico. Estos parámetros se determinan de acuerdo con la técnica de extracción planeada o los tenores encontrados. Se debe tener en cuenta que el modelo geológico se está actualizando mediante la incorporación de información nueva y por tanto ésta debe ser relacionada de manera clara.

#### ***Desarrollo:***

Los programas exploratorios generan constantemente información nueva que se suma a la información preexistente, actualizando los modelos geológicos, de recursos y de reservas con cada dato que es ingresado.

Es una buena práctica establecer los dominios geológicos y los tenores asociados a cada dominio. De igual manera se deben agrupar litologías con base a rasgos similares así como en su grado de importancia con respecto al depósito.

Las bases de datos del muestreo realizado deben poder asimilar e integrar adecuadamente la nueva información sin que esta trastoque información previa. Un uso adecuado de las bases de datos es fundamental para que nueva información sea útil al facilitar su incorporación.

En caso de tener que redefinir modelos geológicos, una buena práctica es realizar comparaciones con modelos anteriores y verificar la coherencia de los cambios. La longitud de los interceptos también es importante porque se pueden presentar sobreestimaciones en zonas ya verificadas. Los valores con efecto pepita deben ser analizados cuidadosamente al momento de generar un nuevo modelo geológico.

Igualmente, pueden darse interceptos largos con bajos tenores, llevando a desestimar estas zonas. Analizar los posibles efectos que hacen que una zona presente valores menores, son fundamentales para integrar nueva información en la exploración.

#### ***Errores comunes:***

- No tener un protocolo adecuado, ni una base de datos para ingresar nuevos datos a un proyecto exploratorio.
- No definir los dominios geológicos al inicio de un proyecto exploratorio.
- No adaptar los cambios en el modelo cuando se registra nueva información.
- No contar con un manejo apropiado de los datos de acuerdo con las escalas del modelo.

#### ***Más información:***

Rossi, M. and Deutsch, C., 2014. *Mineral Resource Estimation*. 1st ed. Dordrecht: Springer, p.133.

### **3.3. Relaciones entre el ancho de la mineralización y el largo de los interceptos**



#### ***Descripción:***

Al momento de identificar una mineralización a través de perforaciones, es importante establecer las geometrías que se asocian a las anomalías, una de estas es la relación entre el ancho de la mineralización y la longitud que se intercepta. A su vez, se aprovecha la información relacionada de

manera directa con la mineralización ponderando los promedios asociando tramos largos con tenores bajos y tramos cortos con tenores altos.

### **Desarrollo:**

Una de las decisiones más importantes en la realización de una fase de exploración es determinar el momento en el cual se deben llevar a cabo las perforaciones y cuándo se cuenta con la información suficiente para culminar con este proceso.

Se sugiere efectuar los siguientes pasos al momento de realizar las primeras perforaciones.

- Mapear la litología de la superficie alrededor de la plataforma en una escala lo más detallada posible.
- Dibujar un perfil geológico a lo largo de la línea de perforaciones propuesta en el programa de perforación. El espaciamiento y la información a ambos lados del perfil geológico, será de total criterio por parte de la persona idónea o profesional competente (para más información, ver capítulo Densidad de información).
- Proyectar los datos conocidos a lo largo de las secciones.
- Realizar predicciones acerca de lo que se espera encontrar con las perforaciones, sobre las estructuras geológicas y mineralizaciones que puede atravesar con ellas.
- La decisión acerca del número de perforaciones y su disposición geométrica sobre el terreno es compleja y de gran importancia para el éxito de los resultados que se quieren obtener. La localización, orientación de los pozos, el ángulo de inclinación y demás parámetros requeridos, serán determinados de acuerdo con la experiencia del equipo que se encuentra a cargo de esta etapa del proyecto.

### **Perforaciones exploratorias**

Después de llevar a cabo la etapa de exploración superficial en donde se aplican cuidadosamente las técnicas conocidas tales como la geofísica, geoquímica, petrografía, estratigrafía entre otras, de manera adecuada, es posible detectar las anomalías o las zonas de interés que necesitan ser estudiadas en profundidad para obtener más información. Las perforaciones se deben planear únicamente cuando se tenga un conocimiento geológico avanzado sobre la zona de interés y de la génesis del mineral ya que estas ayudan a delimitar las zonas de interés.

Para elaborar la malla de perforación, el profesional encargado deberá tener en cuenta factores de tipo geológico, económico, estadístico, social y ambiental; el espaciamiento de las perforaciones será definido por el tamaño de la anomalía encontrada. Una vez que el depósito sea definido, el objetivo de la perforación será interceptar la mineralización potencial de esmeralda prospectada, por esto es necesario realizar, no sólo perforaciones verticales, si no llevar a cabo algunas con ángulo de orientación. También es bueno elegir de forma adecuada el tipo de perforación, ya sea realizada desde la superficie o, si se efectúa desde un túnel, la adecuada siempre será aquella que proporcione la mayor cantidad de información posible al menor costo.

Durante la realización de las perforaciones es indispensable poseer una alta calidad de los datos para obtener la mayor información posible de los pozos perforados. Esta información almacenada es la base para elaborar el modelo geológico y los demás modelos de forma tridimensional, los cuales deben ser lo más cercanos a la realidad posible. Después de elaborado el modelo geológico, se conocerá de manera acertada y con menor incertidumbre, la distribución del mineral en profundidad, el siguiente objetivo será verificar la continuidad de la mineralización. Una vez llegado a este punto, el espaciamiento entre las perforaciones debe ser menor.

Debido a la complejidad de los yacimientos de esmeralda, se hace necesario combinar tantos métodos conocidos como sea posible para obtener información de buena calidad, siempre y cuando su aplicabilidad y utilidad sea verificada por el profesional con experiencia que esté a cargo del proyecto. Todos son componentes críticos para la estimación de recursos y reservas, la mayoría de los trabajos serán a criterio del profesional que está encargado de elaborar los informes técnicos, ya que él debe contar con el conocimiento y la experiencia para evaluar las diferentes variables.

### **Perforaciones para estimar recursos minerales**

En esta fase ya se cuenta con una buena comprensión de la naturaleza de la mineralización, ya se tiene la confianza necesaria para avanzar hacia esta etapa tan importante que es la que proporciona respuestas a preguntas económicas relacionadas con el grado, toneladas, y demás características de la posible mineralización de esmeralda. Dicha información suministra los niveles de detalle y confianza requeridos para proceder al estudio de viabilidad final. Se debe entender que no todas las perspectivas que se generan llegan a ser proyectos productivos, un gran número de ellas en las etapas iniciales van perdiendo su atractivo económico a medida que avanza el conocimiento geológico del título minero.

Actualmente, con el surgimiento de los métodos de estimación de recursos con apoyo geoestadístico basado en softwares mineros, se puede obtener con gran precisión la malla de perforación a utilizar para estimar los recursos basados en el plan de producción, el variograma y la estadística de la población de datos. El objetivo de estos métodos es evaluar el error relativo estándar de la estimación (*RSE*, por sus siglas en inglés “*relative standard error*”) para una malla de sondajes particular, con el fin de determinar si ésta permitiría clasificar recursos medidos e indicados.

En la implementación de nuevas metodologías, también se cuenta con la simulación condicional. Con este método se puede determinar el espaciamiento de las mallas de perforación en áreas que muestran un efecto proporcional, donde la varianza se relaciona con la media local (caso de heterocedasticidad, donde los valores locales de media y varianza fluctúan), en lugar de homocedasticidad (media y varianza constantes). Como se supone en el uso de la varianza de *Krigging*, a diferencia del *Krigging*, la simulación condicional tiene en cuenta la variabilidad local, de modo que las áreas con valores más altos pueden ser modeladas con mayores varianzas entre diferentes simulaciones (Boyle, 2009; Dimitrakopoulos et al., 2010).

### ***Errores comunes:***

- Llevar a cabo perforaciones sin realizar estudios previos.
- No tener en cuenta la geometría del depósito a la hora de programar las perforaciones para estimar recursos minerales
- No buscar apoyo en las nuevas tecnologías para realizar los análisis de los programas de perforación.
- Asumir que no existe desviación en los pozos y por lo tanto no se registra.

### ***Más información:***

Boyle, C. (s.f.). Conditional Simulation Methods to Determine Optimum Drill Hole Spacing. Spectrum Series, 11.

ETSI Minas (UPM). (2012b). El Proceso de Exploración Minera Mediante Sondeos - Archivo Digital UPM. [Http://Oa.Upm.Es/10695/](http://Oa.Upm.Es/10695/). <http://oa.upm.es/10695/>

## **3.4. Información gráfica**



### ***Descripción:***

La utilización de diagramas, gráficos, modelos 2D o 3D, es esencial, tanto para la exploración de recursos naturales, como para la presentación de la ubicación y disposición de los recursos y reservas resultantes de dicha exploración.

La representación gráfica de los resultados de levantamientos geológicos y estructurales, columnas estratigráficas, análisis geoquímicos y geofísicos, muestreos, perforaciones, etc., es fundamental para lograr que los lectores de los diferentes informes y reportes entiendan de una manera clara y concisa, el comportamiento y las características de los diferentes elementos geológicos asociados al proyecto.

Adicionalmente, la representación gráfica ayuda a elaborar el diseño de diferentes procesos necesarios para llevar a cabo una correcta estimación de recursos y reservas esmeraldíferas. Por ejemplo, por medio de modelos 3D se puede mostrar la ubicación de posibles zonas mineralizadas objetivo dentro del título minero, con el objetivo de dirigir las perforaciones exploratorias o en estados más avanzados la estimación de recursos (Figura 26).

### **Desarrollo:**

Al momento de realizar un diagrama o algún tipo de representación gráfica de los trabajos realizados en los programas de exploración y reporte de recursos y reservas, se recomienda seguir las siguientes indicaciones:

*Tabla 10: Resumen de diagramas y representaciones gráficas en estimaciones de recursos y reservas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.*

<b>Diagramas y representaciones gráficas en los programas de exploración y los reportes de recursos y reservas.</b>
1. Una buena práctica es representar o ilustrar los datos de exploración. Esto ayudará a la comprensión y análisis a través de la conceptualización del yacimiento por parte del equipo de trabajo.
2. La presentación de planos y mapas es potestad de cada compañía, sin embargo, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la ANM cuentan con formatos estandarizados para ello.
3. Es importante que todos los mapas, diagramas, modelos, columnas, etc., posean su escala vertical y/u horizontal (cuando aplique).
4. Usar el mismo sistema de coordenadas para todas las representaciones gráficas siempre será de gran ayuda ya que evitará confusiones en la localización de los elementos que se quieren representar.
5. Es muy útil que los datos que se quieren representar estén vectorizados, en bases de datos y georreferenciados. Esto, con el objetivo que puedan ser utilizados y analizados en programas SIG.
6. Se recomienda usar diferentes colores o símbolos que resalten la información más importante de cada representación gráfica.

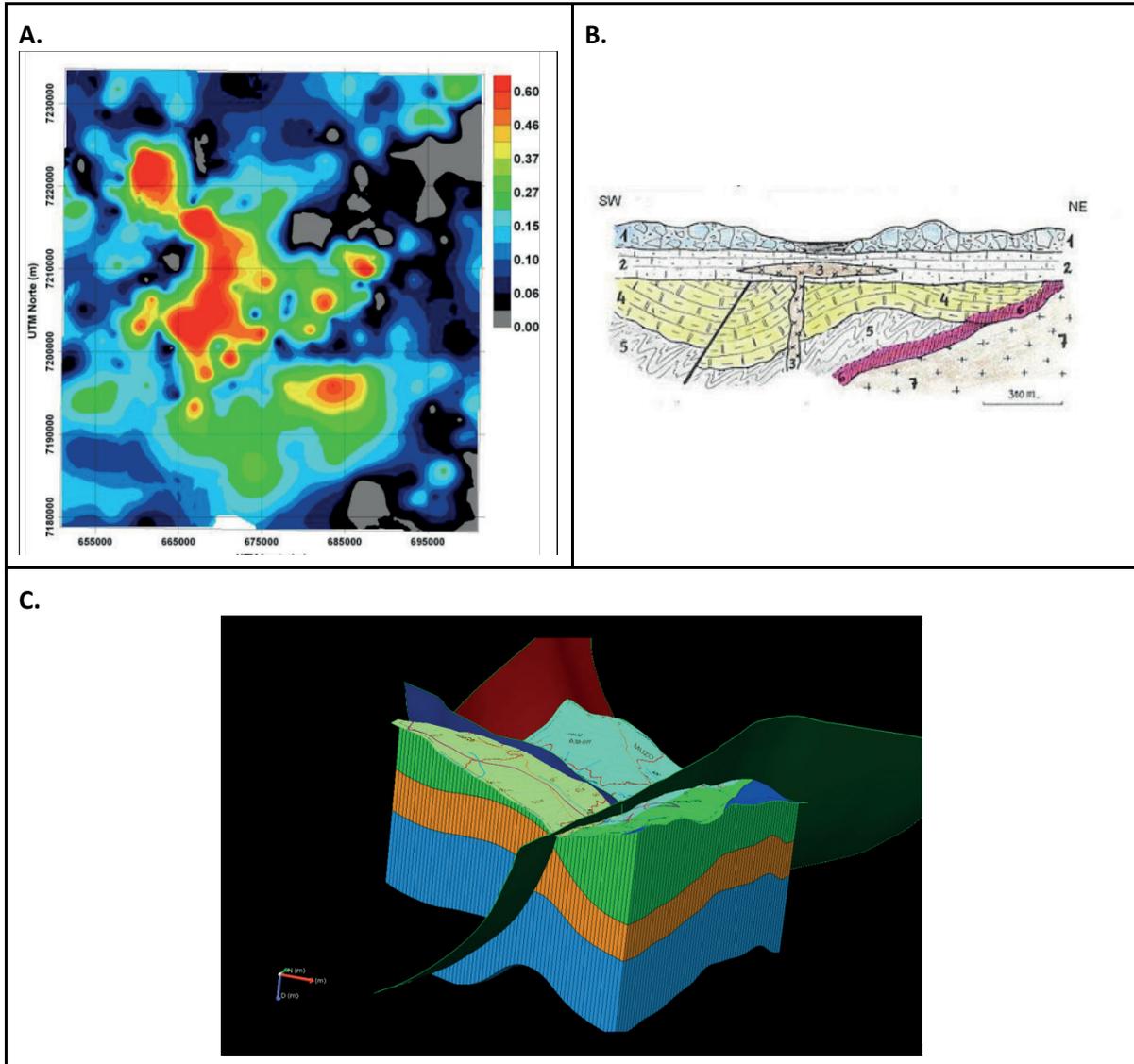


Figura 26: A) Ejemplo de mapa geoquímico mostrando la concentración de un elemento químico de acuerdo con su ubicación. Tomado de: Paisagens Geoquímicas - Naturais e Antrópicas - no Estado do Paraná. B) Ejemplo de perfil geológico mostrando diferentes discontinuidades y C) Ejemplo de Modelo Geológico 3D, donde se muestra la geometría de las capas de roca en el subsuelo afectadas por un sistema de fallas. Tomado de ISAM Holding

**Errores comunes:**

- No escalar los modelos o gráficos generados, así como no georreferenciar los datos mostrados en dichos modelos.
- Realizar representaciones gráficas con poco o nulo color. Esto dificulta la atención y recepción de la información correcta del observador.

- Presentar gráficos en tamaños inadecuados y/o con bajas resoluciones que dificulten la visualización y entendimiento.

### ***Más información:***

CIM Estimation Best Practice Committee. (2008). Estimation of mineral resources & mineral reserves best practices guidelines. Revisado el 4 de Agosto, 2020 en <https://mrmr.cim.org/media/1069/rock-hosted-diamond-guidance.pdf>

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

### **3.5. Balance del reporte**



#### ***Descripción:***

Cuando un proyecto se encuentra en un estado avanzado, suele presentar una gran cantidad de información que dificulta el manejo práctico, por lo tanto la necesidad de realizar informes concretos que simplifique los resultados y facilite la verificación del estado actual. Por tal motivo, hay que saber determinar cuándo un proyecto no es de interés económico, basado en los resultados de exploración. Este informe se conoce como Balance del Reporte, en donde se deben plasmar las consideraciones y argumentos que se tuvieron en cuenta para llegar a esta conclusión, y no generar falsas expectativas con valores anómalos. En estos casos se sugiere hacer análisis económicos generales para definir el potencial de recurso.

#### ***Desarrollo:***

Los trabajos exploratorios tienen como objetivo identificar si un depósito mineral puede presentar o no, potencial económico. Adicionalmente, los proyectos mineros están ligados a la situación del mercado, al conocimiento técnico disponible y a una serie de factores modificadores técnicos, ambientales, económicos, políticos y sociales. Una buena práctica es enumerar los motivos que hacen de un proyecto no viable.

Una buena práctica es que el balance del reporte contenga un análisis estadístico de los resultados, la descripción de valores altos y bajos, una caracterización de los interceptos y las conclusiones que hacen que el proyecto no sea tenido en cuenta para continuar la exploración.

Adicionalmente, se debe digitalizar y catalogar la información generada en bases de datos para un posible uso futuro. En el caso de tener núcleos y pulpas, la información debe ser almacenada de tal manera que pueda ser reinterpretada más adelante.

Los modelos geológicos generados pueden ser cargados en archivos nativos, facilitando el uso en software de distinto origen. Los valores de corte y tenores pueden hacer que un proyecto que hoy en día no sea atractivo, puede quizás serlo en un futuro.

#### ***Errores comunes:***

- No incluir las razones por las cuales el proyecto no es atractivo.

#### ***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2019) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

### **3.6. Información adicional de exploración**



#### ***Descripción:***

No hay una receta única de exploración, por tal motivo, es común incluir nuevas metodologías que apoyen la búsqueda del yacimiento. Estas técnicas permiten delimitar los cuerpos a explorar, realizar características y evidenciar propiedades no contempladas con anterioridad que facilitan o incluso redefinen la génesis de un depósito. Un conocimiento detallado del yacimiento conlleva a evaluar otras técnicas que pueden ser utilizadas en un proceso de beneficio minero, como lo son la densidad, las pruebas metalúrgicas; o técnicas, para reconocer futuros inconvenientes de construcción de la mina, como la geotecnia o la hidrogeología.

#### ***Desarrollo:***

Debido al ámbito interdisciplinario del proceso exploratorio, se recomienda aplicar técnicas y herramientas desde diferentes perspectivas, las cuales pueden ser usadas en diversas etapas del proyecto minero.

Una buena práctica es reportar los métodos o herramientas adicionales y el uso dentro del proyecto.

Estos métodos adicionales pueden dividirse según su uso principal de la siguiente manera:

- Nuevos métodos en disciplinas relacionadas con la exploración:
  - Geología.
  - Geoquímica.
  - Geofísica.
  - Sensores remotos.
  - Topografía.
- Nuevos métodos en disciplinas relacionadas con el beneficio:
  - Mineralurgia.
  - Densidad.
  - Humedad.
- Nuevos métodos en disciplinas relacionadas con la explotación:
  - Geotecnia.
  - Hidrogeología.
  - Identificación de sustancias contaminantes.

Una buena práctica consiste en el reporte de cualquier información que sustente la toma de decisiones, interpretaciones geológicas o aclare problemas al interior del proyecto. La importancia de esto radica en la implementación y divulgación de nuevas tecnologías que estén relacionadas con las distintas áreas del conocimiento y contribuyan al enriquecimiento técnico de la exploración, la estimación de recursos y reservas minerales.

#### ***Errores comunes:***

- No mencionar los métodos utilizados debido a que no obtuvo una respuesta positiva con relación al objetivo propuesto.
- Adquirir un método geofísico desconociendo qué propiedades físicas puede detectar y cómo esa información se puede aplicar a la exploración de esa zona mineralizada

#### ***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2019) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales. Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

### 3.7. Trabajos adicionales

 Exploración

 Recursos

 Reserva

#### **Descripción:**

No existe un punto final a los trabajos de exploración. Por tal motivo, la planificación a futuro a través de nuevas metodologías que fortalezcan o amplíen las zonas de exploración es una buena práctica. Determinar con mayor precisión y exactitud las características de un cuerpo mineralizado, como su continuidad y ubicación espacial, o establecer elementos, ya sea mineralógicos, geoquímicos o estructurales, que sirvan como niveles o guías de exploración a detalle, que orienten la búsqueda de nuevas zonas con mayor concentración de esmeraldas.

En el caso de la esmeralda colombiana, a continuación se presentan algunas recomendaciones sobre labores adicionales de exploración que pueden ser de gran utilidad para determinar el recurso.

#### **Desarrollo:**

**Sísmica 3D:** Este es un método geofísico en el que se pueden obtener imágenes tridimensionales de secciones determinadas de la corteza terrestre. Estas imágenes permiten un mayor detalle de la disposición espacial de la litología presente en la zona, así como la gran cantidad de información de carácter estructural que puede aportar en la localización y estimación del recurso. En el caso de la esmeralda colombiana, este método puede ser muy útil para detectar las zonas de mayor deformación del macizo rocoso que actúa como roca caja de las mineralizaciones de esmeraldas, ya que estas zonas son las más adecuadas para que se presente una mineralización. Así mismo, puede servir para determinar zonas con gran densidad de fracturamiento y diaclasamiento, en donde puede precipitar el fluido mineralizante.

Sin embargo, tiene sus desventajas, ya que la adquisición de los datos puede llegar compleja y costosa.

**Mapeo de tunelería:** Este tipo de exploración se puede desarrollar a medida que se avanza en las labores de explotación. Consiste en la recolección de información proveniente de realizar un muestreo de la roca que va mostrando el túnel o frente de trabajo, o de la mineralización de esmeraldas, a medida que se va desarrollando la explotación. Así mismo, también se puede recolectar información estructural del túnel de trabajo (rumbo de las capas, buzamiento, fallas, fracturas, diaclasas, etc.)

Con la recolección de las muestras, es posible realizar análisis mineralógicos y geoquímicos en el laboratorio, que, junto con una mayor cantidad de datos estructurales, pueden ser de gran ayuda para alimentar o ajustar el modelo geológico del título minero.

Para la exploración de un mineral como la esmeralda colombiana, se recomienda que este mapeo se realice a gran detalle, preferiblemente a escala 1:200 o 1:100, georreferenciando cada muestra recolectada y tomando datos estructurales cada 5 metros, aproximadamente.

**Uso de UAV (drones) con tecnología LIDAR:** El uso de estos dispositivos para la exploración de esmeraldas, puede ser útil para obtener un mayor detalle de las características estructurales del título minero, ya que con estos vehículos aéreos no tripulados equipados con este sensor, se pueden obtener imágenes de la superficie rocosa del título a alta resolución, ya que esta tecnología permite ver más allá de la vegetación superficial. La interpretación de las imágenes LIDAR, acompañado con el apoyo de un experto en el área, podría facilitar la identificación de estructuras importantes en relación con un cuerpo mineralizado de esmeraldas.

Además de fines exploratorios, estas imágenes y la topografía también pueden ser utilizadas en la elaboración del modelo 3D, ya es de gran utilidad en la planificación minera. También es bastante funcional a la hora de realizar estudios geomorfológicos a más detalle y caracterizar zonas de alto riesgo por amenaza de fenómenos de remoción en masa.

***Errores comunes:***

- Generalmente, no se tiene en cuenta los trabajos adicionales de exploración en el cálculo de inversiones de un proyecto minero, llegando a ser necesarios muchas veces en el transcurso del proyecto.
- No realizar labores de exploración adicionales a medida que se están realizando las labores de explotación. Se recomienda que siempre se esté en la búsqueda de nuevos yacimientos.

***Más información:***

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-58760-8_6)

### 3.8. Geofísica

✘ Exploración

■ Recursos

■ Reserva

#### ***Descripción:***

La Geofísica de Exploración es una rama de la Geofísica que se enfoca en el estudio de las propiedades físicas de las rocas y minerales, los métodos que permiten identificarlos de su medio y las técnicas para explorarlos directa o indirectamente. Los métodos geofísicos apoyan a la exploración y pueden servir de guía siempre y cuando se tenga en cuenta el contexto geológico del depósito mineral y se estructure la campaña de exploración geofísica considerando los modelos geológicos que se establezcan como hipótesis

Los métodos geofísicos pueden ser útiles para detectar zonas de falla, cambios de densidad en las rocas, áreas con mayor o menor resistencia al paso de la corriente eléctrica o zonas en donde hay cambios en la velocidad de las ondas acústicas. La interpretación se realiza a partir del entendimiento de las propiedades físicas y la relación entre las zonas mineralizadas, las alteraciones y la roca caja.

La mejor manera de entender las geometrías de un depósito mineral y los cambios de la propiedad física medida en un estudio geofísico es por medio de un proceso conocido como inversiones geofísicas. Las inversiones geofísicas consisten en soluciones matemáticas que transforman los datos leídos por los equipos a modelos matemáticos que identifican cuerpos con una posición con respecto al subsuelo. De esta manera se pueden asociar los modelos matemáticos con estructuras geológicas como rocas, zonas mineralizadas, fallas, acuíferos, etc.

Para utilizar cualquier método geofísico se requiere que la zona de interés geológico tenga una expresión geofísica, es decir, que presente contraste. De otra manera, el objeto de estudio no podrá ser detectado. Adicionalmente, en el momento de planear una campaña geofísica se sugiere analizar las variaciones laterales y verticales de los depósitos y de las rocas y el tamaño de la estructura. Sin embargo, algunas veces la estructura no será detectable.

Para ser eficaces con los métodos geofísicos, es importante tener en cuenta la ubicación de las medidas, la georreferenciación de los datos, la dirección de los datos con respecto a las estructuras de interés (fallas o vetas). Es importante que la información producida esté disponible digitalmente para poder alimentar un software de modelamiento geológico y apoyar el entendimiento del modelo geológico. La manera más adecuada de subir los datos geofísicos a un software geológico es a manera de puntos, líneas *shape* o volúmenes en formatos de georreferenciados, de tal manera que se facilite la interpretación tridimensional de la información geofísica en conjunto con la geología.

### Desarrollo:

Los métodos geofísicos han sido aplicados en la exploración de esmeraldas buscando el contraste entre la roca caja y los cuerpos mineralizados, zonas de falla y en la identificación de acuíferos que puedan afectar las futuras actividades mineras. Los métodos tienen límites, por ejemplo, no definen quilates ni determinan si la zona anómala, en caso de encontrarse, puede ser productiva o no. Estas limitaciones están asociadas a los bajos contrastes de propiedades físicas, debido a que la resolución espacial de los métodos no alcanza a diferenciar una gema, bien sea en medio de una zona mineralizada o en la roca sedimentaria.

A continuación, se realiza la identificación de los métodos más utilizados en la exploración de esmeraldas en Colombia, las propiedades físicas que se buscan contrastar y la resolución espacial de los mismos (Figura 27).

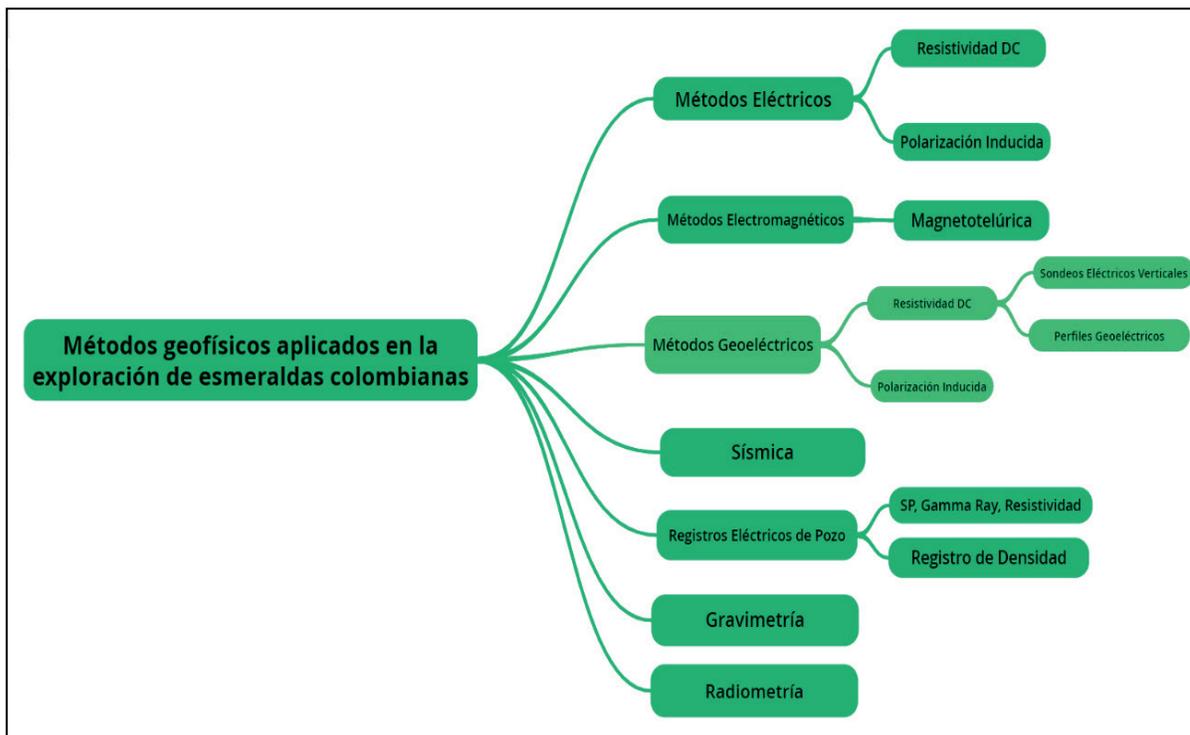


Figura 27: Diagrama de métodos geofísicos aplicados a la esmeralda colombiana. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

### Métodos geoeléctricos

Los métodos geoeléctricos utilizan la corriente para determinar las propiedades eléctricas de las rocas, fluidos y minerales. Estos métodos consisten en aplicar corriente eléctrica al subsuelo por medio de unas varillas llamadas electrodos y luego estudian el comportamiento de la corriente, midiendo las diferencias de voltaje por otros electrodos. La forma en que se disponen los electrodos

en el terreno y la manera en que se inyecte la corriente eléctrica, permite analizar la información en diferentes puntos del subsuelo en una, dos o tres dimensiones.

Los métodos geoelectrónicos que miden la resistividad eléctrica y que han sido utilizados para la exploración esmeraldas son los Sondeos Eléctricos Verticales (datos en una sola dimensión), los Perfiles Eléctricos (toma de datos en dos dimensiones, también conocidos como Tomografías Eléctricas) y Adquisiciones Eléctricas Tridimensionales (también conocidos como Tomografías Eléctricas Tridimensionales). En los métodos eléctricos y electromagnéticos en una o dos dimensiones, las zonas anómalas pueden quedar fuera del plano de la zona de estudio.

Los métodos geoelectrónicos buscan determinar anomalías de resistividad en el subsuelo. Por ejemplo, si se están buscando “bolsones” de zonas de calcita (altamente resistivas) en medio de lutitas (altamente conductivas), un método geoelectrónico ayudaría a su identificación.

La Polarización inducida es otro método geoelectrónico, pero este mide la cargabilidad eléctrica, la cual corresponde a la capacidad de un material de almacenar corriente eléctrica y cómo libera esta corriente. Minerales como las arcillas o la pirita se caracterizan por una cargabilidad positiva, con respecto al cuarzo o la calcita, que tienen cargabilidad nula. La Polarización Inducida ha sido utilizada debido a que las zonas mineralizadas de esmeraldas suelen tener pirita entre los minerales de ganga.

Entorno a esto, una buena práctica es tener una información geológica base que respalde cualquier interpretación de datos geofísicos.

### **Métodos electromagnéticos - magnetotelúrica**

Este método hace parte de la rama de la geofísica que estudia el campo electromagnético terrestre. El método magnetotelúrico puede utilizarse como fuente electromagnética, fuentes naturales (interacción entre las tormentas eléctricas y la ionósfera), o fuentes controladas, como inyectores de corriente eléctrica. Los cambios del campo electromagnético en el subsuelo están relacionados con variaciones en las rocas. El análisis del método magnetotelúrico da como resultados resistividades eléctricas, la cual es la misma que utilizan los métodos geoelectrónicos.

El Método Magnetotelúrico adquiere datos por tiempos prolongados para obtener datos de varias frecuencias, que estarán relacionadas con diferentes profundidades y resistividades en la roca del subsuelo. La adquisición magnetotelúrica se suele hacer de manera unidimensional, pero al medir con varias estaciones, se puede realizar un proceso posterior de inversión geofísica para analizar los datos en una, dos o tres dimensiones.

### **Registros Eléctricos de Pozo**

Este método se utiliza después de la perforación de un pozo diamantado (ver sección 2.3 Técnicas de Perforación). Se puede introducir una herramienta que permita estudiar varias propiedades físicas de la roca como resistividad eléctrica, radiación natural, potencial espontáneo, polarización

inducida y densidad. Los registros de pozo son útiles por varios motivos: Permiten tener una mayor cantidad de datos de propiedades físicas que ayuden a interpretar el núcleo físico preservado, ayudan a relacionar dos o más pozos a partir de la respuesta geofísica de las diferentes propiedades (conocido como petrofísica), pueden ser útiles para correlacionar el pozo con la estratigrafía del sector y caracterizar geofísicamente la roca caja, las zonas mineralizadas y zonas de falla. Adicionalmente, la información, al quedar en formato magnético, puede ser utilizada para fortalecer la interpretación del modelo geológico en dos y tres dimensiones.

### **Sísmica**

Este método geofísico estudia la velocidad de las ondas acústicas en el subsuelo. En el caso de los yacimientos de esmeralda, con este método se busca ubicar zonas de mayor velocidad (bolsones) con respecto a zonas de menor velocidad (*shales*). Sin embargo, este método puede responder a anomalías que no indiquen necesariamente las zonas mineralizadas, si no que puede corresponder a otros cambios en la roca, lo cual puede reflejar anomalías falsas.

### **Gravimetría y Radiometría**

La Gravimetría estudia las variaciones de gravedad y hace una correlación posterior con cambios en la densidad en las rocas. Este método ha sido poco aplicado debido al bajo contraste de densidades entre las zonas mineralizadas y las rocas caja.

La Radiometría, también conocida como Espectrometría, estima las concentraciones de tres elementos naturalmente radioactivos: Potasio, Uranio y Torio, además del efecto total de las partículas subatómicas. La radiometría es útil en exploración de esmeraldas en Colombia debido a que puede identificar diferentes tipos de roca (Ochoa Gutiérrez, 2003). Por ejemplo, los *shales*, debido a su mayor contenido de potasio y uranio, pueden diferenciarse de una arenisca cuarzosa, que tienen menores concentraciones.

### **Errores comunes:**

- No georreferenciar los datos, tanto en coordenadas como en profundidad. Al carecer de esta información, no se puede relacionar la información con los datos en el subsuelo.
- El método seleccionado no estudia una propiedad que sea de contraste fuerte.
- Esperar que, con la aplicación de cualquier método geofísico, se llegue a la identificación del cuerpo mineralizado, o incluso, conocer el quilataje de este.
- Los datos no son entregados en archivos que permitan ser cargados a un programa de modelamiento geológico.
- La resolución espacial del arreglo geométrico con que se realizó el método es más amplia que el tamaño de anomalía que se desea detectar.

- No tener en cuenta un modelo geológico conceptual previo, al momento de la adquisición de los datos

***Más información:***

Dentith, M. C., & Mudge, S. T. (2018). Geophysics for the mineral exploration geoscientist (3rd ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Mussett, A. E., Khan, M. A., & Button, S. (2019). Looking into the Earth: An introduction to geological geophysics. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ochoa Gutiérrez, L. H. (2003). Evaluación magnetométrica, radiométrica y geoelectrica de depósitos esmeraldíferos. Earth Sciences Research Journal, (7), 13-18.

## PARTE 4: ESTIMACIÓN Y REPORTE DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES

### 4.1. Seguridad de la información



#### **Descripción:**

La información es un activo valioso para todos los proyectos, representa el insumo primordial para la preparación de reportes de resultados de exploración, recursos y reservas en esmeraldas.

En este apartado se describirán las buenas prácticas para tener en cuenta para garantizar la seguridad de la información, con base en los tres principios básicos (Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad) propuestos por la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 27001. (ICONTEC, 2013) (Figura 28).



*Figura 28: Actividades asociadas a la garantía de la seguridad de la información. Modificado de Icontec, 2013.*

La seguridad de la información es la preservación de la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información, con el fin de trabajar con información fiable y de calidad, disminuyendo la posibilidad de que ocurran fallos en los procesos y disminuir la vulnerabilidad de los mismos.

La confidencialidad se refiere a la propiedad que determina que la información no esté disponible ni sea divulgada a individuos, entidades o procesos no autorizados.

La disponibilidad habla sobre la accesibilidad y la utilidad de la información, hacia un grupo de individuos, una entidad o un proceso no autorizado

La integridad de la información radica en salvaguardar la exactitud y estado completo de la información, libre de modificaciones o alteraciones por terceros, sea por accidente o de forma intencionada.

**Desarrollo:**

A continuación, se presenta un ejemplo de protocolo para la seguridad de la información de algunas actividades relacionadas con la preparación de reportes de resultados de exploración, recursos y reservas. Una buena práctica es la utilización de un formulario similar, de acuerdo con las necesidades y características del proyecto, y la información que se espera asegurar, conservando los principios de integridad, disponibilidad y confidencialidad.

*Tabla 11:* Propuesta de aseguramiento de la información en muestras de roca, sedimentos y suelo en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

<b>Activo de información física</b>	<b>Riesgo de vulneración</b>	<b>Estrategia de seguridad</b>
Muestras	Conservación de <b>Integridad</b> de la muestra por almacenamiento	Establecer requisitos estructurales para el lugar de almacenamiento (tamaño del lugar, condiciones de humedad, iluminación, temperatura, circulación de aire, etc.)
	Conservación de <b>Disponibilidad</b> de muestra por almacenamiento	Establecer la localización del almacenamiento de las muestras con el fin que se pueda acceder a ellas de manera oportuna de acuerdo con la etapa del proyecto.
	Conservación de <b>Confidencialidad</b> de la muestra por almacenamiento	Establecer protocolo de acceso y permisos para ingreso y manipulación de las muestras en el lugar de almacenamiento.

Tabla 12: Propuesta de aseguramiento de la información digital en un proyecto minero. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Activo de información digital	Riesgo de vulneración	Estrategia de seguridad
Informe de resultados de análisis por Difracción de rayos X.	Conservación de la <b>Integridad</b> de los resultados (archivos).	Establecer protocolos de almacenamiento, visualización y manipulación de los archivos enviados por proveedores con el fin que estos no sean modificados accidental o intencionalmente. Se recomienda almacenar el archivo original y generar una copia con control de cambios.
	Conservación de la <b>Disponibilidad</b> de los resultados (archivos).	Establecer protocolo de rutas de almacenamiento de información digital con permisos únicos (gestión de usuarios) para las personas involucradas en el proceso.
	Conservación de la <b>Confidencialidad</b> (archivos).	Establecer cláusulas contractuales y pólizas relacionadas con la confidencialidad de la información del proyecto para proveedores y empleados.

- **Activos de información física que se deben asegurar**

- ✓ Formatos de *loggeo*.
- ✓ Formatos de muestreo.
- ✓ Libretas de campo.
- ✓ Muestras (núcleos, rocas, pulpas y sedimentos).
- ✓ Y todos aquellos activos de información física que se consideren relevantes para el proyecto.

- **Activos de información digital que se deben asegurar**

- ✓ Fotografías.
- ✓ Mapas.
- ✓ Modelos.
- ✓ Perfiles.
- ✓ Resultados de análisis de laboratorio.
- ✓ Informes.
- ✓ Contratos.
- ✓ Y todos aquellos activos de información digital que se consideren relevantes para el proyecto.

Algunas buenas prácticas relacionadas con la seguridad de la información son:

1. Documentar estos protocolos para garantizar la trazabilidad y seguridad del proceso.
2. Socializar los protocolos, con el fin que las personas o entidades involucradas tengan conocimiento de los procedimientos y los puedan poner en práctica.
3. Auditar los protocolos, manuales o procedimientos de seguridad con el fin de verificar el cumplimiento por parte de las personas y entidades involucradas en el proyecto. (Ver Cap. 2.14 y 4.14)

**Errores comunes:**

- Tener una perspectiva de la seguridad de la información de manera informal sin tener en cuenta la importancia de la información como insumo primordial para la preparación de reportes de resultados de exploración, recursos y reservas en esmeraldas.
- No capacitar a las personas que hacen parte de las actividades de registro o manipulación de información sobre los protocolos de seguridad.
- No evaluar los riesgos en la seguridad de la información en relación con los 3 principios básicos (Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad).

**Más información:**

Instituto Nacional de Normas Técnicas - ICONTEC (2013). Certificación ISO 27001, Sistemas de Gestión de seguridad de la información. Revisado el 8 de agosto, 2020, en [https://www.icontec.org/eval\\_conformidad/certificacion-iso-27001-sistemas-de-gestion-de-seguridad-de-la-informacion/](https://www.icontec.org/eval_conformidad/certificacion-iso-27001-sistemas-de-gestion-de-seguridad-de-la-informacion/)

Ver Cadena de custodia (Cap. 2.5).

## 4.2. Interpretación geológica



### **Descripción:**

Una parte fundamental de la estimación de recursos y reservas de los depósitos de esmeraldas es la realización del modelo geológico del depósito. El **modelo geológico** representa, de manera bidimensional o tridimensional, las características topográficas, litológicas, estructurales, mineralógicas, geofísicas, y geoquímicas de un macizo rocoso.

Sin embargo, un modelo geológico, por sí solo, no es suficiente para llegar a la estimación de recursos y reservas de esmeraldas en un proyecto minero. Este modelo necesita de una descripción y una **interpretación**, con el objetivo de incrementar el conocimiento del contexto geológico en el que se encuentra la esmeralda y la génesis de su ocurrencia. Así mismo, con una adecuada recolección información y la interpretación de esta basada en el modelo geológico conceptual, es posible llegar a determinar la **geometría del depósito esmeraldífero, su continuidad en el macizo rocoso y su ubicación espacial**.

### **Desarrollo:**

Una buena práctica para la interpretación geológica es tener en cuenta las siguientes directrices:

- Una base de datos que contenga TODOS los datos que serán representados en el modelo geológico, y que serán interpretados más adelante. Se recomienda que la base de datos se encuentre validada y aprobada por la persona idónea del reporte, antes de pasar a la interpretación geológica.
- Se recomienda que la información que va a ser interpretada en el modelo geológico posea el tipo, densidad y las características suficientes para generar confianza a la persona idónea. Esto se debe a que esta persona será la responsable de las interpretaciones, inferencias y conclusiones que se deriven del modelo geológico. Si la persona idónea determina que hace falta información o que existe información errónea, es preferible subsanar estos inconvenientes, antes de pasar a la elaboración del modelo geológico. Sin embargo, es importante recalcar que el modelo geológico y su interpretación están en **constante cambio**, debido a que, a medida que avance el proyecto minero, se va generando más información para apoyar el modelo. **Por otra parte, entre más información sea recolectada, mayor precisión y exactitud tendrá el modelo geológico resultante, aunque siempre existirá un grado de error e incertidumbre en este.**
- En el caso de las esmeraldas colombianas, debido a su génesis y características, los **datos estructurales** (zonas de mayor deformación), **geoquímicos y mineralógicos** (carbonatos y relación illita – paragonita), **geofísicos** (zonas de fracturas propensas a la precipitación de carbonatos) y los datos de **perforaciones** (continuidad y geometría del depósito).

- Para elaborar el modelo geológico (Figura 29), se recomienda utilizar un software adecuado para el proceso, estos pueden ser de uso libre o licenciados.

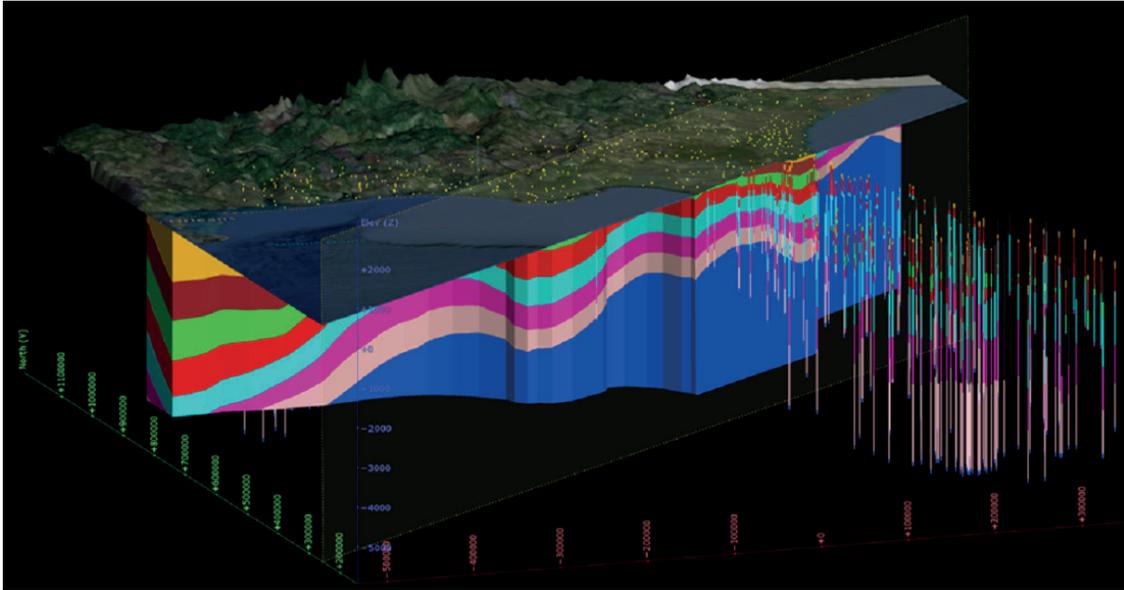


Figura 29: Ejemplo de modelo geológico realizado con software. Fuente: Seequent.

#### **Errores comunes:**

- Elaborar un modelo geológico con datos insuficientes incrementa la incertidumbre.
- Desconocer alguna de las variables (geológicas, estructurales, geoquímicas, geofísicas, mineralógicas, geotécnicas) al momento de realizar el modelo
- Utilizar variables parcializadas que generan un sesgo en los datos
- No tener un control de QA/QC sobre los datos de laboratorio, incrementando la incertidumbre en los resultados

#### **Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. doi:10.1007/978-3-319-58760-8

Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral resource estimation (1st ed.). Dordrecht, Germany: Springer.

### 4.3. Técnicas de estimación y modelamiento



#### **Descripción:**

Los modelos geológicos son representaciones gráficas en dos o tres dimensiones de los cuerpos geológicos *in situ*. El modelo geológico define los volúmenes de roca en los que la variable a estimar tenga un comportamiento homogéneo, permitiendo relacionar las unidades en diferentes tipos de modelos: litológicos, de alteración, mineralógicos, entre otros. También permite hacer una buena representación de la geometría del depósito cercana a la realidad.

La creación del modelo geológico es uno de los pasos de mayor relevancia y responsabilidad de la estimación de recursos y reservas minerales. Los conocimientos que se poseen sobre la estructura, la continuidad de la ley y la geología se interpretan en forma de dominios o zonas geológicamente homogéneas, creándose un modelo geológico. De esta manera, la información ingresada representa la posición y geometría del depósito (Popoff, 1966). La interpretación del modelo geológico es una etapa crítica en la estimación de recursos y las reservas minerales, de manera que, varios de los errores cometidos en el proceso de estimación están relacionados con la aplicación incorrecta de los principios geológicos. Entre estos errores se encuentran el trazado de límites erróneos del yacimiento mineral o la incapacidad de generar un cuerpo lo suficientemente continuo que cumpla con los requerimientos de la minería. Estas dificultades dependen de la calidad y la cantidad de datos disponibles en el momento de realizar la estimación y con la variabilidad propia de la mineralización que se estudia.

El modelo geológico es clave en la estimación de recursos, por tal motivo, el modelo geológico será más confiable a medida que se cuente con mayor cantidad de muestras disponibles, una calidad alta en los análisis y una definición en los controles geológicos de la mineralización encontrada en el depósito.

#### **Desarrollo:**

Para estimar y modelar los recursos minerales, una serie de buenas prácticas tener en cuenta son:

#### **Objetivo del modelamiento de recursos**

- Conocer el volumen de mineral y su disposición espacial en el yacimiento.
- Incrementar el conocimiento de la geometría del cuerpo mineral.
- Correlacionar el modelo con los diferentes resultados de las perforaciones.
- Dar a conocer a los directivos de la empresa el potencial económico del yacimiento.

#### **Persona idónea**

El profesional con experiencia encargado del proyecto que estime los recursos debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- Confianza y continuidad del modelo geológico.

- Representatividad y exactitud de los datos de muestreo considerando que estos datos alimentan constantemente el modelo.
- Confianza y continuidad del modelo de mineralización (geometría del depósito).
- Confianza asociada con las estimaciones de tonelaje y ley.
- Elaboración campañas de reconciliación a corto, mediano y largo plazo.
- Contar con personal con los conocimientos para analizar e interpretar la información obtenida para estimar recursos y generar modelos geológicos adecuados. En caso de no tenerlo entre el grupo técnico, se sugiere contratar a una persona o empresa con estas capacidades técnicas.

### **Métodos de estimación tradicionales. Polígonos, inverso de la distancia, media aritmética y MEASM.**

Existen diferentes métodos de estimación de recursos: los métodos clásicos de estimación y los modelos asistidos por software minero. Los métodos clásicos de estimación han sido desarrollados y utilizados desde los principios de la minería hasta nuestros días. Dichos modelos se basan en procedimientos manuales y empíricos donde los principales parámetros son estimados a partir de la media aritmética, del inverso de la distancia y en fragmentar el perfil en figuras geométricas simples (método del polígono). Por otra parte, los métodos de estimación asistidos por software mineros (MEASM) realizan la estimación por métodos geoestadísticos. Los MEASM se fundamentan en procedimientos matemáticos de interpolación definidos a partir de información espacial y estadística presente en los datos. Los MEASM surgieron con el desarrollo de los computadores y con la elaboración de tecnologías y programas de software incorporados a las labores mineras como herramientas que complementan y facilitan la estimación de los recursos (Estévez-Cruz *et al.* - 2005).

- **Media aritmética**

Dado un conjunto de  $n$  números  $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ , se define la media aritmética como:

$$\underline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad \text{Fórmula 1}$$

Por ejemplo, la media aritmética de los valores  $\{3,4,5\}$  es igual a:

$$\underline{x} = \frac{3 + 4 + 5}{3} = 4$$

- **Método de los polígonos**

Fórmula de área de polígonos, se suman todas las áreas, Se basa en asignar a cada punto del espacio la ley del dato más próximo.

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad \text{Fórmula 2}$$

- **Inverso de la distancia.**

Para estimar la ley media de un conjunto S se promedian las leyes de los datos que están dentro de S.

Esto se consigue al ponderar las leyes por  $1/d_i^\alpha$ , ( $\alpha = 1, 2, \dots$ ;  $d_i$  = distancia entre la muestra y el centro de gravedad de S).

Si  $\alpha = 1$  se tiene el inverso de la distancia (ID).

Si  $\alpha = 2$  se tiene el inverso del cuadrado de la distancia (ID2).

### Elementos de los métodos actuales de estimación

Para estimar recursos y reservas, es importante seguir estándares que aseguren una acertada definición de las categorías para obtener alto nivel de confianza en la estimación. Deben combinarse los criterios geológicos, geométricos y geoestadísticos, de tal forma que se pueda obtener una clasificación acertada.

- **Criterio geológico:** Se basa en la interpretación del marco geológico y su relación con la continuidad y caracterización de la mineralización.
- **Criterios geométricos:** Se utilizan para definir lo que se considera razonablemente estimado, por ejemplo, limitar la extensión de los recursos inferidos. Una práctica habitual es definir una distancia máxima de extrapolación, la cual, en cualquier caso, debería también considerar el grado de continuidad espacial de las leyes. Uno de los inconvenientes de los criterios puramente geométricos, es que no consideran las características de continuidad espacial de las leyes.
- **Criterios geoestadísticos:** La Geoestadística es resultado de la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales. Esta ciencia se ha desarrollado y consolidado en los últimos 40 años como ciencia aplicada, dando respuesta a necesidades prácticas y concretas. Se ha extendido en la actualidad a otros campos de las Ciencias Naturales que presentan problemas de estimación.

La cantidad de cálculos que implican estos métodos hace imprescindible la utilización de software especializado para su práctica y desarrollo. Estos programas implementan la aplicación de los métodos geoestadísticos de forma muy variada, ofreciendo posibilidades en algunos casos limitadas para los especialistas en el tema, fundamentalmente en la determinación de los modelos que describen la continuidad espacial y en el uso del *kriging* como interpolador. Los alcances y limitaciones de los softwares son los criterios básicos de selección a discreción de cada compañía o del profesional a cargo de la modelación del depósito

Tabla 13: Métodos de estimación de recursos tradicionales y actuales. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Tipo de método	Nombres
Métodos tradicionales de estimación de recursos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Media aritmética.</li> <li>● Polígonos.</li> <li>● Inverso de la distancia.</li> </ul>
Métodos actuales de estimación de recursos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Geoestadísticos.</li> <li>● Modelos tridimensionales.</li> </ul>

Los métodos tradicionales de estimación por lo general son empíricos, no tienen en cuenta la continuidad de las leyes y tampoco consideran el error asociado a la estimación ya que entregan un único valor. La importancia de la estimación del error radica en que cuantifica la calidad de la estimación y puede indicar la eventual necesidad de hacer más perforaciones y obtener más datos. Normalmente, estos métodos generan un fenómeno conocido como sesgo condicional, el cual se traduce en una sobrestimación de leyes altas o una subestimación de las leyes bajas. (Alfaro, 2007).

Se debe prestar mucha atención cuando se trabaja con los métodos computacionales, considerando la incertidumbre proveniente de cada uno de estos criterios. En el caso que se utilice un solo criterio, no se tendría en cuenta el resto de las variables existentes en el yacimiento. Otra desventaja en los modelos computacionales está en la gran cantidad de datos requeridos para obtener un buen resultado.

### **Metodología para estimación de recursos**

La estimación de recursos mineros debe ir acompañada con una correcta práctica minera. La estimación inicia con la recolección sistemática en los componentes de la base de datos, el modelo geológico, la estimación de tenores y la clasificación de recursos. La información base debe ser documentada y clasificada para que se pueda adherir al modelo. Las muestras deben tener un control de información que sea fácil de seguir, debido a que el proceso de validación es la forma de fortalecer las estimaciones.

La posición espacial de la muestra y los valores de los elementos deben ser probables para poder emplear métodos geoestadísticos y entender la distribución espacial de diferentes representaciones de interés. Sin embargo, aunque la estimación es una aproximación a la realidad, los modelos deben ser cuidadosos para ser lo más precisos y sin sesgos adicionales.

En los siguientes párrafos se hará una descripción de los elementos que integran una estimación de recursos para esmeraldas y así como una serie de buenas prácticas para poder reducir el riesgo exploratorio y la incertidumbre en el proceso.

### **Manejo adecuado de las bases de datos**

Un buen sistema de recopilación de información debe ser flexible y fácilmente actualizable de acuerdo con las necesidades del proyecto minero. Este sistema de recopilación corresponde a las bases de datos, insumo fundamental en los modelos geológicos y por consiguiente en la estimación de recursos y reservas. Las bases de datos no son estáticas y deben ser seguras, eficaces, fáciles de integrar y permitir una revisión expedita, tanto por el personal que la genera como por auditores externos.

Las buenas prácticas en el uso de las bases de datos deben ser consistentes, porque son una herramienta que permite revisar y validar los modelos; por lo tanto, toda la información que se ingrese debe ser trazable y los resultados verificables, trazables y repetibles.

## Modelo geológico

Los modelos geológicos, son representaciones gráficas de los cuerpos geológicos *in situ*. Se obtienen a partir de las interpretaciones geométricas que el geólogo de campo hace con los loggeos de la perforación exploratoria. Es fundamental integrar toda la información geológica recopilada de las perforaciones (numérica y gráfica) y definir un área de trabajo. Los modelos geológicos llevan consigo varias líneas de trabajo, empezando por la obtención de los datos a partir de la información de los testigos de roca obtenidos, la descripción correspondiente (*loggeo*) de estos núcleos, que incluyen la descripción geológica, mineralógica, estructural, tipos de alteración y geotecnia. También debe irse procesando la información de los ensayos químicos, para entender la distribución de los tenores en la roca y de elementos químicos que apoyen las siguientes fases de exploración.

## Dominios geológicos

Los dominios geológicos consisten en un grupo o sección del modelo que se puede separar geológica y estadísticamente de manera aceptable. Es una decisión fundamental porque repercute en las siguientes etapas de estimación. Debe tenerse en cuenta que los dominios no están relacionados únicamente a la litología, sino también a los efectos estructurales o el efecto de la meteorización. El comportamiento de las leyes debe ser tenido en cuenta para la definición de dominios, de allí que los dominios de estimación no deban tener variaciones estadísticas considerables.

A la hora de hacer una construcción de dominios, se sugiere considerar los siguientes puntos:

1. Litología.
2. Estratigrafía.
3. Efecto de las alteraciones o meteorización.
4. Mineralogía.
5. Geología Estructural.
6. Distribución espacial de tenores.

## Hipótesis y limitaciones de los modelos

Tomar todo el depósito para hacer un modelo o una estimación de recursos carece de sentido. Las muestras y perforaciones son solo una parte del depósito y a partir de allí, junto con la información geológica, geofísica, topográfica y de datos históricos, se organizará el modelo geológico. Lo anterior sugiere asumir ciertas condiciones que se pueden estar generando en el depósito, por ello corresponde a la persona idónea realizar las deducciones y el uso de parámetros para desarrollar la estimación.

Aunque se reconozca la dirección de una mineralización, se debe asumir su longitud y cambios de diámetro entre perforaciones, o los volúmenes de las zonas mineralizadas a partir de la información de perforación y los tamaños anteriormente reconocidos en donde hubo producción.

Los modelos presentan limitaciones; las muestras de rocas recolectadas de las perforaciones diamantinas en físico solo equivalen al diámetro del testigo, por tal motivo hay que darle a esta muestra un contorno o espacio en el que se pueda interpolar. Además de la distribución con aleatoriedad como ocurre con la esmeralda.

### Construcción del modelo de recursos minerales.

El éxito de los proyectos mineros tiene fuerte relación con la calidad de la estimación de recursos indicados y medidos realizados a partir de la información geológica generada durante las campañas de exploración, plasmadas en un elemento tangible como el modelo de bloques. Esta estimación, como cualquier estimación basada en un número limitado de muestras, está sujeta a variaciones o errores respecto al valor real. De aquí precisamente surge la necesidad de analizar los factores modificadores y no modificadores para establecer estimaciones de reservas probadas y probables que reflejen la realidad de la mina, el modelo geológico del yacimiento sobre la base del conocimiento existente y la experiencia previa obtenida en depósitos similares. Tener un método de estimación adecuado surge de la exigencia de mercados internacionales que implica reportar datos cada vez más exactos y así evitar variaciones al momento de plantear los objetivos de producción y estimaciones financieras, que capten capitales extranjeros para la inversión en nuevos proyectos mineros. De allí la necesidad de estimar reservas probadas y probables con un grado de confiabilidad elevado a fin de salvaguardar las inversiones y hacerlas sostenibles en el tiempo. Un error en determinar de manera precisa la estimación de reservas probadas y probables puede ser perjudicial para la organización y dañar la confianza inversionista y el retorno de inversión. En la Figura 30 se muestra un esquema procedimental base, el cual se recomienda sea que sea tenido en cuenta a la hora de estimar los recursos minerales del proyecto.

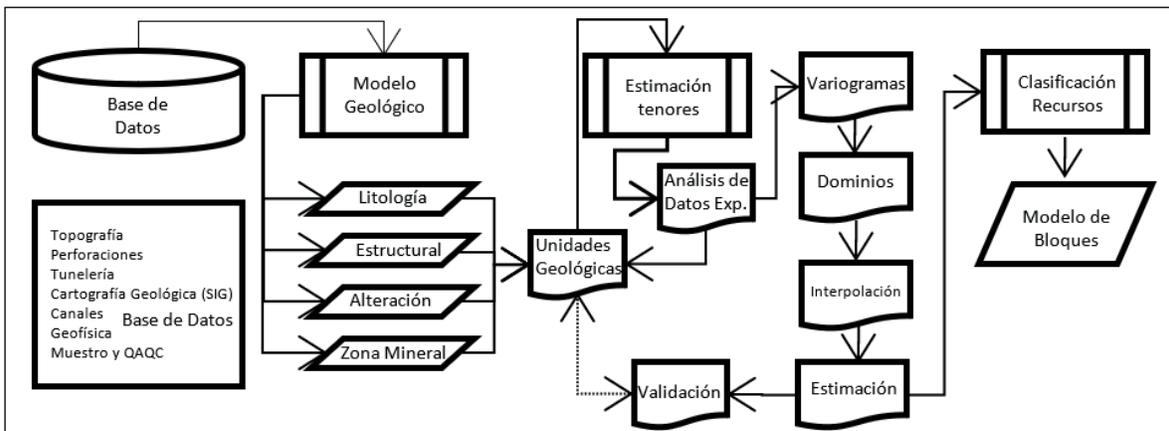


Figura 30: Esquema de clasificación de recursos (modificado de Geoestima, 2018)

### Riesgo e incertidumbre

La estimación es una herramienta útil para caracterizar el potencial de un yacimiento minero y su aporte es amplio en los posteriores procesos. Sin embargo, debido a las suposiciones que deben realizarse a la hora de construir el modelo y la variación de la distribución de las esmeraldas a lo largo del yacimiento, hace que se tengan diferencias en las reconciliaciones de producción. Rossi y Deutsch (2014) afirman que “el no reconocer e intentar mitigar los riesgos asociados con la estimación de recursos y la planificación minera puede llevar a pérdidas importantes de capital de inversión, o a costos de oportunidad significativos”. Es fundamental reconocer los factores de riesgo y hacer lo posible por reducirlos generando insumos fuertes en la estimación de recursos.

La incertidumbre es otro factor clave en la estimación de recursos y se puede generar por diferentes variables: la calidad de la información, el número de perforaciones realizadas, la claridad del establecimiento de la zona mineralizada, la identificación de cantidad y calidades de las gemas extraídas en las perforaciones, el quilataje por tonelada utilizado para el estudio o la recuperación de gemas por el método de extracción.

Una forma de reducir la incertidumbre en la exploración y extracción de esmeraldas es tener una estimación *in-situ* de la geología y llegar a establecer las zonas mineralizadas con su ubicación espacial.

Para la estimación de recursos minerales, a medida que los recursos van reduciendo su incertidumbre pasan de Recursos Inferidos, a Recursos Indicados y finalmente a Recursos Medidos (Figura 31). La reducción de la incertidumbre se da a partir del aumento del conocimiento que arrojen las exploraciones en el depósito de esmeraldas.

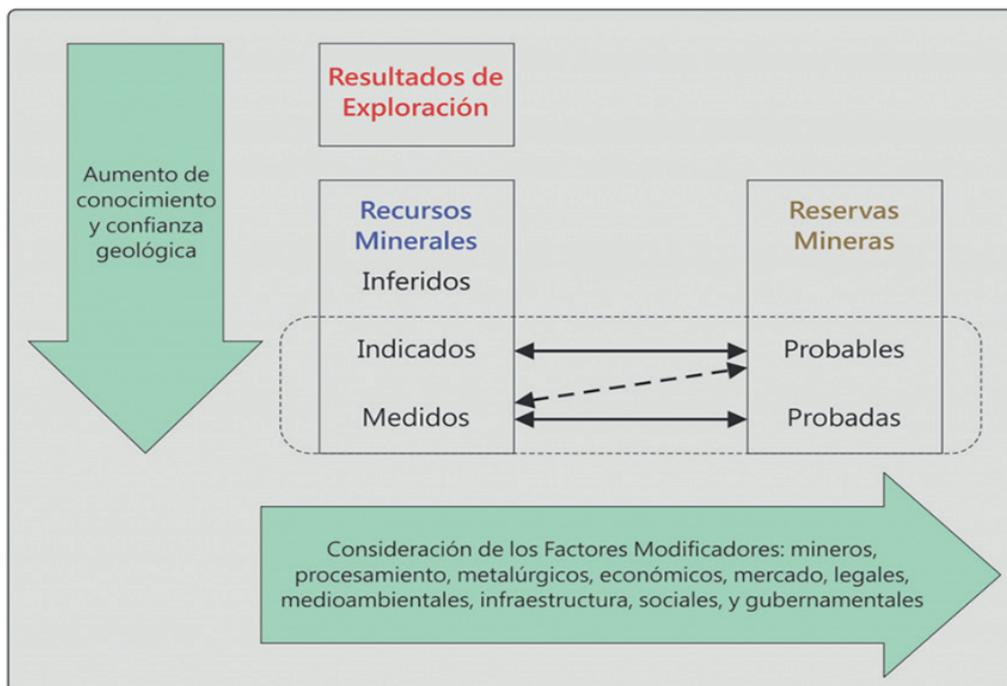


Figura 31: Diagrama de paso de Recursos a Reservas mineras (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2018).

**Errores comunes:**

- Desconocer el valor de tener una persona idónea para generar las estimaciones de recursos y generación de modelos geológicos.
- No contar con datos de calidad para alimentar el modelo geológico.
- No actualizar los modelos geológicos ni las estimaciones de recursos.

### **Más información:**

Alfaro, M. A. (2007, Julio 1). Estimación de Recursos Mineros. Revisado Julio 25, 2020, en [http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO\\_Cours\\_00606.pdf](http://cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf)

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Estévez-Cruz, E., Gomez-Gonzalez, O., & Cuador-Gil, J. Q. (2005). Modelaje geológico y de recursos del yacimiento pastelillo utilizando el krigeaje de indicadores. *Minería y Geología*, 21(2). Revisado en Julio 25, 2020, en <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223516049001.pdf>

Geoestima, 2018. Curso de estimación de recursos utilizando Leapfrog Geo. Santiago de Chile.

Popoff, CC (1966). Cálculo de reservas de depósitos minerales: principios y métodos convencionales. [Washington, DC]: Departamento del Interior de los Estados Unidos, Oficina de Minas.

Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral resource estimation (1st ed.). Dordrecht, Germany: Springer.

#### **4.4. Metales equivalentes u otras representaciones combinadas de múltiples componentes**



### **Descripción:**

En Colombia se han determinado dos zonas o distritos mineros esmeraldíferos denominados: Cinturón Esmeraldífero Oriental y Cinturón Esmeraldífero Occidental. En estos cinturones, se han realizado diferentes estudios acerca de las características de la esmeralda (génesis, ambiente de formación, geoquímica, mineralogía, etc.)

Sin embargo, el estudio de los elementos y minerales acompañantes a la esmeralda ha sido reducido. Es probable que ciertos minerales puedan tener también interés económico para el proyecto minero. Por esta razón se recomienda llevar a cabo estudios de caracterización de ciertos minerales que se encuentran en el ambiente de formación de las esmeraldas colombianas.

El ambiente de formación de las esmeraldas colombianas se ha catalogado como un ambiente anóxico, que sufrió grandes procesos de enterramiento, a temperaturas y presiones altas. Gracias a esto, se pueden ver minerales que sugieren etapas post-diagenéticos, llegando a procesos metamórficos. Inclusive, en algunas zonas del cinturón esmeraldífero occidental se pueden apreciar rocas con lustre, característico de las pizarras.

De acuerdo con lo anterior, según varios estudios de caracterizaciones mineralógicas de los cinturones esmeraldíferos, se han podido conocer minerales de tierras raras que se encuentran en la misma etapa mineralizante que las esmeraldas, manteniendo una relación genética con los fluidos que transportan el cromo y vanadio, y que también transportan estos elementos de tierras raras. Los elementos de tierras raras (escandio, itrio, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio) tienen concentraciones promedio en la corteza mucho menores a elementos como el cobre, plomo, oro, plata o platino. No pueden ser encontrados totalmente puros en la naturaleza, por lo que su ocurrencia se produce en minerales

### Desarrollo:

- **Elementos de tierras raras**

En algunas secciones del Cinturón Esmeraldífero Occidental, se pueden encontrar minerales de tierras raras como:

- **Parisita:** Fluorurocarbonato de calcio y cerio ( $\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$ ). La parisita es uno de los principales minerales con alto potencial económico en los depósitos de tierras raras (Figura 32).

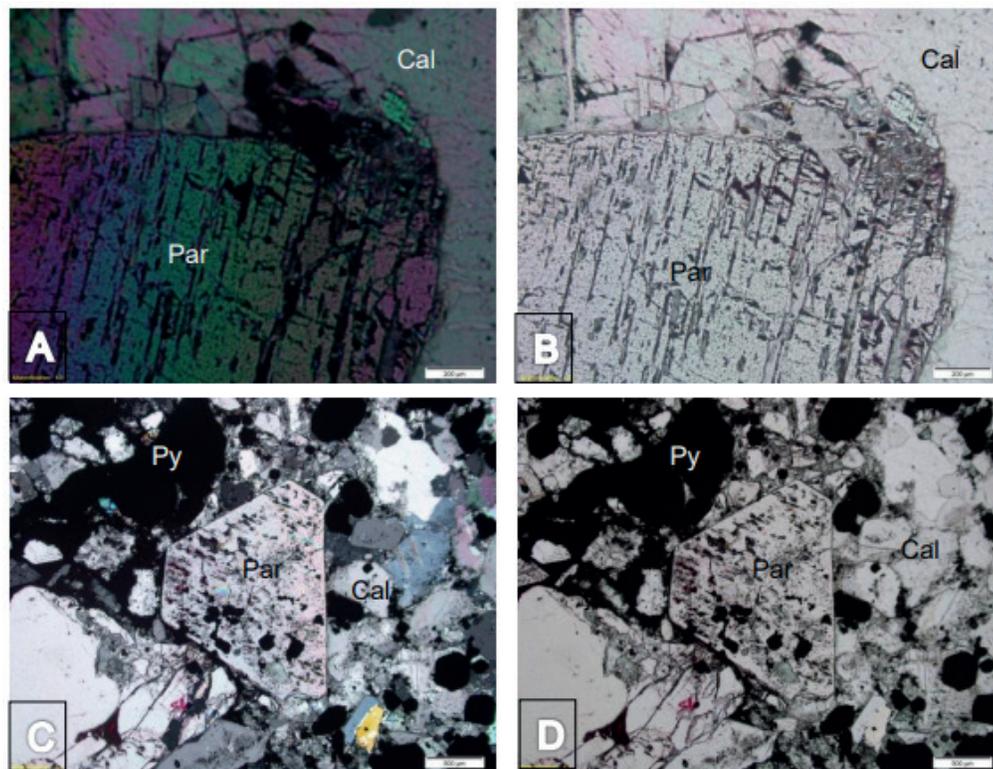


Figura 32: Cristales de parisita (par) en secciones delgadas de muestras de rocas del cinturón occidental. A y B) cristal de parisita en corte longitudinal asociado a calcita (cal). C y D) cristal de parisita en corte perpendicular al eje C asociado con

calcita y pirita (Py). Tomado y modificado de: Verbel, 2017. *Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas*

- Monacita: Fosfato de tierras raras. Es la principal mena de tierras raras, junto con la bastnasita. Existen monacitas de **cerio, lantano, neodimio, samario**, etc. Su fórmula química es  $XPO_4$  siendo la "X" el elemento de tierras raras.
- Bastnaesita: Fluorurocarbonato de **cerio, lantano o itrio** (Figura 33). Su fórmula química es  $(Ce,La,Y)CO_3F$ .

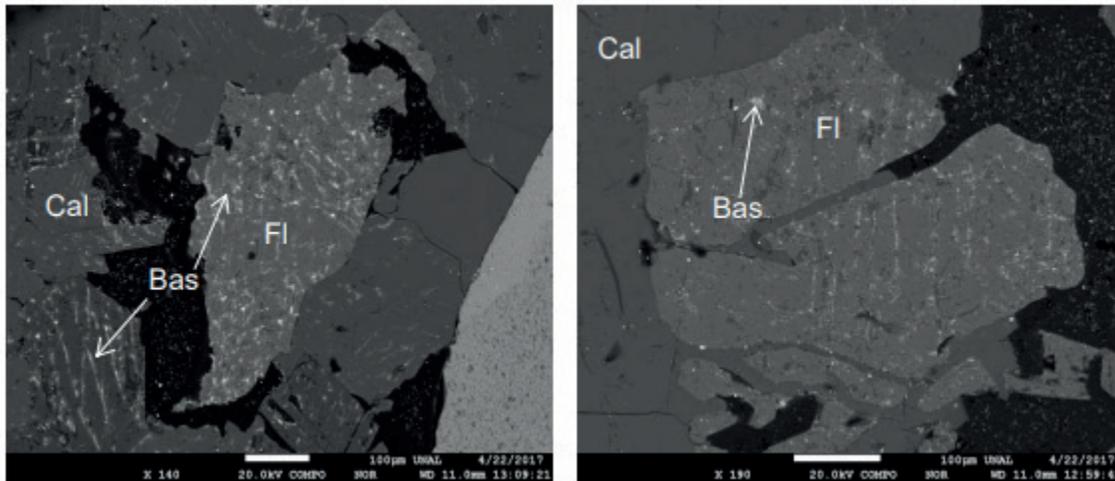


Figura 33: Imagen de microsonda electrónica de secciones de rocas del cinturón esmeraldífero occidental. Se observan cristales de calcita (Cal) y fluorita (Fl) con exsoluciones de bastnaesita (BaS). Tomado y modificado de: Verbel, 2017. *Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas*.

- **Otros minerales**

- **Euclasa:** Especie mineral de bastante rareza, es un silicato hidroxilado de aluminio y berilio (Figura 34). Su fórmula química es  $BeAlSiO_4(OH)$ . Se halla en venas o brechas hidrotermales del Cinturón Esmeraldífero Oriental, en las regiones de Chivor y Gachalá.



Figura 34: Ejemplar de Euclasa. Imagen tomada de: <https://kaiajoyasuruguay.blogspot.com/2019/07/la-euclasa.html>

Con el fin de poder determinar la posible ocurrencia de estos minerales dentro de un proyecto minero de esmeraldas, así como establecer una posible viabilidad económica de estos, se pueden realizar estudios tales como:

- Trabajo de campo dentro del título minero, enfocado en identificar zonas donde se presenten texturas hidrotermales (brecha, fragmentos de roca triturados y envueltos en una matriz o un fluido) , ya que, según estudios, son el tipo de texturas donde se precipitan las esmeraldas, acompañadas de minerales de tierras raras. Una vez se localicen estas zonas, se puede realizar un programa de recolección de muestras para laboratorio.
- Análisis mineralógicos y de mineralogía de menas, con el objetivo de realizar una caracterización microscópica de minerales y sus texturas. Estos pueden incluir la elaboración de secciones pulidas, delgadas, doblemente pulidas.
- Análisis geoquímicos de las muestras para conocer sus composiciones mineralógicas y elementales. Se recomienda realizar, microsonda electrónica, microscopía electrónica, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X
- Integración, correlación e interpretación de todos los datos recolectados para realizar análisis por medio de diagramas, modelamiento y geoestadística.

Después de obtener un modelo de estimación de concentraciones de estos minerales, es posible determinar si es posible extraerlos económicamente. Para esto, se recomienda:

- Ingresar todos los datos de los procedimientos mencionados anteriormente en una base de datos, discriminados, georreferenciados y validados por el profesional con experiencia encargado de las estimaciones.
- Conocer los datos sobre los costos de los procesos de extracción y precios de venta de estos minerales.
- Reportar cualquier evidencia macroscópica de alguno de estos minerales para un posterior análisis (peso, dimensiones, color, inclusiones, fracturas, etc.)

#### ***Errores comunes:***

- Pasar por alto, sin una revisión exhaustiva, toda la información resultante de los análisis mineralógicos y geoquímicos realizados. Estos análisis, generalmente, traen información relevante sobre la ocurrencia de otros minerales que pueden llegar a ser de importancia económica.
- El modelo geológico generado, puede mostrar un gran potencial que tampoco puede ser menospreciado. Este modelo, además de mostrar la ubicación espacial del depósito de esmeraldas, puede revelar información acerca de ciertas anomalías geoquímicas o mineralógicas, que pueden hacer referencia a estos, u otros tipos de minerales con potencial económico.

### **Más información:**

RUBIANO, M. (1990): La Euclasa en la región de Chivor y su significado en el origen de las esmeraldas colombianas.- Geol. Colombiana, 17, pp.239-241, 3 figs., Bogotá.

VERBEL, A. (2017): Mineralogía de elementos de tierras raras en las mineralizaciones esmeraldíferas colombianas. Tesis de Maestría - Universidad Nacional, Bogotá

### **4.5. Tenor de corte**



#### **Descripción:**

El **tenor** se puede definir como una **relación** existente entre la masa del mineral de interés y la masa de la mena. La **mena** hace referencia al conjunto de minerales que poseen algún interés económico en yacimiento.

El **tenor de corte** es el **grado** mínimo requerido para que un mineral o metal (en este caso la esmeralda) sea extraído (o procesado) económicamente, es la ley donde los ingresos obtenidos por los productos equivalen a los costos de extracción del mineral, llegando al punto de equilibrio. En este caso se presentan dos escenarios:

- 1. Material que se encuentre por encima de este grado = mineral útil aprovechable.**
- 2. Material que se encuentre por debajo de este grado = estéril.**

Existe una amplia gama de unidades para expresar esta ley, entre las cuales se tienen:

- gramos por tonelada (g/t)
- quilates por tonelada (ct/t)
- miligramos por tonelada (mg/t)
- dólares por tonelada (\$/t)

#### **Definiciones importantes:**

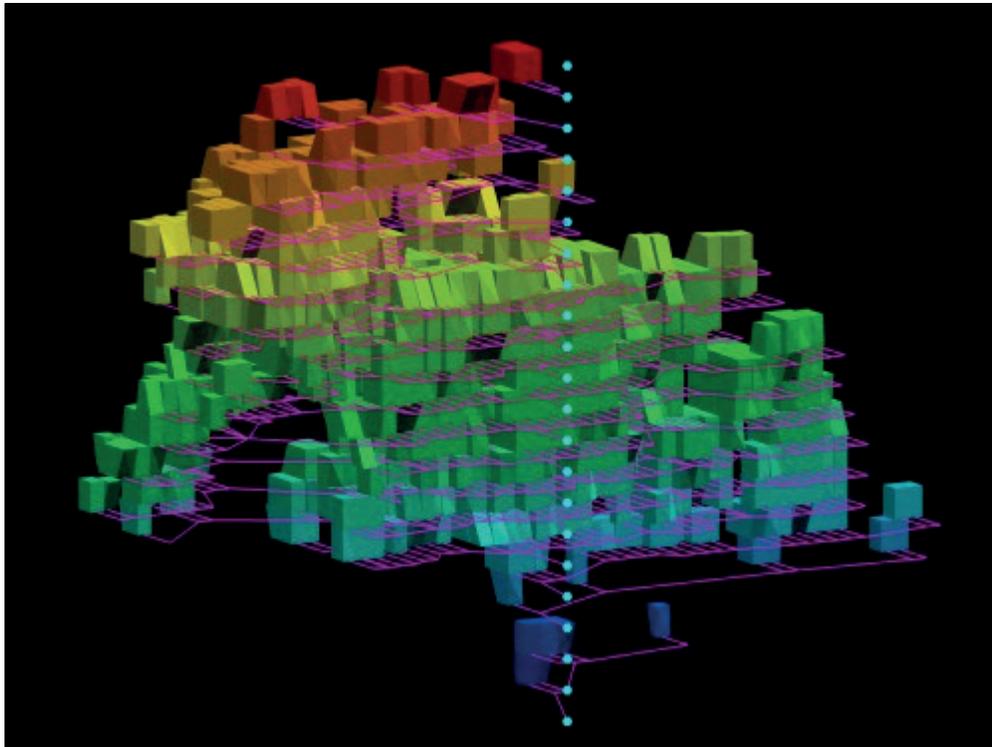
- **Gramo:** Unidad de masa del sistema métrico decimal. Se define como la milésima parte del kilogramo.
- **Tonelada:** Unidad de masa del sistema métrico decimal. Equivale a 1000 kilogramos (kg) o a 1'000.000 de gramos
- **Miligramo:** Unidad de masa del sistema métrico decimal. Se define como la milésima parte de un gramo
- **Quilate:** Unidad de masa que se utiliza, generalmente, para cuantificar la masa de gemas y perlas. Equivale a 200 miligramos, o la quinta parte de 1 gramo (0,2 gramos). Por lo tanto, 5 quilates equivalen a un gramo.

De acuerdo con lo anterior, es posible concluir que el tenor de corte es una medida de concentración del mineral objetivo. Por lo tanto, el tenor es una manera de expresar el recurso. Es importante recalcar que el tenor de corte es variable y se debe ir adaptando a la situación económica en el tiempo (gastos de mina, precio del mineral, etc.)

### **Desarrollo:**

El tenor de corte es pieza fundamental en el plan de producción de esmeraldas en un proyecto minero. La información que permite encontrar el tenor de corte incluye información de exploración, estimación de recursos, análisis financieros, costos de operación y los estudios de los factores modificadores y factores mineros.

Una manera de definir el tenor de corte es usar un **modelo tridimensional de bloques**. Para esto, es indispensable conocer la **continuidad**, la **geometría del depósito** y la **localización espacial** del recurso. El modelo de bloques se realiza por medio del modelo geológico diseñado en la etapa de exploración y estimación del recurso (Figura 35).



*Figura 35: Modelo de bloques 3D para determinar el tenor de corte. Tomado de: Maptek Vulcan 9.1*

El modelo de bloques es una manera de representar el depósito mineral. La unidad más pequeña de este modelo es el **bloque**. Cada bloque debe tener su ubicación espacial, tenores, tonelaje y litología. Con el tenor de corte, se puede determinar cuáles bloques pertenecen a mineral, y cuáles bloques pertenecen a estéril. Adicionalmente, se requiere conocer la densidad de la roca para poder convertir el volumen a masa. En la Tabla 14 se presenta un resumen con las densidades medias más relevantes de los depósitos esmeraldíferos de Colombia.

Tabla 14: Densidades medias de rocas sedimentarias. Tomado y modificado de Clark, S. P. (1966)

Densidades medias de rocas sedimentarias		
Roca	Densidad media en g/cm <sup>3</sup>	Rango de densidad en g/cm <sup>3</sup>
Arenisca	2,32	1,61-2,76
Shale (lutita)	2,42	1,77-2,45
Caliza	2,54	1,93-2,90
Dolomita	2,70	2,36-2,90

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones para el proceso de determinar el tenor de corte del proyecto minero.

Para más facilidad en el manejo de los datos de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades, y debido a que se puede encontrar esmeralda de diferentes calidades, es recomendable expresar el tenor en gramos por tonelada (g/t), aunque tampoco estaría mal expresarlo en quilates por tonelada (ct/t)

Al momento de establecer el tenor de corte, se recomienda tener claro los parámetros del precio promedio del quilate la esmeralda en el mercado, el costo de operación de la mina, el costo del tallaje de la esmeralda, el costo del tratamiento de la esmeralda (en caso de que sea necesario) y el porcentaje de material que se recupera de la esmeralda después de ser tallada. Una fórmula de tenor de corte aplicada a esmeraldas puede ser la siguiente:

$$V_2 = \frac{(\text{costos Mina} + \text{Costos Tratamiento}) * 100}{[(\text{precioEsmeralda} - \text{Costo Tallado}) * \% \text{ mineral Recuperado}]}$$

Fórmula 3

#### **Errores comunes:**

- No tener claridad acerca del modelo geológico del título minero, donde debe estar representado la continuidad del depósito, su geometría y su ubicación espacial, acompañado de las características litológicas y estructurales de este.
- Tomar datos generales de densidad de roca de la literatura y no validar la información propia del yacimiento.

### **Más información:**

Agencia Nacional de Minería - Glosario Minero

Clark, S. (1966). Handbook of Physical Constants. Boulder, CO: Geological Society of America.

Pohl, W. (2011). Economic geology: Principles and practice: Metals, minerals, coal, and hydrocarbons - introduction for formation and sustainable exploitation of mineral deposits. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.

Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín: Notas de clase de la asignatura Concentración de Minerales.

## **4.6. Densidad**



### **Descripción:**

La densidad es un insumo importante en los procesos de estimación de recursos y reservas, planeación y cálculo de costos de un proyecto minero. La indicación de los quilates por unidad de masa, el diseño de la mina, o los costos de transporte del material también están asociados a la medición de densidad.

La densidad no es constante en las rocas, debido a que condiciones como cambio en los minerales, fallamiento o ingreso de agua en el sistema varían la masa por unidad de volumen. Por lo tanto, se sugiere medir metódicamente la densidad de diferentes dominios geológicos para reducir la incertidumbre de densidad y en consecuencia tener una mejor aproximación en la estimación de recursos y reservas.

### **Desarrollo:**

La densidad es un insumo fundamental en la generación de estimación de recursos y reservas y puede variar por varias causas. Uno de los cambios en la densidad está asociado al dominio geológico en que se realice la medición y en la variación de los minerales dentro del mencionado dominio. La densidad también varía por otros factores como cambio en la porosidad, diagénesis (o consolidación), alteraciones geológicas, ingreso de agua al sistema o fracturamiento. Los cambios de densidad deben tenerse en cuenta en todos los productos que involucren la densidad como parte del cálculo, tales como estimación de recursos, reservas o el planeamiento minero. Por tal motivo se sugiere realizar varias medidas de densidad, de tal manera que la información recolectada permita tomar decisiones en procesos futuros.

Una buena práctica radica en medir regularmente la densidad, tanto en material seco como húmedo, porque estas condiciones pueden aumentar la masa del material a extraer, principalmente cuando hay presencia de arcillas o material meteorizado; debido a que la humedad varía la densidad y deben emplearse mayores recursos en el proceso de extracción.

### **Importancia de la densidad en las técnicas de explotación.**

Los resultados de las pruebas de densidad, relativamente sencillas, ofrecen información crucial para el éxito de una operación de minería. Las pruebas de densidad aportan información que puede ser útil para conocer con más detalle:

- Métodos óptimos de procesamiento eficaz del mineral.
- Dimensionamiento adecuado de los equipos de procesamiento.
- Costos de transporte de material a botaderos.
- Selección de los explosivos adecuados a utilizar basados en la densidad del material.

En la etapa de explotación se tiene en cuenta directamente la densidad para llevar a cabo la estimación de reservas. Este procedimiento consiste en establecer de forma numérica, los principales parámetros de la explotación a saber: tonelaje (volumen del material explotable), quilates por tonelada y el valor económico total de estas reservas. Para ello, se parte de datos hallados mediante perforaciones y tunelería exploratoria, los cuales se extrapolan a datos futuros multiplicados por la potencia para obtener volúmenes, o multiplicados por la densidad y por los contenidos (para obtener el quilataje del mineral).

### **Técnicas más comunes de medición de densidad**

La densidad es comúnmente determinada por mediciones directas en muestras de roca en estado húmedo y en estado seco. La diferencia en los pesos proporciona el volumen de la muestra y al relacionar ese volumen con el peso de la roca seca, se obtiene la densidad de la roca seca.

La densidad es un factor variable, por lo que es necesario medir varias muestras de cada tipo de roca para obtener una densidad confiable.

Las rocas más comunes tienen densidades entre 1.60 y 3.20 g/cm<sup>3</sup> (Dentith y Mudge, 2014). La densidad de una roca depende tanto de su composición mineral como de su porosidad. En el caso de las rocas sedimentarias, que corresponden a la roca caja en los depósitos de las esmeraldas colombianas, la porosidad es el mayor factor de variación de densidad.

Otra manera de medir la densidad es utilizando un registro eléctrico de pozo tipo densidad gamma-gamma al momento de realizar una perforación corazonada.

### **Metodología para determinar la densidad de las rocas.**

El método más usado para hallar la densidad de la roca seca es el de la balanza hidrostática (Hernández-Gutiérrez *et al.*, 2013). Consiste en secar la muestra en una estufa en donde se determina la humedad (W) siguiendo los pasos a continuación:

- Se deja secar la muestra en una estufa para extraer y calcular la humedad (W).
- Dejar enfriar la muestra para pesarla posteriormente ( $M_1$ ).
- Calentar parafina para recubrir la muestra.

- Sumergir la muestra en parafina hasta recubrirla por completo.
- Obtener el peso de la muestra con parafina ( $M_2$ ). La diferencia entre  $M_1$  y  $M_2$  arroja la masa de la parafina ( $M_3$ ) y la densidad de esta.
- El volumen de la parafina ( $V_1$ ) resulta del coeficiente del  $M_3$  y la densidad de la parafina.
- Pesar la muestra sumergida en una balanza hidrostática  $M_4$ .

Para realizar el cálculo de volumen de la muestra en  $\text{cm}^3$  se utiliza la Fórmula 4.

$$V_2 = M_2 - M_4 - V_1 \quad \text{Fórmula 4}$$

La densidad húmeda de la muestra se gramos por  $\text{cm}^3$  se calcula utilizando la Fórmula 5

$$\rho = M_1/V_2 \quad \text{Fórmula 5}$$

La densidad de la muestra seca en gramos por  $\text{cm}^3$  se calcula en la Fórmula 6

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{W}{100}} \quad \text{Fórmula 6}$$

Los conceptos de densidad real y densidad aparente (el más utilizado en estimaciones mineras) están en la siguiente tabla:

Tabla 15: Tipos de densidad. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Tipo de Densidad	Definición	Cómo se calcula
Densidad de los minerales o densidad real. Normalmente es hallada en un laboratorio.	Se define como la masa de material seco ( $M_s$ ) por unidad de volumen de la parte sólida de la roca ( $V_s$ ), es decir el volumen después de ser excluidos los espacios vacíos $\rho_s = M_s / V_s$	Puede calcularse de forma teórica a partir de la densidad de los minerales constituyentes, siempre que se conozca con precisión la composición cuantitativa de la roca y la densidad de cada componente. Otra forma de calcular esta densidad es a través de un picnómetro de helio, el helio se difunde por todo el espacio vacío permitiendo obtener el volumen del sólido
Densidad de la roca seca o densidad aparente.	Es la masa del material seco ( $M_s$ ) por unidad de volumen total de la roca ( $V_t$ ), es decir, el volumen	Para hallar la densidad es adecuado usar el método de la

	incluyendo su parte sólida y todos los espacios vacíos (Vv) $\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$	pesa hidrostática, basada en el principio de Arquímedes.
--	--	--

La empresa que está a cargo del proyecto minero de esmeraldas puede realizar sus propias mediciones en un laboratorio adecuado para tal fin. Sin embargo, se sugiere tener muestras estandarizadas utilizando laboratorios certificados y/o reconocidos que sirvan de apoyo para los análisis realizados por la empresa minera.

**Errores comunes:**

- No realizar metódicamente medidas de densidad.
- Descartar los cambios de densidad por efectos tales como fallamiento, meteorización o agua en el sistema.
- No usar protocolos de QA/QC y de metrología en las mediciones de densidad.

**Más información:**

Dentith, M. C., & Mudge, S. T. (2014). 3.8. Density in the Geological Environment. In Geophysics for the mineral exploration geoscientist (pp. 127-134). Cambridge: Cambridge University Press.

Hernández-Gutiérrez, L.E., Santamarta, J.C., Tomás, R., Cano, M., García-Barba, J., Piñero-García, A. (2013). Prácticas de Ingeniería del Terreno. Universidades de Alicante y de La Laguna. <https://web.ua.es/es/ginter/biblioteca-de-ensayos.html> (2020/07/25).

**4.7. Factores modificadores**

 Exploración	 Recursos	 Reserva
---	--	---

**Descripción:**

Los Factores Modificadores corresponden a componentes que deben ser tenidos en cuenta en la conversión de recursos minerales a reservas minerales; principalmente porque los Factores Modificadores afectan, desde diversas perspectivas, la forma en que pueden ser explotadas las reservas. Para llegar a estimar reservas en un yacimiento, se deben pasar por las fases de prefactibilidad y factibilidad, con el fin de hacer tangible el proyecto minero y transformarlo en un proyecto económicamente viable (CIM, 2019).

### Desarrollo:

Los factores modificadores permiten analizar un proyecto minero a través de un enfoque multidisciplinario y determinar la posición del proyecto con respecto a aspectos técnicos, socioambientales, políticos y económicos, lo cual incluye también el efecto a terceros en las etapas de explotación. Para el caso específico de un proyecto esmeraldífero, los factores modificadores son mencionados a continuación (Figura 36):



Figura 36: Diagrama de Factores Modificadores. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020

#### ➤ Factores modificadores asociados a la Mina

- Método de explotación
- Escenarios de producción
- Peso y calidad del mineral recuperado
- Recuperación con respecto al modelo de recursos
- Manejo de estéril
- Sistema de retro llenado (si el sistema de explotación lo permite)
- Métodos de control de kilataje
- Costos de capital sustentable
- Métodos de beneficio o recuperación de gemas
- Nivel de tecnificación
- Geotecnia
- Hidrología
- Hidrogeología

#### ➤ Factores Socio - Ambientales

- Estudios de Línea base
- Manejo de estéril
- Manejo de aguas provenientes de la mina

- Plan de cierre
  - Estrategia de desarrollo Sostenible
  - Evaluación de impactos y mitigación
  - Asentamientos cercanos de comunidades
  - Relaciones con los mineros de subsistencia
  - Conflictos con las zonificaciones de uso del suelo de los Esquemas de Ordenamiento Territorial.
  - Conflictos con la zonificación ambiental de los POMCAS
- **Factores Económicos**
- Especificación del producto y su demanda
  - Términos de tratamiento off-site y sus costos
  - Ingresos
  - Exportación
  - Costos de transporte
- **Factores Políticos**
- Normatividad Vigente
  - Permisos legales minero-ambientales
  - Vigencia del contrato
  - Oposición política

La evaluación de los factores modificadores requiere un enfoque multidisciplinario, donde cada uno de ellos influye directa o indirectamente en la estimación y categorización de las reservas minerales. Esto conlleva a trabajar de manera detallada y particular cada proyecto minero y cada factor modificador, a fin de establecer técnicas de estimación y categorización de reservas probables y probadas de manera más precisa, para lo cual se han definen los siguientes objetivos:

- Determinar conocimiento actual
- Cuantificar los parámetros operacionales
- Predecir los posibles beneficios
- Caracterizar y categorizar el riesgo
- Proporcionar una base para inversiones adicionales

Se debe tener en cuenta que no todos los recursos minerales pasan a ser reservas minerales debido a los factores mineros. La GBPEC hace énfasis en realizar estudios adecuados que permitan establecer cómo dichos factores influyen en la factibilidad del proyecto minero. Es decir, los FM se consideran como posibles factores de riesgo, que podrían afectar el futuro del proyecto minero, afectando o inclusive deteniendo el paso de recursos a reservas. En algunos casos, los proyectos no son económicamente viables o las condiciones sociales, técnicas o ambientales no permiten que sea desarrollado. En este tipo de situaciones, aún si el proyecto minero cuenta con recursos minerales, estos no pueden ser convertidos en reservas minerales.

***Errores comunes:***

- Los factores modificadores son cambiantes y dinámicos, por tal motivo es un error común solo considerar los factores modificadores en la primera estimación de reservas.
- No analizar concienzudamente cada factor modificador y su efecto en las reservas. El hecho de ignorar o revisar los factores modificadores de manera ligera pueden afectar drásticamente el paso de recursos a reservas, o inclusive, anular el proyecto minero. Descartar la descripción del proyecto, ya que algunos inversionistas, al tener una larga carga de trabajo, hacen una valoración de proyecto leyendo concienzudamente la descripción.

***Más información:***

Committee for mineral reserves international reporting standards. (2019). CRIRSCO International reporting template. Revisado el 26 de agosto, 2020, en <http://www.criusco.com/template.asp>

Observatorio Colombiano de la Minería, . (2020, August 1). Observatorio Colombiano de la Minería. Revisado el 29 de septiembre, 2020, en <https://ocmi.org.co/>

#### 4.8. Factores mineros



##### ***Descripción:***

Los factores mineros están relacionados con los factores técnicos que harán posible la extracción de esmeraldas, entre los que se encuentran: cómo realizar túneles, cómo hacerlos estables, cuáles serán los métodos de voladura, cómo se puede recuperar el material minado, cuánto se puede extraer y cómo poder llegar al sitio minero.

Los factores mineros son fundamentales para la transformación de recursos que se encuentran dentro del depósito, a reservas mineras. Entre los factores mineros más relevantes están la evaluación geotécnica del yacimiento, el método de explotación, el factor de recuperación por medio del minado, la dilución, las pérdidas y la accesibilidad.

Entender los conceptos de los factores mineros e identificar cómo aplicarlos al proyecto minero, se verá traducido en tener unas perspectivas más cercanas a la realidad y obtener un mejor factor en una eventual extracción para que esta sea económicamente rentable.

##### ***Desarrollo:***

En una minería de esmeraldas, los factores mineros se enfocan en identificar el método de explotación que sea más efectivo, dando así el primer paso en la transformación de recursos a reservas.

Los factores mineros se encuentran en la Figura 37.



Figura 37: Factores mineros asociados a la extracción de piedras preciosas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Unas buenas prácticas incluyen tener en cuenta los siguientes factores mineros:

- Evaluación geotécnica para diseñar los túneles y rampas.
- Resultados de los estudios hidrogeológicos
- La accesibilidad al título minero
- Labores de sostenimiento necesarias para extraer las gemas
- Diseño y capacidad de los botaderos licenciados por la autoridad ambiental.
- El factor de recuperación teniendo en cuenta el método de explotación seleccionado

### **Método de explotación propuesto y conveniencia con el proyecto**

Se considera que uno de los métodos de explotación más adecuados para la extracción de esmeraldas colombianas es el *Cut and Fill*, basado principalmente en las características de los depósitos encontrados en ambos cinturones esmeraldíferos y en las rocas cajas con fuerte diagénesis. El método *Block Caving* también puede ser un método bastante eficaz. En cualquier caso, una buena práctica en cuanto a la selección del método de explotación se basa en llegar a una decisión, basados en los estudios geológicos, geotécnicos y estructurales del macizo rocoso

### **Factor de recuperación por método de minado**

Es una buena práctica tener en cuenta las pérdidas de esmeraldas asociadas a tronadura o ruptura mecánica a la hora de realizar la extracción. Actualmente no se tienen estudios en donde se analice las pérdidas de esmeraldas asociadas a la extracción. Al mejorar las técnicas de minado, es probable reducir pérdidas asociadas a la extracción de las gemas por tronadura o ruptura por impacto.

## Selección del método de minado

Los métodos de minado se deben seleccionar teniendo en cuenta las características geotécnicas del macizo rocoso y la zona mineralizada, así como los cambios geotécnicos en el material producidos por el ingreso de agua de acuíferos o zonas falladas. Se sugiere realizar perforaciones de avance dentro de la mina para conocer las condiciones anteriores a la tunelería, así como las condiciones geotécnicas y minerales de las rocas del frente de mina.

## Geotecnia

Los datos hallados a través de estudios geotécnicos constituyen un aporte para el diseño de las minas a cielo abierto y subterráneo. Los datos geotécnicos pueden obtenerse de programas de perforación, excavaciones o de ensayos de minería donde los objetivos son confirmar la geología subyacente, la presencia y el carácter de las principales discontinuidades, el grado de descomposición del macizo rocoso y la humedad (Duque-Escobar, 2017). Las calidades del suelo y la roca pueden tener gran impacto en labores como excavación de túneles, galerías y taludes; por tal motivo son conceptos significativos en el diseño de minas (Vargas Norambuena, 2016).

La caracterización de los macizos rocosos se lleva a cabo a través de varias disciplinas como son:

- Geología estructural, por medio de la cual se conocen los procesos y estructuras geológicas que afectan la mecánica de los macizos rocosos.
- La tectónica, que permite conocer el estado de esfuerzos en el macizo rocoso y la dinámica de estos.
- La mecánica de suelos, para abordar el estudio de rocas alteradas y meteorizadas en la superficie.
- La ingeniería geológica, que comprende tanto el estudio de la mecánica de macizos rocosos como la de suelos para aplicar en los métodos ingenieriles adecuados.
- Se sugiere realizar constantemente la cartografía de los túneles.

## Métodos de clasificación del macizo rocoso

### ***Rock mass rating (RMR)***

La clasificación del macizo rocoso se puede realizar por medio del método *Rock Mass Rating (RMR)* (Bieniawski, 1989). Este método permite, de forma sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la cuantificación de parámetros de fácil medición. Estos parámetros se establecen en el campo de manera rápida y con costos mínimos. El método RMR incluye los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión uniaxial de la roca.
- *Rock Quality Designation (RQD)*.
- Espaciamiento de discontinuidades, condición de las discontinuidades.
- Condición del agua subterránea y orientación de las discontinuidades.

Con el valor del RMR es posible establecer algunas propiedades geotécnicas preliminares del macizo rocoso, para analizar la estabilidad del frente de explotación actual.

## Sistema Q

El sistema Q, fue propuesto por Barton *et al.* (1974), basándose en una gran cantidad de casos tipo de estabilidad en excavaciones subterráneas, siendo su principal propósito establecer un índice para determinar la calidad del macizo rocoso en túneles. El sistema Q incluye parámetros como:

- El índice de calidad de la roca (RQD).
- Número de sistemas de fisuras ( $J_n$ ).
- Rugosidad de las fisuras ( $J_r$ ).
- Alteración de las fisuras ( $J_a$ ).
- Factor de reducción por agua en las fisuras ( $J_w$ ).
- Factor de reducción por esfuerzos (SRF).

El valor numérico del índice Q se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} + \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Fórmula 7}$$

## Dimensiones mínimas mineras, tamaño de los túneles

En minería subterránea, los túneles son fundamentales para generar los accesos a los cuerpos mineralizados para su explotación. Sirven como infraestructura para el ingreso de materiales, personas y maquinaria, ventilación, electricidad, salidas de emergencia, resguardos en caso de emergencia, entre otras aplicaciones.

Una buena práctica para llevar a cabo las labores mineras de explotación de esmeraldas en Colombia es tener en cuenta el **decreto 1886 de 2015**, o el que se encuentre vigente. En el decreto 1886 de 2015, se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. En este decreto, se determina que el área mínima libre de excavación minera está determinada en el artículo 77 del decreto y **debe ser de tres metros cuadrados (3 m<sup>2</sup>) con una altura mínima uno coma ochenta metros (1,80 m).**

*“Parágrafo. El titular del derecho minero, el explotador y el empleador minero deben garantizar que el área de las labores definidas para el transporte sea suficientemente amplia, de tal forma que los equipos utilizados puedan circular sin tocar los respaldos (paredes), ni el techo para no alterar sostenimiento en dichas labores.”*

Decreto 1886 de 2015 emanado del Ministerio de Minas y Energía de Colombia.

## Dilución y pérdidas en minería

La dilución utiliza material que está por debajo del grado o valor de corte, pero que se extrae intencional o inadvertidamente y debe considerarse en las estimaciones de las reservas minerales porque "diluye" la estimación media del grado y aumenta el volumen extraído. Una buena práctica es que la persona idónea describa el procedimiento de cómo se aplicaron las estimaciones para la

dilución en la preparación de la estimación de las reservas minerales. La preparación de un diagrama para explicar el cálculo de dilución utilizado es a menudo muy útil.

Esta dilución resulta de la minería de material estéril que se mezcla con el material mineralizado a lo largo del perímetro de las áreas minadas en el momento de la excavación. También es bueno que una estimación de este material se incluya en el tonelaje de las reservas minerales y en las estimaciones de grado.

En el caso de la esmeralda colombiana existen dos tipos de dilución: la dilución interna y la dilución externa. La **dilución interna** hace referencia al material que está por debajo del valor de corte y que no puede ser retirada por su tamaño. En el caso de las esmeraldas colombianas corresponde a la presencia de la roca caja (lutitas o *shales*) dentro de la gema en bruto. La **dilución externa** hace referencia a que la gema es extraída con residuos de cuarzo, piritita y calcita que son procesados junto a la gema. En el caso de dilución externa se recomienda que estos materiales sean removidos para no generar más pérdidas del mineral.

Adicional a las diluciones interna y externa, existen dos tipos de diluciones asociados a los trabajos de minería subterránea: la dilución planeada y la dilución no planeada. La **dilución planeada** se da debido a la necesidad de sacar más material para poder mantener el proceso constructivo del túnel, por ejemplo cuando la zona mineralizada es más pequeña que el tamaño del túnel, por lo tanto la roca caja que no hace parte de la zona mineralizada contaría como dilución planeada. En cuanto a la **dilución no planeada** se define como las remociones que no hacen parte del plan, por ejemplo el material que agrega la voladura en una extracción u otras razones no controladas.

Las **pérdidas mineras** se refieren al porcentaje de material de grado mineral dentro de los diseños de minas que no se extraerán por varias razones. Estos materiales se expresan a veces en términos de recuperación minera; sin embargo, se prefiere el término pérdida(s) de minería para reducir la confusión con la recuperación del proceso. Ejemplos de pérdidas mineras incluyen material roto dejado en un tope que no se puede recuperar debido a restricciones operativas o de seguridad en una mina subterránea, o material dejado en su lugar con fines geotécnicos (por ejemplo, alféizares y pilares). Las pérdidas mineras deben cuantificarse y considerarse en la preparación de una declaración de la Reserva Mineral. En el caso de la esmeralda colombiana también se considera pérdida los quilates afectados por el golpe del martillo en la veta.

### **Accesibilidad**

Una vez identificado el plan de explotación minero y su área de ocupación, es necesario adecuar las vías de acceso existentes que comunican el frente de explotación y permiten el transporte de material hacia el patio de acopio. Una buena práctica radica en diseñar desde el inicio del proyecto, infraestructuras como vías de acceso, campamentos y bodegas, ventilación y electricidad en los túneles, resguardos de seguridad, salidas de emergencia, entre otros. De esta manera, se podrá identificar los impactos desde fases tempranas y tener una mayor efectividad en su control y mitigación. Entre estos impactos están la remoción de las coberturas vegetales y del suelo.

Dadas las condiciones de municipios como, por ejemplo: Maripí, Muzo, Quípama, el proyecto minero debe evaluar detenidamente ciertos factores como:

1. Falta de infraestructura:
  - a. Dificil acceso al sitio.
  - b. Carecer de métodos de salida de material.
  - c. Malas redes de transporte.
2. Distancia del proyecto a una ciudad cercana.
3. Tiempos de viaje.

### **Hidrogeología**

Los estudios hidrogeológicos se hacen necesarios antes de la extracción de las reservas minerales para tomar medidas frente a las actividades de explotación que se vayan a desarrollar en el proyecto, garantizar la calidad del agua en el futuro y generar el menor impacto posible en la zona. Las investigaciones hidrogeológicas e hidrológicas son necesarias porque permiten identificar cualquier acuífero importante, evaluar el probable equilibrio hídrico y los impactos potenciales en el diseño subterráneo y las tasas de producción.

Cuando las aguas subterráneas se consideran un riesgo para la extracción, se requiere una investigación específica para establecer las características de los dominios hidrogeológicos del sitio y su respuesta a la minería. En el diseño y operación de minas subterráneas, deben tenerse en cuenta dos factores principales:

- La cantidad de aguas subterráneas.
- La influencia de las presiones de las aguas subterráneas en la estabilidad del túnel.

En el caso de las minas subterráneas de esmeraldas, las entradas de agua subterránea durante las operaciones suelen ser manejadas por el sistema de bombeo de minas; sin embargo, hay situaciones en las que se requiere infraestructura y gastos adicionales, especialmente cuando los acuíferos son significativos o las unidades de alta permeabilidad están cerca de las operaciones. Se recomienda realizar estudios geoelectrónicos o de magnetotelúrica para hallar posibles acuíferos confinados dentro del proyecto minero.

Es importante evaluar la química de las aguas subterráneas y el potencial de generación de ácido en la roca, ya que esto determinará si el agua de la mina se puede utilizar en la planta o, en caso de descargarse al medio ambiente, qué tratamiento requerirá.

### **Hidrología**

Los estudios de agua superficial incluyen:

La recopilación de datos de lluvias y captación para proporcionar predicciones de inundaciones y definir los requisitos de drenaje para el sitio de la mina y la infraestructura, y se utilizan en el análisis del equilibrio hídrico para la ingeniería de procesos y desechos de minas. (CIM, 2019).

## Reconciliación

Es el proceso de identificación, análisis y gestión de la varianza entre los resultados previstos y los obtenidos realmente, los procesos de reconciliación son oportunidades de mejora en la cadena de valor del negocio minero (Figura 38)

Según (Glacken y Morley, 2003): los objetivos de la reconciliación son:

- Medir el rendimiento de la operación contra los objetivos.
- Confirmar la precisión en la estimación de tonelajes y leyes de los recursos y reservas de mineral.
- Asegurar una valoración exacta de las reservas mineras.
- Proporcionar indicadores clave de rendimiento en la operación.

Durante la reconciliación quedan expuestos los problemas en la estimación de tonelajes y leyes, en los procesos de muestreo, en los métodos de extracción, problemas de procesamiento y una serie de otros problemas técnicos. Estos problemas pueden ser analizados y corregidos con el fin de implementar medidas orientadas a la resolución de estos; el resultado de este análisis será la mejora continua en todos los procesos mineros, en el modelamiento geológico y en la estimación de recursos y reservas.



Figura 38: Relación entre planificación y ejecución (Modificado de Alegre y Smith, 2012).

### Errores comunes:

- No tener en cuenta la recuperación de la gema y la cantidad que queda afectada por efectos de la extracción (explosivos, mecánica o extracción manual).

- No realizar el *loggeo* geotécnico durante el proceso de exploración.

### **Más información:**

Alegre, H. C. M., & Smith, A. C. E. (2012). Planeamiento de minado subterráneo aplicando software minero. (Minería, 417)

Aristizábal Bedoya, M. P. (2019, Abril 24). Proponen mejorar técnica de extracción de esmeraldas colombianas. Revisado Julio 30, 2020, en <https://www.agronegocios.co/tecnologia/proponen-mejorar-tecnica-de-extraccion-de-esmeraldas-colombianas-2854672>

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. *Rock Mechanics*. 6(4): 189-236, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01239496>

Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Duque-Escobar, G. (2017). Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. Revisado el 31 de julio, 2020, en <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

Glacken, I and Morley, C, 2003. Leading practice in resource and reserve reconciliation. Unpublished paper prepared for Placer Dome Inc

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (21 de septiembre de 2015). Decreto 1886. Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://www.anm.gov.co/?q=content/decreto-1886-de-2015minminas>

Montoya, D. y Moreno, G. (2019). Esmeralda. En: Recursos minerales de Colombia, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Vargas Norambuena, J. P. (2016). Planificación de construcciones subterráneas con métodos estocásticos. Universitat de Lleida. Revisado el 27 de julio, 2020, en <https://www.tdx.cat/handle/10803/371745#page=1>

#### 4.9. Técnicas de extracción



**Descripción:**

En tiempos anteriores, la extracción de esmeraldas se realizaba a cielo abierto, sin ningún tipo de control. Los bulldozers realizaban el trabajo cortando las montañas, y entre los sedimentos resultantes del paso del bulldozer se encontraban los fragmentos de esmeraldas, ya sean sueltos dentro de los escombros o aún entre las vetas de calcita o cuarzo.

Sin embargo, debido a la transformación que ha sufrido el sector debido a las políticas mineras y ambientales emergentes, actualmente la extracción de este mineral se realiza de manera subterránea, por medio de túneles exploratorios que más adelante se convierten en túneles de trabajo y extracción de la gema (Figura 38).

Estos túneles se realizan por medio de trabajos de voladuras con explosivos, con los cuales se le da el avance al túnel. Cuando sea necesario, dependiendo de la zona donde se encuentre el frente de trabajo, se utilizan los martillos para romper las vetas mineralizadas y extraer la esmeralda. Así mismo, de los residuos estériles de roca producto de la voladura, también se extrae este mineral, por lo que todos estos residuos son lavados y revisados con el objetivo de extraer la mayor cantidad de recurso posible.



Figura 39: Tunelería con labores de sostenimiento realizadas para la extracción de esmeraldas. Fuente: CDTEC, 2020

Sin embargo, este método puede ser llevado al siguiente nivel, con una tecnificación, innovación tecnológica, aumento del conocimiento sobre el recurso y mejores procedimientos para garantizar la integridad del recurso.

De acuerdo con lo anterior, a continuación, se presentan una serie de recomendaciones y sugerencias a la hora de extraer la esmeralda de las zonas de ocurrencia de esta dentro del título minero.

### **Desarrollo:**

Para la extracción de esmeraldas en Colombia, una buena práctica radica en utilizar la técnica del *Cut and Fill* o del *Block Caving*. La selección de la técnica dependerá de las características del depósito, su continuidad, geometría y ubicación. Es por lo que se recomienda tener en cuenta el **modelo geológico y su interpretación**, a la hora de decantarse por una u otra técnica de extracción.

Adicionalmente, se recomienda tener en cuenta los siguientes principios

1. Garantizar la mayor recuperación posible del recurso.
2. Evitar pérdidas a la compañía, ya sea por los costos del método o por la pérdida del recurso.
3. Garantizar la calidad y la integridad del recurso que sea extraído.
4. **Estar basado en los trabajos exploratorios y en el modelo geológico realizados anteriormente.**

Así mismo, es importante conocer:

1. Las características topográficas, geotécnicas e hidrogeológicas de la zona por donde se tiene planeado realizar las labores extractivas.
2. Los resultados de la interpretación del modelo geológico.
3. Las regulaciones existentes sobre el manejo de explosivos y la seguridad minera en labores subterráneas.
4. El presupuesto con el que cuenta la compañía minera para los trabajos de minería subterránea.

**Block Caving:** El *block caving* es una técnica de extracción la cual se basa en la socavación de un cuerpo mineral para que este caiga bajo su propio peso (Figura 40/Figura 39). Básicamente, consiste en la realización de explosiones controladas en la base del depósito que ya debe estar totalmente caracterizado. Estas explosiones harán que, por gravedad, el cuerpo colapse, generando subsidencia, por lo que los niveles superiores del cuerpo del depósito mineralizado irán bajando progresivamente.

Las ventajas de este método es que puede abrir el acceso a depósitos más profundos, se reduce drásticamente la deposición de residuos en la superficie, el costo operativo es bajo (aproximadamente 1/10 parte de los costos de minería convencionales).

En cuanto a las desventajas, se trata de un método de una inversión alta y el tiempo de desarrollo de todo el sistema, antes de la etapa de producción, es bastante largo.

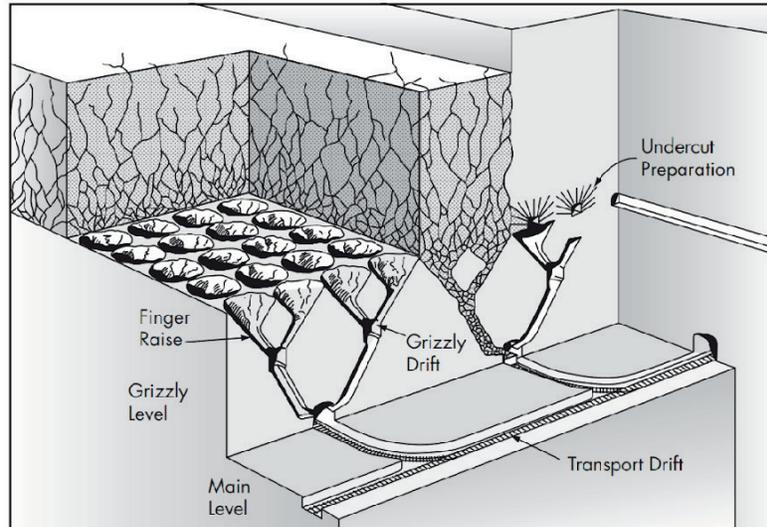


Figura 40: Modelo isométrico que ejemplifica el método Block Caving. (Hamrin, 1998).

**Cut and Fill:** Este método posee gran utilidad para los yacimientos esmeraldíferos colombianos ya que es propicio para rocas de baja competencia (como los *shales* carbonosos y se puede utilizar en depósitos en vetas). Consiste en avanzar horizontalmente, empezando desde la parte más baja de la mineralización, e ir ascendiendo progresivamente en la veta (Figura 41). Cuando se realizan los cortes horizontales y se extrae el material, los cortes son rellenados artificialmente.

Como ventajas, se trata de un método altamente selectivo, ya que es de bajas dimensiones y permite lograr una alta recuperación y una baja dilución.

En cuanto a las desventajas, se produce gran cantidad de material estéril y se incurre en un gasto adicional ya que se debe invertir en el material para rellenar los cortes.

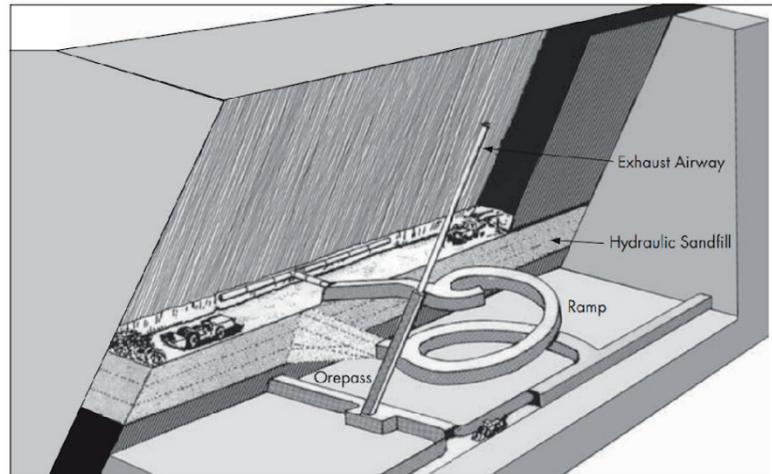


Figura 41: Modelo que ejemplifica el método Cut and Fill. Tomado de: Harmin, 1998.

#### **Errores comunes:**

- Usar explosivos en grandes cantidades para realizar los túneles, sin un sustento técnico y científico. Este error perjudica la integridad y la calidad de la esmeralda que se quiere extraer.
- Delegar los trabajos de tunelería, explotación y extracción de la gema, a personas sin experiencia y **sin la preparación profesional y académica suficiente** para realizar esta labor.
- Usar técnicas de extracción en las que el mismo macizo rocoso sea el soporte de la técnica, por ejemplo: cámaras y pilares o subniveles escalonados (*sublevel stopping*)

#### **Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. doi:10.1007/978-3-319-58760-8

Hamrin, H. 1998. Choosing an underground mining method. In Techniques in Underground Mining. Edited by R.E. Gertsch and R.L. Bullock. Littleton, CO: SME.

Métodos de extracción mineral: Block Caving [https://www.youtube.com/watch?v=uGbLQ193\\_08](https://www.youtube.com/watch?v=uGbLQ193_08)

Métodos de explotación Cut And Fill <https://www.youtube.com/watch?v=YcclStdYXLM>

Revista Dinero, E. (2017, Noviembre 14). Hechizo verde: La nueva realidad del negocio esmeraldero en Boyacá. Revista Dinero.

#### 4.10. Estimación del recurso mineral para conversión a Reserva Mineral



##### **Descripción:**

Teniendo en cuenta que la minería es un negocio de alto riesgo, se necesitan informes técnicos con datos transparentes, que provean la confianza necesaria a la hora de realizar una inversión económica en el proyecto minero.

Debido a la importancia de este tema, se deben seguir los lineamientos previamente comprobados y aplicados por mercados de capitales de países con sectores mineros robustos, como son Australia, Canadá, Sudáfrica y el Reino Unido, entre otros.

La definición del grado de confiabilidad de recursos y reservas se basa en diversos factores que son evaluados por un profesional con experiencia encargado del proyecto. Este experto debe encargarse de cuantificar el grado de incertidumbre en los valores estimados en el estudio de factibilidad del depósito.

Entre los objetivos de la estimación de recursos se encuentra:

- Obtener una estimación sin sesgo en volúmenes, leyes, tonelajes y cantidad de metal o mineral.
- Realizar la categorización de los recursos en las categorías de Medido, Indicado e Inferido de acuerdo con el nivel de confianza en la estimación.
- Definir un modelo de bloques adecuado para el desarrollo de Reservas Mineras, teniendo en cuenta el tamaño de bloque a minar en el proyecto minero.

Dependiendo del tipo y tamaño del proyecto minero, se realizan diversos estudios de viabilidad, los cuales tienen perspectivas de evaluación económica PEA (siglas para el término en inglés: *Preliminary Economic Assessment*, en español: Evaluación Económica Preliminar), Estudio de Prefactibilidad, el cual no presenta reservas, y finalmente llegar al estudio más detallado, el Estudio de Factibilidad. Todos tienen el mismo objetivo: cuantificar costos, proyectar el aprovechamiento de los recursos minerales con base en las técnicas adecuadas de minado y procesado.

Estos estudios están ligados a las diferentes etapas del conocimiento del proyecto, las cuales pueden durar inclusive varios años antes de llegar a un proyecto minero en producción.

##### **Desarrollo:**

#### **Conversión de recursos minerales a reservas minerales**

Las estimaciones confiables de los recursos y las reservas minerales son fundamentales para todas las operaciones mineras, independientemente del volumen y la materia prima con la que se cuente. Los riesgos asociados a la minería son complejos y variados, principalmente porque en la minería, a

diferencia de a la mayoría de los negocios, el conocimiento del producto se basa esencialmente en estimaciones, que incluyen por su propia naturaleza una alta incertidumbre (Godoy, 2009).

Los recursos minerales son una concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico, en o sobre la corteza terrestre, de tal forma, cantidad, tenor o calidad, que hay perspectivas razonables para una eventual extracción económica (CIM, 2019). La ubicación, cantidad, calidad, continuidad y otras características geológicas de los recursos minerales son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos geológicos específicos. Los recursos minerales se clasifican de acuerdo con el incremento de la confianza geológica del depósito en: Inferidos, Indicados y Medidos. Los recursos minerales Inferidos tienen un menor nivel de confianza que el aplicado a los recursos Indicados. Los recursos minerales Indicados tienen un mayor nivel de confianza que los recursos minerales Inferidos, pero tienen un menor nivel de confianza de los recursos minerales medidos (Gandhi y Sarkar, 2016).

La valoración económica del yacimiento se realiza con base en la estimación de los recursos minerales, en especial en las siguientes etapas:

#### **Exploración avanzada**

- Estudios Preliminares: entre el más destacado está el PEA, que corresponde a la Evaluación Económica Preliminar. En esta etapa no es posible definir reservas minerales, es decir, solo el hecho que un proyecto tenga un PEA no significa que se convierta en una mina operacional.
- Estudios de Prefactibilidad: estudio completo de un rango de opciones para la viabilidad técnica y económica de un proyecto minero. En el Estudio de Prefactibilidad se ha avanzado a una etapa donde el método de explotación ha sido establecido de igual forma con el método efectivo de procesamiento de mineral. Aquí existe desde un 10% y 30% de probabilidades de que la mina entre en producción.
- Estudios de Factibilidad: estudio técnico y económico completo de la opción de desarrollo seleccionada para un proyecto minero. El Estudio de Factibilidad incluye evaluaciones detalladas de los factores modificadores aplicables junto con cualquier otro factor operacional relevante y un análisis financiero detallado, factores que son necesarios para justificar que la extracción es razonable (Figura 42).

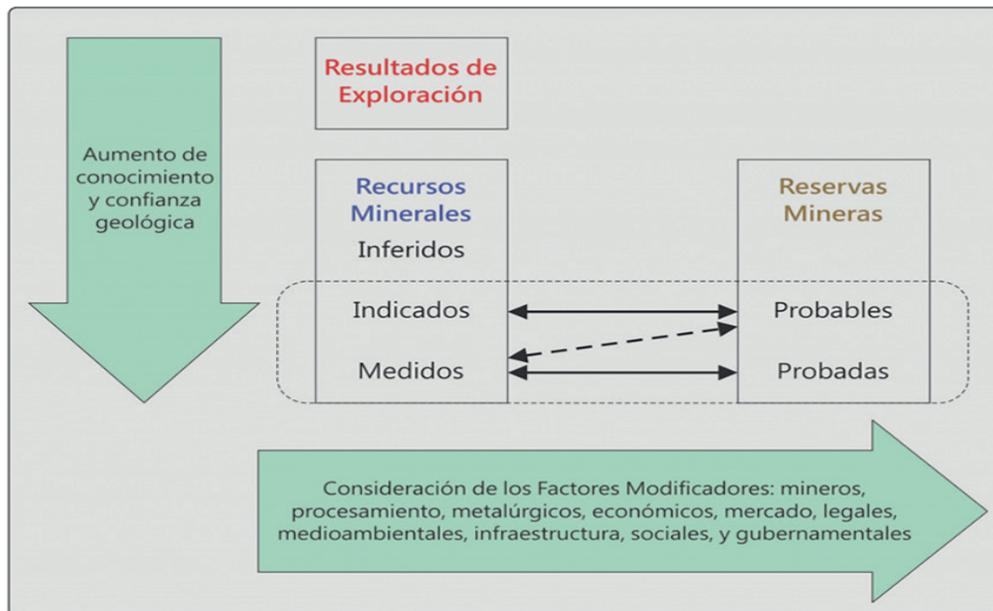


Figura 42: Diagrama de paso de Recursos a Reservas mineras (CRIRSCO modificado por Comisión Colombiana de Recursos y Reservas, 2019).

Varios aspectos son considerados al definir la calidad del valor estimado, siendo las más comunes:

- El grado de continuidad geológica.
- Configuración geométrica.
- La cantidad de información disponible.
- El grado de continuidad espacial de las leyes.

La evaluación de la confianza es crítica para el desarrollo de los proyectos, pues se debe contar con suficientes recursos y reservas conocidos y la suficiente confianza para ser considerados un activo. La confianza se considera un factor importante para el futuro de la producción para proporcionar valor a los accionistas.

Existe una tendencia de la industria hacia el uso de una descripción estadística de la incertidumbre para complementar los criterios de clasificación tradicionales, apoyando la planificación a largo plazo. La evaluación de confianza requerida por los accionistas de un proyecto minero es generalmente global y el énfasis se da a largo plazo.

Algunas consideraciones prácticas para la estimación de recursos:

- El número de perforaciones y muestras cercanas a cada bloque es de naturaleza geométrica y fácil de explicar, aunque con frecuencia tiende a ser simplista en su implementación.
- La variación de Krigging proporciona un índice de configuración de datos, es decir, una referencia de qué tan certera está cada bloque en el modelo de estimación.
- Usar diferentes radios de búsqueda para estimar bloques en un proceso paso a paso, cuanta más información se utiliza para obtener un supuesto, más seguro será.

- Decidir de acuerdo con criterios geológicos el espaciado de la grilla requerido para que el recurso pertenezca a una categoría (medida, indicada o inferida), y luego aplicar ese espaciado en todo el depósito utilizando una cuadrícula nominal.

### Factores modificadores

No todos los recursos minerales pasan a ser reservas minerales debido al efecto de los factores modificadores, de allí que sea importante realizar estudios en los que se analice cómo dichos factores pueden hacer factible o no el proyecto minero. En algunos casos, los proyectos no son económicamente viables, o las condiciones sociales no permiten la realización del proyecto; en ambos casos mencionados, los recursos minerales no pueden convertirse en reservas minerales. Tener recursos minerales no significa tener reservas minerales, de allí la importancia de revisar a conciencia y con la mayor sensatez posible, todos los factores modificadores y establecer escenarios para determinar la viabilidad del proyecto minero.

Los factores modificadores están explicados de manera más detallada en la sección 4.7. de esta guía.

El paso de recursos a reservas involucra realizar estudios a conciencia y exhaustivos de los depósitos minerales. Para demostrar cómo tres factores pueden influir en el cambio del paso de recursos a reservas, se presenta el siguiente gráfico, realizado por la Clasificación Marco de las Naciones Unidas (2010), en donde se puede observar cómo la factibilidad del proyecto, el conocimiento geológico y el componente socioeconómico hacen el paso de recursos a reservas (Figura 43).

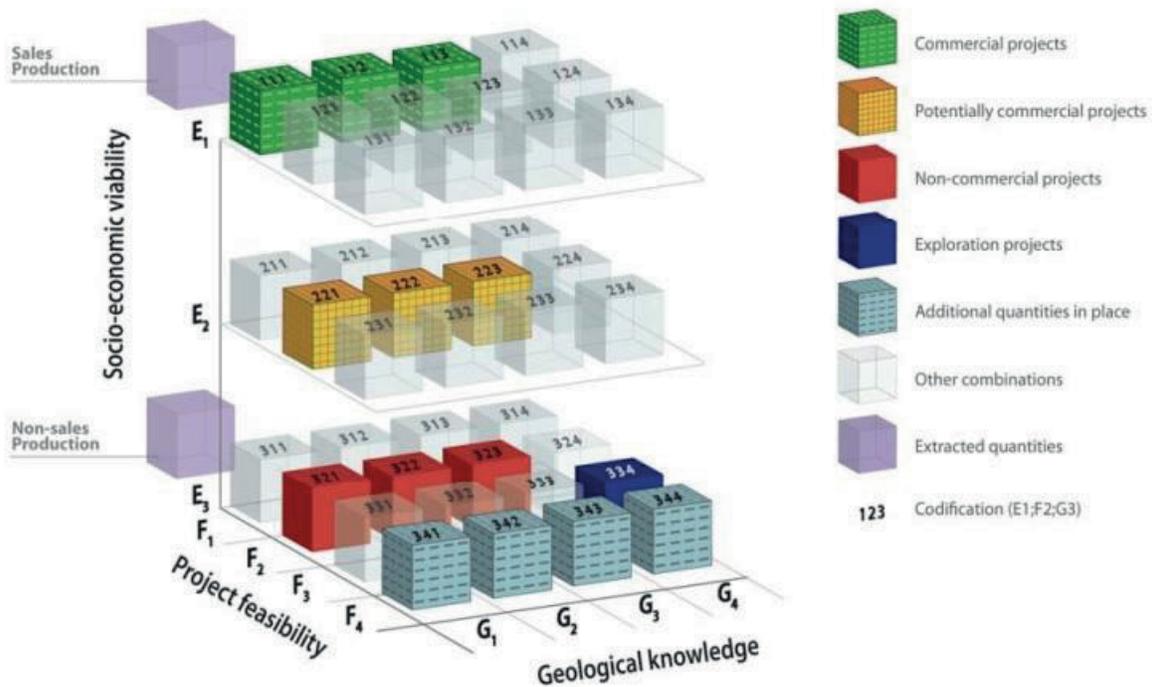


Figura 43: Sistema de Clasificación de la UNFC (Comisión Económica de las Naciones Unidas, 2010).

La Figura 43 tiene como objetivo visualizar en tres ejes principales que hacen que un proyecto minero pueda pasar de recursos a reservas a partir del conocimiento geológico, la factibilidad del proyecto y la viabilidad socioeconómica. La metodología utilizada por las Naciones Unidas (2010) sirve para que las naciones identifiquen a gran escala en qué estado se encuentran los proyectos de recursos naturales. Sin embargo, es importante anotar que esta metodología para estimación de Recursos y Reservas utilizado por las Naciones Unidas.

### **Estudio de Prefactibilidad**

Un Estudio de Prefactibilidad permite determinar la magnitud del proyecto minero y su atractivo comercial. El Estudio de prefactibilidad integra los factores mineros, comerciales y económicos para tener claro si el proyecto minero merece pasar a una siguiente fase o si se debe dejar en el estado actual (CIM, 2019).

En los factores mineros se tienen en cuenta: la exploración, los accesos, la geotecnia, el diseño preliminar de la mina y escenarios que integran los datos y permitan reconocer la viabilidad del proyecto. En los contenidos de exploración se sugiere identificar las magnitudes del depósito, las litologías favorables, quilates por tonelada a lo largo del depósito y la delineación de la zona mineralizada. La prefactibilidad requiere una exploración más exhaustiva, que, unida a una mayor cantidad de perforaciones, permitirá delimitar las zonas mineralizadas con menor incertidumbre.

En los Estudios de prefactibilidad, la evaluación de los diferentes escenarios permite identificar si el proyecto es comercial en el momento. Lo que no quiere decir que el proyecto sea económicamente rentable, pero da una aproximación al riesgo económico del proyecto.

### **Evaluación financiera**

La evaluación financiera es vital para estimar las reservas probables y probadas de un proyecto minero (Guzmán, 2019). Por tal motivo, se propone realizar varios modelos económicos que deben tener en cuenta los factores modificadores.

Los factores modificadores crean límites a la evaluación minera, apoyando la generación de escenarios que sean cercanos a la realidad. Adicionalmente, los factores modificadores pueden ser utilizados como cambios del rango en futuros escenarios y cambios en los precios de quilate. Se sugiere tener en cuenta los óptimos de producción y que no existe un recurso homogéneo. Las herramientas de análisis en la evaluación financiera serán cruciales para la identificación de utilizarlos.

Finalmente, es importante considerar que no todos los proyectos mineros llegan a la etapa de explotación, por lo que se sugiere armar escenarios que permitan aumentar la certidumbre y reducir el riesgo en el proyecto.

Es necesario realizar varios modelos financieros. Los factores modificadores funcionan como límites en la producción minera y los óptimos de producción. Además, se debe tener en cuenta que no existe un recurso homogéneo, inexistencia de incertidumbre. Por tal motivo se deben utilizar herramientas de análisis financiero para realizar una evaluación de los modelos financieros de manera consistente.

### ***Errores comunes:***

- Excluir costos de operación, ambientales, de tratamiento de las muestras, de exportación, etc., al momento de pasar de recursos a reservas
- No tener en cuenta una línea base de costos
- Usar una proyección de costos que no está acorde con la actividad minera
- Descartar, subvalorar u obviar factores modificadores, principalmente los factores que no están asociados al proyecto o que se ven lejanos al mismo, tales como los sociales o los ambientales.
- Elaborar la estimación de los recursos a partir de información poco confiable y no verificable.

### ***Más información:***

Capítulo 4.13: Categorización, en este trabajo

CIM (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Revisado el 20 de julio, 2020 en [https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines\\_2019.pdf](https://mrmr.cim.org/media/1129/cim-mrmr-bp-guidelines_2019.pdf)

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, C. (2019). ¿Qué se entiende por Factores Modificadores? Revisado el 28 de julio, 2020, de <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/factores-modificadores/>

Comisión Económica, P. (2010). Clasificación Marco de las Naciones Unidas para la energía fósil y los recursos y reservas minerales 2009. Revisado julio 28, 2020, de <https://es.scribd.com/document/204530049/unfc-2009>

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Chapter 13 Mineral Resources Classification. In Essentials of mineral exploration and evaluation (pp. 309-320). Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

Godoy, M. (2009). Estimación de Recursos. En Seminario “Competencias en Recursos y Reservas Mineras”. Revisado el 3 de agosto, 2020 en <https://docplayer.es/31269394-Estimacion-de-recursos-dr-marcelo-godoy-11-de-mayo-2009.html>

Guzmán, J. I. (2019). Capítulo 11 El problema de determinar la inversión óptima. En Fundamentos de economía minera (pp. 345-388). Barcelona, España: Editorial Reverté.

#### 4.11. Costos y rentabilidad



##### ***Descripción:***

Un proyecto minero, como todo proyecto económico, requiere identificar los costos asociados a la producción y la rentabilidad obtenida a partir del dinero invertido. La importancia radica, tanto en el conocimiento de cómo los costos de producción afectan el resultado económico final, y cuál es el impacto del dinero invertido con relación a su rentabilidad y retorno de inversión.

Es clave tener control en los costos operativos, todo el proceso de minado tiene unos costos intrínsecos que se ven reflejados en los metros de avance y en la cantidad de dinero que se debe gastar en diferentes rubros. Igualmente, el hecho de poder controlar los costos va a permitir ser más efectivos con el flujo de caja y hacer una administración sensata y transparente del dinero.

Adicionalmente, el proyecto minero debe presentar una rentabilidad sobre el dinero que ha sido invertido en dicho proyecto. Los inversionistas deben reconocer la cantidad de dinero que es generado luego del proceso de producción y venta de las gemas. De esta manera, en caso de requerirse una nueva inversión, se pueden hacer escenarios del impacto del ingreso de estos nuevos recursos y de cómo será la rentabilidad del ejercicio minero.

##### ***Desarrollo:***

Los costos operativos en una producción de esmeraldas están asociados a dos conceptos principalmente: a los costos de minado y a los costos de planta. Se sugiere tener un control de los diferentes costos para determinar el impacto de cada costo operativo en la producción de las gemas; de esta manera, se pueden crear estrategias en el caso que haya algún cambio de proveedor o cambio de precios en los insumos asociados a la producción debido a condiciones diversas.

Tener control de los costos es fundamental, en esta guía se sugiere identificar los costos en su correspondiente rubro (o centro de costos) debido a que facilitará su control. Por ejemplo, crear un centro de costos asociado a salarios, otro centro de costos asociado a combustible, etc.; de esta manera se logran identificar cambios en los costos de manera efectiva.

#### **Costos asociados al minado**

Los costos de minado son los que corresponde al mayor porcentaje de los costos operativos de una mina de esmeraldas. Están asociados al proveedor o al cambio de precios en los insumos asociados a la producción debido a condiciones externas del proyecto.

Entre los costos de operación asociados al minado se encuentran:

- Perforación.
- Tunelería.

- Tronadura.
- Carga.
- Transporte.
- Adecuación y mantenimiento de vías y caminos.
- Botaderos.
- Bombeo de aguas.
- Costos generales de la mina.
- Amortización y depreciación.

### **Costos de limpieza de la gema**

En el caso de la explotación de la esmeralda colombiana, existen costos asociados a la limpieza de la gema. Entre los costos más representativos se encuentran:

- Limpieza de la gema.
- Recuperación del proceso minero.
- Amortización y depreciación

Se sugiere que los costos se relacionen a la cantidad de quilates producidos y a la valoración del metro cúbico removido, de esta manera se pueda entender cuál es el impacto de cada costo en una unidad de referencia. Por ejemplo, se puede determinar cuál es el precio del material que se debe remover para poder generar un quilate de esmeraldas. De igual manera se pueden establecer los cambios de estas relaciones a lo largo del tiempo, para así identificar qué tipo de acciones se pueden generar para obtener una proyección más estable.

### **Rentabilidad**

La rentabilidad corresponde a la utilidad neta relacionada con los activos de la compañía. La utilidad neta corresponde a la diferencia entre las ventas de las esmeraldas y los costos operativos, los gastos administrativos y los pagos de regalías e impuestos, etc. La rentabilidad se denomina rentabilidad económica cuando se asocia al total de activos del proyecto minero, o rentabilidad financiera en caso de solo referirse a los activos propios de la empresa, sin tener en cuenta las deudas.

Para poder realizar los cálculos de rentabilidad es necesario establecer unos supuestos para poder hacer los cálculos de diferentes escenarios. Entre los supuestos de rentabilidad se tienen los siguientes supuestos.

- Tenor de la mina.
- Costes de transporte.
- Costes asociados a la limpieza de la gema.
- Transporte.
- Calidad de la gema.

En todos los casos hay que basarse en los históricos de producción y ventas de la empresa, en los resultados de la exploración, en las estimaciones de recursos y reservas del proyecto minero y en información recolectada por los grupos especializados en esmeraldas colombianas.

Los escenarios y las rentabilidades también tienen por objetivo realizar flujos de caja, identificando cuándo y cómo disponer de los dineros generados y el ingreso y egreso de ese dinero en el futuro a medida que se ejecuta el proyecto minero.

**Errores comunes:**

- Desconocer costos asociados a los procesos de producción.
- No realizar varios análisis de costos teniendo en cuenta diferentes escenarios de rentabilidad.
- No tener controles (KPI) en los costos de producción, de tal manera que si existe un cambio en los egresos, no se pueda identificar cuáles son los factores que están realizando este cambio.

**Más información:**

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. doi:10.1007/978-3-319-58760-8

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Essentials of mineral exploration and evaluation. Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

**4.12. Estudio de mercado**



**Descripción:**

Un proyecto esmeraldífero, como proyecto económico, debe tener en cuenta la respuesta de los precios que se obtienen por las gemas al momento de realizar los análisis de costos, mercadeo y rentabilidad; cuáles son los compradores y qué hace que una gema tenga un cambio en su valoración. En la actualidad, mercados emergentes como China e India están buscando gemas, por lo que las esmeraldas colombianas tienen un amplio margen de oportunidades (CRU y UPME, 2018).

Como cualquier bien de consumo, el precio de las esmeraldas está asociado a la dinámica del mercado, por tal motivo es importante realizar los estudios pertinentes con el objetivo de realizar los cálculos y estimar diferentes escenarios de compraventa en los modelos económicos del proyecto esmeraldífero.

### Desarrollo:

Todos los mercados de piedras preciosas tienen análisis y tendencias que no son ajenos a los factores de la economía mundial. La extracción de recursos minerales conlleva también a una demanda asociada al consumo en países en donde la gema es utilizada principalmente en joyería. En la actualidad, Colombia hace parte de los tres países con mayor producción de esmeraldas en cuanto a gemas, junto con Zambia (líder actual) y Brasil (Figura 44).

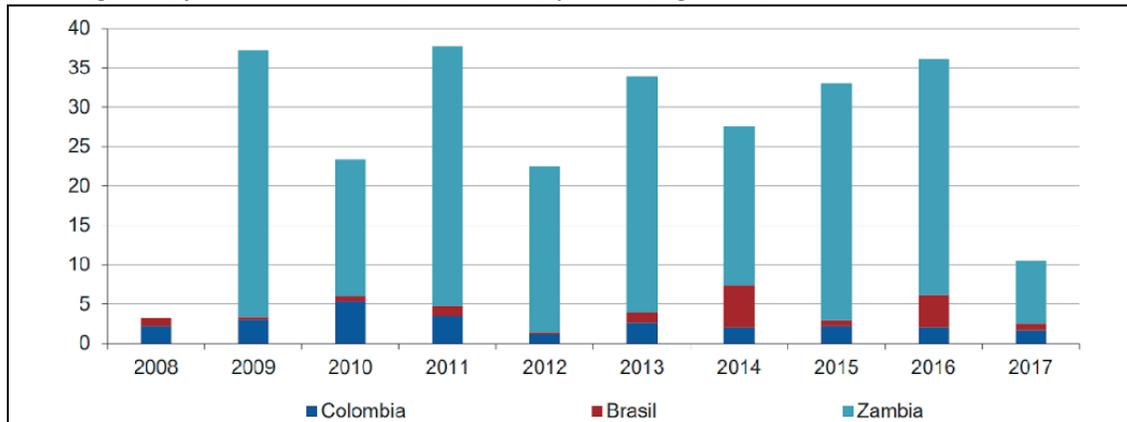


Figura 44: Estimación de producción de esmeraldas en millones de quilates. Fuente CRU y UPME (2018).

Se sugiere realizar un estudio de mercado que apoye los precios asociados a los quilates. Así mismo, se recomienda que el estudio de mercado contenga los siguientes elementos:

- Análisis del sector y de la empresa
- Análisis de la competencia
- Estudio de la oferta
- Estudio de la demanda
- Riesgo comercial
- Proyecciones de precios
- Estrategia de precio
- Estrategia de ventas
- Estrategia promocional
- Estrategia de distribución
- Políticas de servicio
- Tácticas de ventas
- Planes de Contingencia

Una manera de realizar este estudio es que el interesado realice su propio análisis del mercado, como puede ser, estableciendo valores de quilates teniendo en cuenta los promedios en la zona aledaña de trabajo. Aunque hay una variación en los precios, estos valores ayudan a conocer el rango en los precios esperados del quilate. El estudio de mercado también permite conocer quiénes son los compradores y qué necesidades tienen sobre las gemas. Así mismo, también es de gran utilidad conocer qué valor por quilate están dispuestos a pagar por la esmeralda, los países

consumidores de esta gema, así como el valor de venta del quilate en otros países productores de la esmeralda.

El estudio de mercado es fundamental para establecer herramientas y estrategias de mercadeo para la venta de las gemas, así como encontrar oportunidades en el sector, aprovechando las diversas maneras de realizar negocios en la actualidad.

#### ***Errores comunes:***

- No tener en cuenta un estudio de mercado para evaluar escenarios o proyecciones de la venta de las gemas.
- Desconocer cómo se mueve el mercado hace que haya limitaciones a la respuesta en una futura producción.

#### ***Más información:***

CRU International Limited y Unidad de Planeación Minero-Energética (21 de diciembre de 2018). Esmeraldas Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano, y largo plazo con vigencia al año 2035. Revisado el 1 de agosto, 2020, en [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto4\\_Esmeraldas\\_final\\_v2.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto4_Esmeraldas_final_v2.pdf)

#### **4.13. Otros**



#### ***Descripción:***

Antes de comenzar un proyecto de exploración o explotación de esmeraldas, existen una serie de actividades que es conveniente realizar, con el fin de evitar retrasos o inconvenientes en la planificación y estructuración del proyecto minero.

Estas actividades radican en determinar si el área del proyecto minero cumple con todos los requerimientos y determinantes legales, ambientales, sociales y gubernamentales necesarios para llevar una operación minera. La revisión de la situación del título minero en cuanto a estas determinantes y requerimientos es fundamental, debido a que el incumplimiento de algún requerimiento por parte de las autoridades pertinentes, puede ser un impedimento determinante para la viabilidad del proyecto.

Entre algunas determinantes que hay que revisar detenidamente, se encuentran:

- Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA).
- Esquemas y Planes de Ordenamiento Territorial (EOT o POT).
- Áreas protegidas (SINAP).
- Comunidades étnicas y/o Resguardos Indígenas.

- Estado predial y/o catastral de la zona.

### **Desarrollo:**

En la Tabla 16, se muestran una serie de recomendaciones que pueden ser una buena práctica a la hora de evaluar determinantes legales, ambientales, sociales y gubernamentales. La tabla está dividida en las determinantes que puedan afectar los procesos de determinación de recursos y reservas.

*Tabla 16. Recomendaciones legales y ambientales para tener en cuenta en el desarrollo y planeación de un proyecto minero de esmeraldas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.*

Recursos	Reservas
<p><b>1. Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (POMCA):</b> Revisar que la zonificación ambiental que aplique a la ubicación del título minero sea compatible con actividades de uso múltiple o extractivas que requieran licenciamiento ambiental.</p>	<p><b>1. Servidumbres Mineras:</b> Antes de planificar la instalación o construcción de equipos, servicios u obras que se requieran para realizar minería de esmeralda, se recomienda llevar a cabo los trámites técnicos y legales y necesarios ante las autoridades competentes para solicitar el ejercicio del derecho de servidumbre minera, sobre el predio en el cual se realizará la construcción o instalación de estos equipos o infraestructura.</p>
<p><b>2. Esquemas o Planes de Ordenamiento Territorial (EOT o POT):</b> Revisar que el uso del suelo de la zona donde se encuentre el título minero sea un uso del suelo apto para actividades mineras.</p>	<p><b>2. Análisis de estabilidad y geotecnia:</b> Al momento de planificar el sistema de explotación, que debe ser tenido en cuenta en los estudios de factibilidad para establecer las reservas de esmeraldas del título minero, se sugiere incluir un estudio de geotecnia y estabilidad del macizo rocoso. El principal inconveniente está en las características de las lutitas carbonosas o calcáreas que actúan como roca caja de las mineralizaciones de esmeralda ya que, son rocas muy físis, poco competentes, las cuales se pueden fracturar muy fácilmente.</p> <p>Debido a las características de estas rocas, son muy propensas a fenómenos de inestabilidad, tal como lo reflejan la gran cantidad de fenómenos de remoción en masa y derrumbes en túneles</p>

Recursos	Reservas
	<p>que se presentan en las zonas mineras, en ambos cinturones esmeraldíferos.</p> <p>Con un estudio de estabilidad y análisis geotécnico, mediante el análisis de los factores GSI, RMR, IRMR, MRMR, RQD, (<b>ver glosario de términos</b>) es posible determinar qué zonas del título minero son más o menos susceptibles a algún tipo fenómeno de remoción o desprendimiento de rocas dentro del título minero. Es importante que dichas zonas sean tenidas en cuenta al momento de diseñar el plan de explotación.</p>
<p><b>3. Plataforma Anna Minería y nueva cuadrícula minera:</b> Es recomendable visitar el Sistema de Información Geográfica de la plataforma de la ANM: Anna Minería, para confirmar que la zona donde se encuentre el título minero no posea traslapes con algún tipo de restricción minera y/o ambiental</p> <p>Así mismo, se sugiere revisar el área total efectiva aportada por el nuevo sistema de cuadrícula (única regla geométrica para el otorgamiento de títulos mineros, la cual consiste en una malla regular y estandarizada) que será recibida después de la solicitud, teniendo en cuenta que puede haber una disminución del área solicitada.</p>	<p><b>3. Estado predial y catastral de los predios que componen el título minero:</b> Se recomienda conocer cuáles, en qué estado, y qué tipo de predios (con propietario, sin propietarios, baldíos de la nación, etc.) componen el título minero y sus alrededores.</p> <p>La razón fundamental radica en que se deberá entablar conversaciones y negociaciones (compra y/o arriendo de predios) con los propietarios de los predios. Por ejemplo, para las labores de exploración y explotación se necesita el permiso y aprobación del titular del predio, tal como ocurre con servidumbres, concesión de aguas, construcción de infraestructura minera, etc.</p>
<p><b>4. Sistema de Áreas Protegidas (SINAP):</b> La localización del título minero no debe estar dentro de un área protegida, ni contener alguna sección de éstas</p>	<p><b>4. Análisis hidrogeológicos:</b> Las lutitas (shales) que componen los cinturones esmeraldíferos colombianos, se caracterizan por tener una alta porosidad secundaria, producto del alto grado de fracturamiento y plegamiento.</p> <p>Gracias a este intenso plegamiento y fracturamiento y teniendo en cuenta las características hidrológicas y atmosféricas de ambos cinturones (más que todo el cinturón occidental) en donde ocurren grandes</p>

Recursos	Reservas
	<p>precipitaciones a lo largo del año, se manifiestan una gran cantidad de infiltraciones y acumulaciones de agua dentro de estos shales.</p> <p>Estas infiltraciones y acumulaciones de agua pueden representar grandes beneficios o grandes dificultades en la planificación de un título minero. Beneficios, a la hora de poder utilizar estos acuíferos como medio de abastecimiento para el proyecto. Dificultades, porque estas infiltraciones de agua pueden ser causales de accidentes mineros dentro de los túneles</p> <p>Por este motivo, realizar un estudio hidrogeológico detallado del título minero es útil para determinar las características de porosidad y permeabilidad de las rocas, y así llegar a establecer posibles localizaciones de acuíferos o infiltraciones de agua.</p> <p>Se recomienda que el estudio hidrogeológico se realice de manera independiente, debido a que las características hidrogeológicas de cada área de proyecto son muy diferentes a las áreas adyacentes o a las mostradas en estudios regionales no tan detallados como se requiere.</p> <p>En el caso de los <i>shales</i> que se presentan en los cinturones esmeraldíferos colombianos, se recomienda realizar las técnicas de IP o SEV, mediciones de caudales, pruebas de bombeo, para estos estudios hidrogeológicos</p>

**Errores comunes:**

- Falta de verificación de los conflictos potenciales del título minero con restricciones ambientales según el POMCA de la respectiva cuenca.
- Solicitar una licencia ambiental, sin tener en cuenta la zonificación del uso del suelo del donde se encuentre el título.
- Diseñar infraestructura minera (túneles, polvorín, vías internas, etc.,) sin un análisis geotécnico y de estabilidad.

### ***Más información:***

ANM - Cartilla Minera.

ANM - Guía Minero Ambiental.

ANM - Plataforma Anna Minería.

POMCA de la Cuenca del Río Carare Minero (para el caso del Cinturón Esmeraldífero Occidental).

POMCA de la Cuenca del Río Guavio (para el caso del Cinturón Esmeraldífero Occidental).

### **4.14. Categorización**



### ***Descripción:***

La categorización se define como el conjunto de procedimientos y actividades que deben surtirse para determinar el tipo de recurso y reserva que se tiene en el proyecto minero, de acuerdo con los resultados de la exploración, los estudios de prefactibilidad y factibilidad y la revisión de los factores mineros y modificadores.

La categorización de los recursos (inferido, indicado y medido) y reservas (probables y probadas) de un depósito de minerales, es un aspecto clave en la evaluación y viabilidad de un proyecto minero. Esto, debido a que la inversión y el financiamiento del proyecto dependen del tonelaje y la ley de los recursos y reservas. Gran cantidad de inversionistas toman la decisión de invertir o no, en un proyecto minero, basados en la confiabilidad y transparencia de los valores estimados de recursos y reservas.

El objetivo principal de categorizar estos elementos es **determinar el grado de confiabilidad de la estimación de la calidad de los bloques geológicos establecidos en el modelo 3D en la etapa de exploración, sumado al resultado del análisis de los factores mineros y modificadores, los estudios de mercado, de factibilidad, etc.** Esta categorización se recomienda que sea reproducible y auditable por pares.

Con base en esto, el aspecto más importante radica en la **cuantificación de la incertidumbre en las leyes de cada bloque, proceso que debe ser realizado por una persona competente o un profesional idóneo en estimación de recursos y reservas.**

**Desarrollo:**

Para lograr una correcta **cuantificación de la incertidumbre** (Figura 45), y así categorizar de la mejor manera los recursos y las reservas de un título minero de esmeraldas, se recomienda tener en cuenta los siguientes **principios fundamentales**.

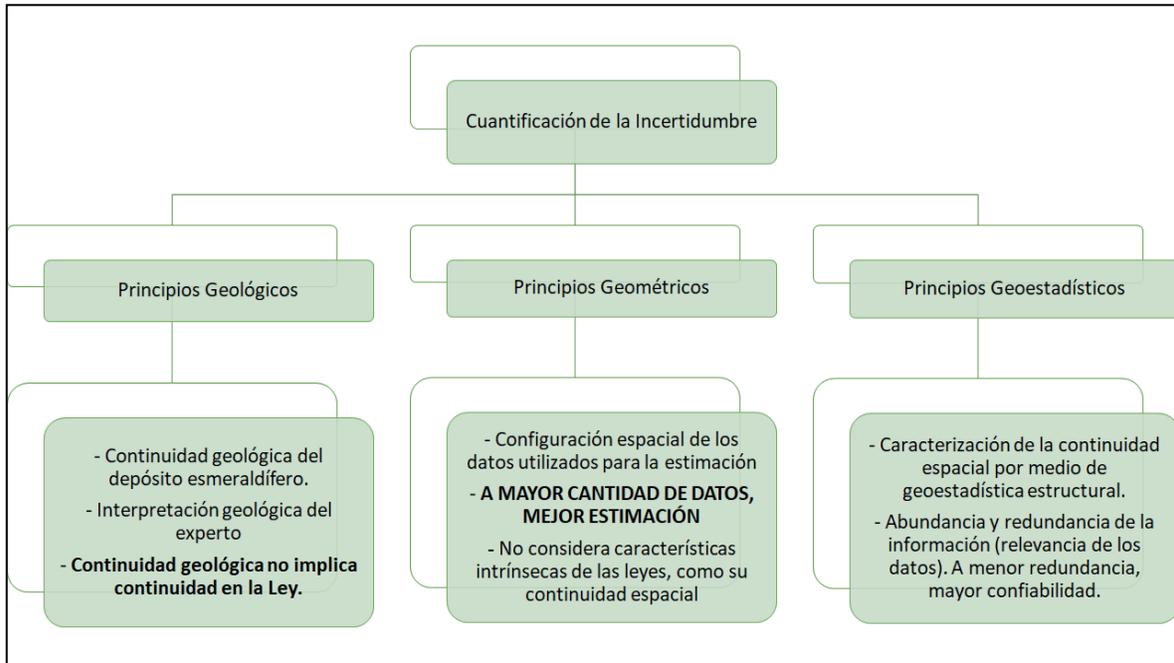


Figura 45: Principios fundamentales para la cuantificación de la incertidumbre. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

Así mismo, se presentan unas buenas prácticas para tener en cuenta:

1. La continuidad geológica del recurso posee un alto grado de incertidumbre debido a la complejidad de la esmeralda en cuanto a la determinación de sus condiciones de formación
2. Siempre será mejor interpolar que extrapolar. Por ejemplo, si la ley de un bloque fue determinada mediante datos de una sola perforación, será menos confiable que la ley de un bloque que fue determinada mediante datos de tres perforaciones. A mayor confianza, el bloque puede ser elevado de categoría.
3. Si se debe extrapolar, se recomienda limitar la distancia máxima de extrapolación.
4. Estudiar las anisotropías de las mineralizaciones. Algunas concentraciones de elementos son más continuas y evidentes en ciertas direcciones. En el caso de la esmeralda, se plantea

que las mineralizaciones de esmeralda tienen preferencia de ocurrencia en el plano vertical.
5. Algunas herramientas geoestadísticas estructurales que se pueden usar son: variograma, correlograma o covarianza espacial.
6. Entender los principios geológicos, geométricos y geoestadísticos como un solo conjunto que van en armonía uno con el otro, a la hora de categorizar los recursos
7. Si la persona competente, experto o persona encargada de la categorización concluye que no hay suficientes datos para realizar el proceso, siempre será mejor <b>catalogar los recursos como inferidos</b> , hasta que se subsane este inconveniente.

Teniendo en cuenta lo anterior, para la categorización de Recursos y reservas, se recomienda lo siguiente, **partiendo de la premisa de que se cuenta con un modelo geológico tridimensional del depósito** (Figura 46):

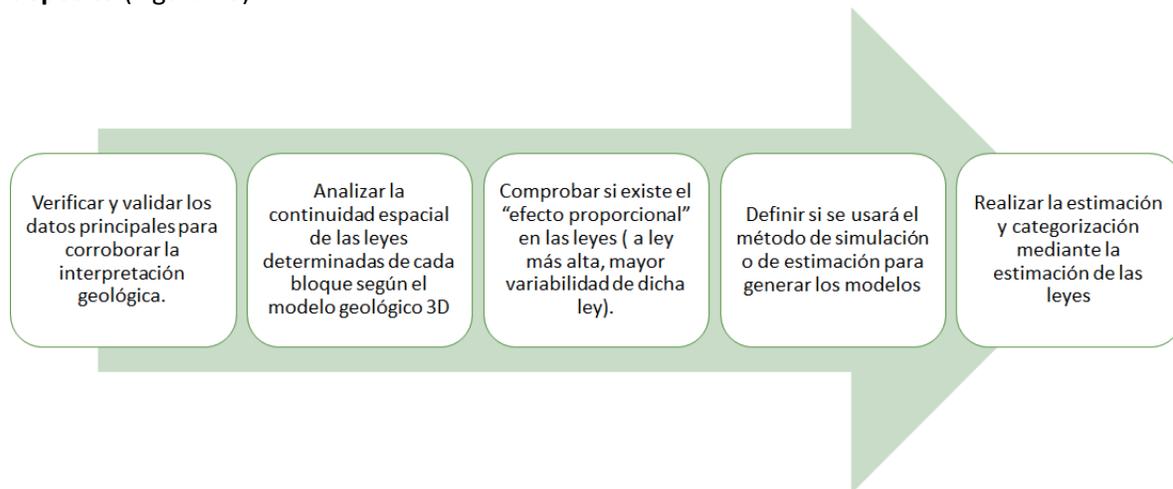


Figura 46: Procedimiento para la categorización de recursos y reservas. Fuente: Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana, 2020.

### Conceptos fundamentales:

**Métodos de estimación:** son un conjunto de técnicas cuyo radica en determinar la ley de un bloque, minimizando la varianza de la estimación. Entre estos métodos se encuentran:

- Poligonal
- Vecino más cercano
- Triangulación
- Inverso de la distancia
- Krigging

**Métodos de simulación:** conjunto de procedimientos mediante los cuales se cuantifica la incertidumbre de la ley de cada bloque, basándose en la generación de varios modelos numéricos que tratan de simular las características espaciales del depósito.

Como pauta principal, ya sea por el método de **estimación** o el método de **simulación**, ambos arrojan una medida del **error** en la estimación de la ley, denominada **varianza**. Esta medida del error puede ser utilizada como **valor de corte** para categorizar los recursos y las reservas, como, por ejemplo:

- Recursos medidos: aquellos cuya varianza de estimación (de *krigging* o simulación) sea inferior o igual a 1.5 veces la varianza media de los datos
- Recursos indicados: aquellos cuya varianza de estimación (de *krigging* o simulación) sea superior a 1.5 veces e inferior a 2 veces la varianza media de los datos.
- Recursos inferidos: aquellos que se encuentren a una distancia menor a 150 metros de una muestra y que no se hayan clasificado como medidos o indicados.

**Método de estimación (*krigging*):** Este método radica en calcular la **varianza** para cada bloque. Esta varianza mide básicamente la dispersión del error cometido. Con el uso del *krigging* se asume una sola varianza de las leyes, que es constante todo el tiempo. Algo importante de este método es que solo tiene en cuenta la **configuración espacial** de los datos, no sus **valores**.

Usando este método se puede presentar el **efecto proporcional**, que se define como un aumento de la varianza o la dispersión del error, en las zonas con altas leyes y una disminución de la varianza o la dispersión del error, en zonas con leyes bajas.

Otra posibilidad de usar este método radica en definir una **varianza relativa**, normalizando la varianza por la ley estimada. Esta varianza relativa también funciona para determinar categorías de recursos y reservas.

También es posible determinar diferentes **modelos de *krigging***, teniendo en cuenta la **densidad de información disponible**. En las zonas donde existe una mayor cantidad de información, se planificará un modelo de *krigging* robusto y exigente. Este modelamiento dejará por fuera zonas con menor densidad de datos, por lo que a estas zonas se les diseña un modelo de *krigging* más flexible y menos exigente que el anterior. Las zonas que queden excluidas de este segundo plan de *krigging* por falta de información, se les diseñará otro modelo de *krigging* mucho más permisivo, lo cual permite generar valores de estimación de menor calidad. Con base a lo anterior, las categorías se definen teniendo en cuenta el plan de *krigging* implementado:

- Recursos medidos: primer plan
- Recursos indicados: segundo plan.
- Recursos inferidos: tercer plan.

Una desventaja de este método es que es susceptible a la manipulación y manejo indebido del procedimiento para generar recursos con poca o nula información.

**Métodos de simulación:** su objetivo es cuantificar la incertidumbre de la ley de cada bloque, basándose en la generación de varios modelos numéricos que tratan de simular las características

espaciales del depósito. Cada modelo posee un histograma que se relaciona con el histograma representativo de la ley. Este método tiene **en cuenta los valores de los datos, además de su ubicación.**

Con los modelos numéricos generados, es posible determinar una varianzas locales o condicionales, que dependen de la ley de las muestras cercanas, por lo que tiene en cuenta el **efecto, proporcional.**

Una gran ventaja de este método es que los diferentes modelos que son simulados pueden ser utilizados en la planificación minera, teniendo en cuenta diferentes escenarios como diferentes diseños de mina, y leyes de corte, dando la posibilidad a definir posibles producciones mensuales y sus incertidumbres.

En este método, también es posible determinar la **varianza relativa**, que puede ser utilizada para definir los valores de corte para la categorización.

En el caso de las esmeraldas colombianas, se recomienda utilizar el **método de simulación**, ya que da la posibilidad de generar varios modelos, lo que abre diferentes escenarios y opciones de incertidumbre de las leyes, que pueden ser entradas a discutir por la persona competente o personal con experiencia y su equipo. Esto, teniendo en cuenta que puede llegar a ser muy complicado determinar la continuidad geológica y las características geométricas de un depósito de esmeraldas, por lo que una sola medición de la varianza o incertidumbre puede llegar a ser insuficiente.

Para el caso de la **categorización de reservas**, se toma únicamente la categorización resultante en cuanto a los recursos medidos e indicados, teniendo en cuenta los factores modificadores (mineros, ambientales, sociales y económicos) y los estudios de factibilidad. Adicionalmente, unas buenas prácticas para la categorización de reservas son

**Para reservas probables:**

- Recurso eventualmente medido
- Incluir material de dilución
- Incluir pérdidas de explotación

**Para reservas probadas:**

- Recurso medido
- Incluir material de dilución
- Incluir pérdidas de explotación
- Incluir regulaciones ambientales.
- La valoración de la gema (para este caso, es bueno apoyarse en históricos de producción y ventas del título minero, o datos de ventas por quilate de esmeralda en Muzo, Bogotá, valores de exportación por quilate, con el objetivo de obtener precios promedio).

### **Errores comunes:**

- Centrarse solo en uno o dos de los principios fundamentales y no tomarlos como un **todo**. Por ejemplo, categorizar solamente teniendo en cuenta la continuidad geológica del depósito.
- Categorizar los recursos sin poseer una apropiada cantidad de datos ni un modelo geológico completo y avaluado por la persona competente o experta.
- Categorizar las reservas sin tener en cuenta diferentes factores como dilución, accesibilidad, ley de corte, reconciliación, factores mineros, valor en el mercado del quilate de esmeralda, plan minero conceptual, tonelaje planificado, costos de la mina.

### **Más información:**

Ortiz J., Emery X. - Categorización de recursos y reservas mineras.

Rossi, M. E., & Deutsch, C. V. (2014). Mineral resource estimation (1st ed.). Dordrecht, Germany: Springer.

Watts, Griffis and McQuat - Technical Report on the Coscuez Emerald Mine, Boyacá Department, Colombia for Fura Gems Inc.

## **4.15. Auditorías para estimación**



### **Descripción:**

Los procesos realizados para obtener la estimación de recursos o de reservas deben estar en la capacidad de poder ser auditados, tanto por personal de la misma empresa externo a la estimación, como por terceros. Por tal motivo se sugiere que las actividades asociadas a la estimación estén organizadas en procesos, que faciliten las auditorías.

El procedimiento para realizar una auditoría está analizado en la Parte 2 – Sección Auditorías de Muestreo (2.14) de esta Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana. La presente sección hará una relación de los procesos asociados a las estimaciones de recursos y reservas minerales.

### **Desarrollo:**

Se sugiere que los procesos asociados a las estimaciones de recursos y reservas estén documentados, de tal manera que la información tenga trazabilidad y sea fácilmente auditable tanto por un grupo interno como por un tercero.

Entre los aspectos asociados a estimación de reservas se recomienda realizar protocolos para las siguientes áreas:

- Base de datos.
- QA / QC.
- Auditoría de ensayos de laboratorio
- Modelo geológico.
- Metodología de clasificación de recursos.

En la estimación de reservas se sugiere realizar protocolos a los siguientes aspectos:

- Análisis de factores mineros.
- Análisis de los factores modificadores.
- Análisis de mercado.
- Costos y rentabilidad.

Adicionalmente se recomienda hacer auditorías a otros aspectos tales como procesos financieros/contables, al Sistema de gestión en seguridad y salud en el trabajo y de los recursos humanos con el fin de tener una visión global del proyecto.

Finalmente, en caso de tercerizar o subcontratar actividades como muestreo, laboratorio etc., se sugiere que haya una supervisión a los resultados entregados por el proveedor, así que sus informes y procedimientos estén alineados a los procedimientos, metodología y estándares utilizados por la empresa minera.

#### ***Errores comunes:***

- Desentendimiento por parte de la Alta Dirección (dueños de la mina, gerentes o líderes) en los procesos de auditorías, sin asignar al personal recursos para realizar las auditorías y ausentarse de las reuniones de apertura y cierre de la auditoría. La única manera de tener un efecto en las auditorías es con el apoyo de las directivas para que las oportunidades de mejora y las inconformidades puedan ser salvadas.
- No realizar auditorías periódicamente por apatía a realizar el proceso. Las auditorías periódicas, por ejemplo una auditoría anual, identifican problemas que debido a la rutina de la operación minera se han ignorado.

#### ***Más información:***

Bustillo Revuelta, M. (2018). Mineral resources: From exploration to sustainability assessment. Madrid, Spain: Springer. doi:10.1007/978-3-319-58760-8.

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. (2016). Chapter 13 Mineral Resources Classification. In Essentials of mineral exploration and evaluation (pp. 309-320). Amsterdam, Netherlands, NL: Elsevier.

#### 4.16. Discusión de la confianza relativa



##### **Descripción:**

En la evaluación de la viabilidad de un proyecto minero, ya sea para decidir la inversión y financiamiento de este, o discutir el plan de operación minera y el diseño de mina, un factor determinante radica en evaluar y analizar los valores de los resultados de la exactitud, el error y la incertidumbre de las leyes encontradas para cada bloque definido, y determinar, con base a la experiencia, que grado de confianza arrojan las estimaciones realizadas.

##### **Desarrollo:**

Al momento de analizar y discutir la confianza relativa que reflejan todos los datos recolectados de la exploración realizada, el modelo geológico, y la categorización de los recursos y reservas, es bueno tener en cuenta las siguientes determinantes:

1. El nivel de confianza de las estimaciones, tanto para recursos o reservas, se basa en:
  - Grado del conocimiento geológico del depósito
  - La cantidad y el modelo de perforaciones exploratorias realizadas, que buscan delimitar el cuerpo mineralizado. No es lo mismo perforar solamente mediante perforaciones totalmente verticales, a realizar perforaciones en varios ángulos.
  - La cantidad, calidad y ubicación espacial de datos geofísicos, geoquímicos, mineralógicos, que alimentan el modelo 3D y que son determinantes para establecer la calidad del recurso.
  - El método geoestadístico aplicado en la categorización ya sea de estimación (kriging) o simulación.
2. El grado de confianza aumentará a medida que se tenga mayor cantidad de datos.
3. A su vez, a mayor cantidad de perforaciones realizadas, se disminuye la incertidumbre y se aumentará la confianza en cuanto a la continuidad del depósito.

Teniendo en cuenta las tres determinantes, al finalizar el proceso, **se tendrán bloques de los que se tengan mayor confianza respecto a otros bloques.**

En general, para el análisis de la confianza, una buena práctica es utilizar los datos de ley de cada bloque del **modelo geológico y de bloques 3D generado**. Sin embargo, para el correcto análisis de estos datos de ley, se desprende la buena práctica de analizar las determinantes mencionadas anteriormente.

Con base a la **Tabla 1 del Estándar Colombiano para el Reporte Público de Recursos y Reservas**, el profesional encargado del reporte deberá realizar una declaración firmada sobre la confianza de la

estimación de los valores de leyes determinados, por lo que es muy recomendable que dicha persona tenga en cuenta las recomendaciones descritas anteriormente, y además, adicione en dicha declaración, todos los procedimientos y metodologías realizadas para llegar a dichos valores, con su justificación de la aplicación de dicho método. Además, también se recomienda que incluya en esta declaración:

- Errores cometidos en cálculos o procedimientos, si fueron subsanados o no, y cómo se subsanaron.
- Reportes de auditorías realizados.
- Resultados de los cálculos y procedimientos.
- Factores adicionales (mineros, minerales adicionales, operacionales, extractivos, ambientales, financieros, etc.) que fueron tenidos en cuenta a la hora de establecer la confianza de la estimación de las reservas.

#### ***Errores comunes:***

- Determinar la confianza de una estimación, teniendo en cuenta sólo una o dos de las determinantes mencionadas. La confianza se debe determinar con base en el conocimiento geológico, la cantidad de los datos y las perforaciones realizadas para determinar la continuidad geológica y la geometría del depósito.
- En el caso de la esmeralda colombiana, se espera que exista una incertidumbre alta y baja confianza debido a las características intrínsecas del depósito, por lo que no es bueno expresar valores de confianza altos, a menos, que el **profesional encargado** tenga una gran cantidad de datos y confíe plenamente en ellos.

#### ***Más información:***

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (2019) Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- Tabla 1, Revisado el 3 de agosto, 2020, en <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>

Pohl, W. (2011). Economic geology: Principles and practice: Metals, minerals, coal, and hydrocarbons - introduction for formation and sustainable exploitation of mineral deposits. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.

## PARTE 5: REPORTE DE ESMERALDAS, PIEDRAS PRECIOSAS Y SEMIPRECIOSAS

### 5.1. Criterios para determinar la calidad de esmeralda colombiana en bruto

Exploración

✘ Recursos

✘ Reserva

Existen cuatro (4) factores que permiten definir la calidad de una gema tallada, los cuales influyen de manera directa sobre el valor comercial de la gema. Estos factores conocidos como las 4 C's por sus términos en inglés son: Cut (talla), Carat (peso), Clarity (claridad) y Color (color) no son aplicables de la misma manera para material en bruto. Por tal razón el Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (**CDTEC**) creó una metodología que se deriva de las 4 C's para ser aplicada en la evaluación de calidad del recurso esmeraldífero en la guía de buenas prácticas del estándar colombiano de recursos y reservas ECR que se denominó "Las 3C's del material en bruto".

Para la aplicación de la metodología de las 3C's el evaluador debe ser un profesional con experiencia dentro de las siguientes áreas del conocimiento: (geología, gemología, química y física o una experiencia comprobada dentro del sector de al menos 10 años). Es recomendable que tenga conocimientos en talla.

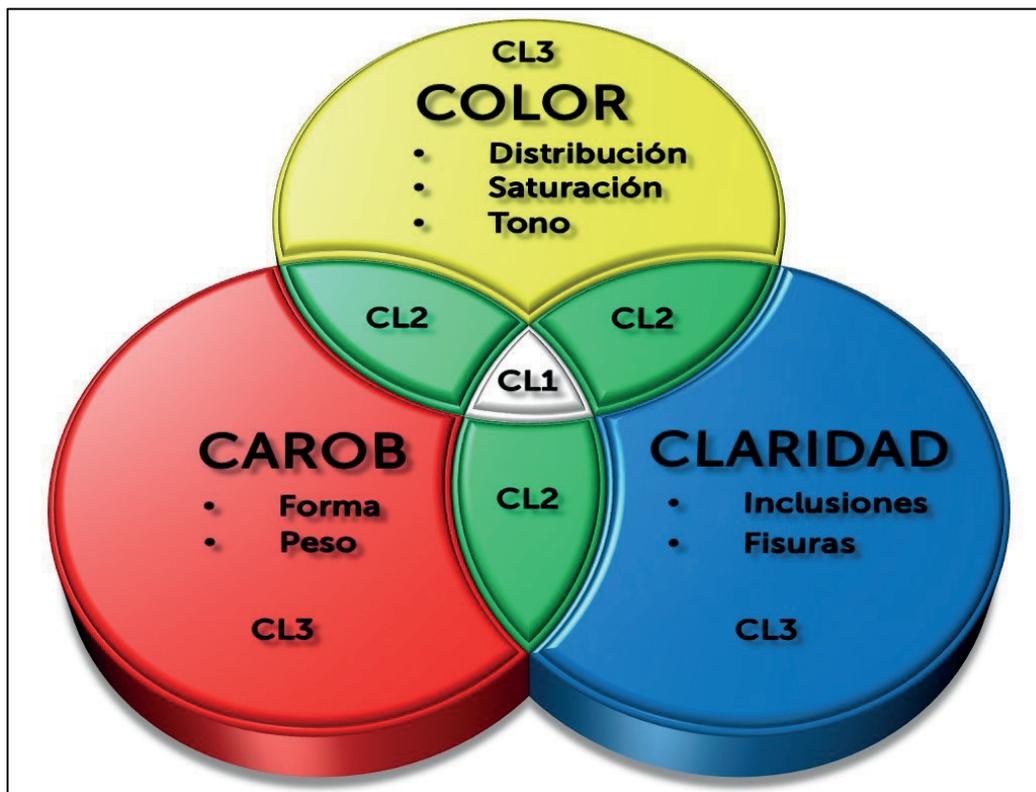


Figura 47. Interacción de las 3C's de calidad. Fuente: CDTEC, 2020

Los factores individuales por sí solos no determinan la calidad de la gema, se necesita de la interacción de los tres para realizar una evaluación ajustada a la realidad (Figura 47)

## Color

El color de la esmeralda es uno de los tres principales factores para determinar su calidad. El color se compone de tres elementos, Matiz, Tono y Saturación (Munsell, 1905). Para su clasificación se emplea esta definición y se establecen los tres parámetros de graduación en la calidad de las esmeraldas en bruto:

### Distribución del color

Se refiere a la distribución y ubicación del color en el cristal.

- Homogéneo: El color es uniforme en todo el cristal
- Zonación del Color: El color se encuentra concentrado en diferentes partes del cristal, sobre la base, en las caras, en el centro o en los extremos del cristal y se denominan de la siguiente manera:
  - A. Zonación Perimetral
  - B. Zonación Tipo Diana
  - C. Zonación Basal
  - D. Zonación Código de Barras

La zonación se puede presentar en diferentes grados como una relación entre el volumen de la gema y el color, que va de 0.1 a 1 (Figura 48).

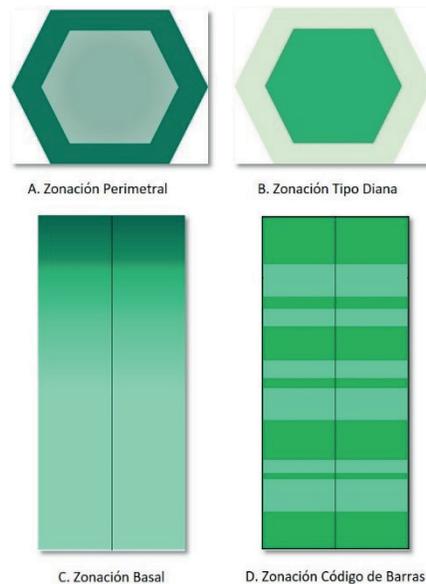


Figura 48. Ejemplo de zonación en esmeralda colombiana, vista sagital. Fuente: CDTEC, 2020

***Solo se tiene en cuenta la saturación y el tono, se entiende que al ser esmeralda el matiz siempre será el mismo (verde).***

### ***Saturación***

Es la intensidad de un color. Se define desde el color más puro hasta su mínimo que corresponde a un grisáceo, por lo tanto se dice que un color es intenso cuando está muy saturado (Munsell, 1905). En la esmeralda se define de verde grisáceo a Verde (Figura 3):

- Verde Grisáceo
- Medianamente grisáceo
- Ligeramente verde grisáceo
- Muy ligeramente verde grisáceo
- Moderadamente verde fuerte
- Verde Intenso
- Verde Fuerte
- Verde Vivido

***Los grados de saturación que definen la más alta calidad en esmeralda son Verde Fuerte y Verde Vivido.***

### ***Tono***

Se define como el grado de oscuridad o claridad de un color y se clasifica de la siguiente manera (Figura 49):

- Extremadamente Claro
- Muy Claro
- Claro
- Medio
- Medio oscuro
- Oscuro
- Muy Oscuro
- Extremadamente Oscuro

El análisis por Fluorescencia de Rayos X con Energía Dispersiva (ED FRX) es el método por el cual se pueden definir las relaciones Cr, V y Fe, elementos que dan el color verde en la Esmeralda. Estas relaciones permiten identificar las concentraciones de estos elementos y así definir de manera semicuantitativa parámetros de calidad del color. Para la esmeralda colombiana los rangos están entre: V: 0.071 - 0.39 %, Cr: 0.012 - 1.1 % y Fe: 0.07 - 0.30 %. Este método elimina la subjetividad de la graduación en la saturación y tono del color.

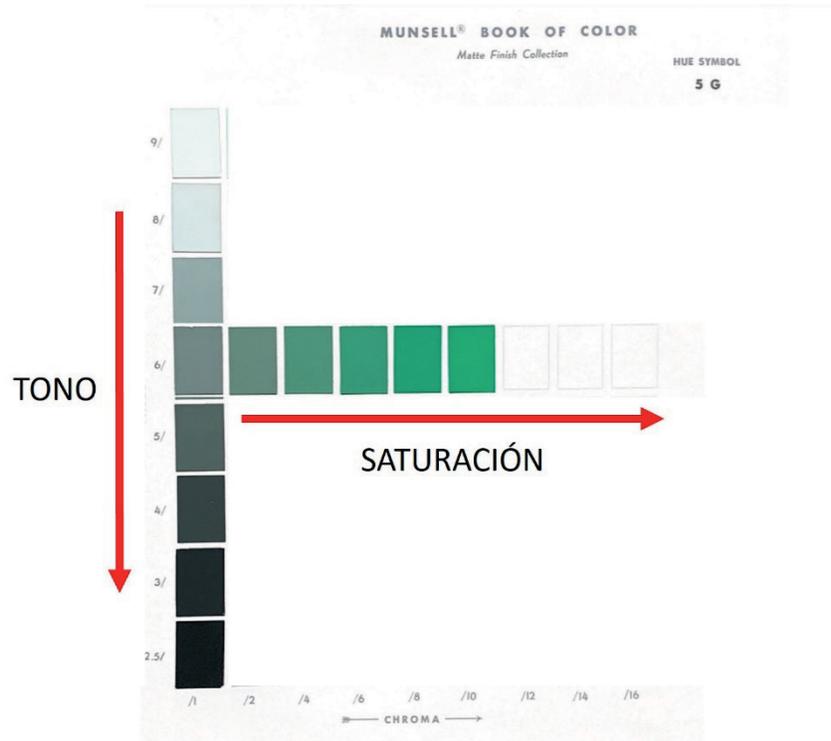


Figura 49. Escala de Tono y Saturación del color verde. Modificado de Munsell Book of Color. Fuente: CDTEC, 2020

### **Claridad**

Se entiende por claridad la ausencia relativa de inclusiones e imperfecciones, una esmeralda que no tenga inclusiones y fisuras perceptibles al ojo es excepcional, por esta razón este tipo de esmeraldas requieren de una valoración especial.

En las esmeraldas colombianas se presentan inclusiones de diversos tipos (sólidas, fluidas y fisuras que llegan a la superficie).

Para efectos de la metodología de evaluación de calidad en el factor claridad del material en bruto se tienen en cuenta dos dimensiones (Inclusiones Sólidas y Fluidas) y (Fisuras).

La clasificación de la claridad debe realizarse

### **Inclusiones Sólidas y Fluidas**

Según Gübelin (1953) es cualquier sustancia que se encuentra atrapada dentro de un cristal. En la evaluación se determina la relación entre las inclusiones y la calidad de acuerdo con los siguientes factores:

- Ubicación.
- Tamaño
- Forma
- Tipo

### ***Fisuras***

Es una separación dentro de la esmeralda que puede estar vacía o rellena de otro material (Manutchehr-Danai, 2005).

***En la esmeralda colombiana se presentan algunas excepciones con la presencia de inclusiones. Los trapiches (Schmetzer, 2019) y Ojos de Gato son dos variedades de esmeralda que deben su origen a las inclusiones.***

Los siguientes son los rangos de clasificación de claridad:

- Libre de Inclusiones a lupa
- Libre de Inclusiones al ojo
- Pequeñas inclusiones al ojo
- Moderadamente Incluida
- Altamente incluida
- Extremadamente incluida

***Una esmeralda en bruto puede presentar dos o más rangos de clasificación en diferentes zonas del cristal.***

La observación por microscopía permite la identificación y análisis de las inclusiones y fisuras, de este modo se puede realizar una mejor clasificación de la claridad y un mapeo de sus fisuras, esto facilita la ubicación en la talla.

### ***CAROB<sup>1</sup>***

El valor comercial de una gema varía con relación a su peso, ejemplo, una esmeralda de 0.99 ct<sup>2</sup> cuesta mucho menos que una esmeralda de 1.00 ct, esta es una condición del mercado mundial. Hay que tener en cuenta que al presentarse determinados pesos el valor aumenta de manera drástica, estas se conocen como fronteras de peso, y en gemas de color se determinan de la siguiente manera: 1, 3, 5, 7, 10 y 15 ct. Las esmeraldas talladas con un peso superior a este último se consideran extremadamente raras y deben ser valoradas de una manera independiente. Para esmeraldas en bruto se debe tener presente la pérdida de peso en el proceso de transformación (Talla) que en Colombia es alrededor del 70%, es decir, para obtener una gema de 1 ct tallada su bruto debe pesar aproximadamente 4 ct.

Para efectos de la metodología de evaluación de calidad en el factor carao del material en bruto se tienen en cuenta dos dimensiones (Forma y Tamaño):

---

<sup>1</sup> Carob significa algarrobo en español. Sus semillas eran usadas como patrón para pesar gemas debido uniforme tamaño y un peso de aproximadamente 200 mg lo mismo que 1 ct.

<sup>2</sup> Un quilate (ct) equivale a 0.2 gramos (g), es decir, 1 g es igual a 5 ct.

### **Forma**

Es la apariencia externa del cristal. Entre mejor definido este el cristal en su hábito y su forma, mayor es el porcentaje de aprovechamiento del tamaño del material en su proceso de transformación (Talla). Se define de la siguiente manera:

- Excelente: cristales bien formados con caras bien definidas (euhedral).
- Muy buena: cristales euhedrales con algunas desportilladuras y fracturas leves.
- Buena: cristales medianamente formados con algunas caras definidas (subhedral).
- Mala: cristales irregulares sin caras definidas, dentro de estos se pueden incluir fragmentos de un cristal. (anhedral).

### **Peso**

Debido a las condiciones geológicas en Colombia una esmeralda de gran tamaño es muy difícil de encontrar. El peso de una gema está relacionado al tamaño, entre más tamaño mayor es el peso y mayor es su valor económico.

De acuerdo con los anteriores factores se presenta la siguiente clasificación de calidad para esmeraldas colombianas en bruto.

### **Clasificación de calidades**

Estos son los tres grados generales de calidad para esmeraldas colombianas en bruto, a partir de estos se definen unas sub-calidades tomando en cuenta los diferentes rangos presentes en cada uno de los tres factores, Color, Claridad y Carob.

1. **Calidad 1 o Alta Calidad (CL1).** Esmeraldas que presentan los rangos más altos de los tres factores de calidad.
2. **Calidad 2 o Media Calidad (CL2).** Esmeraldas que presentan uno de los tres factores a la baja y los otros dos con variación.
3. **Calidad 3 o Baja Calidad (CL3).** Esmeraldas que presentan un factor que varía y los otros dos a la baja.

### **Consideraciones**

Para la clasificación de calidad descrita en este manual se deben tener las siguientes consideraciones.

1. Material sometido a procesos de relleno de fisuras.
2. Variedades tipo trapiche.
3. Esmeraldas Excepcionales son aquellas que no entran dentro de la clasificación anteriormente presentada las cuales exceden los rangos en las dimensiones de clasificación.
  - Color: distribución homogénea, tono oscuro a muy oscuro y saturación verde vivo.
  - Claridad: libre de inclusiones y fisuras.

- Carao: forma excelente con pesos superiores a 50 ct. en bruto.

### ***Más Información***

Gübelin, E. J., & Gübelin, E. J. (1953). Inclusions as a means of gemstone identification. Gemological Institute of America.

Manutchehr-Danai, M. (2008). Dictionary of gems and gemology. Berlin, Germany: Springer.

Munsell, A. H. (1905). A color notation. Boston, MA: G.H. Ellis.

Pignatelli, I., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Agrosi, G., Mathieu, S., Morlot, C., & Branquet, Y. (2015). Colombian Trapiche Emeralds: Recent Advances in Understanding Their Formation. *Gems & Gemology*, 51(3). Revisado el 29 de septiembre de 2020 en doi: 10.5741/gems.51.3.222.

Schmetzer, K. (2019). Trapiche Emerald from Colombia. *Gems and Gemology*. Revisado el 29 de septiembre de 2020 en <https://www.gia.edu/doc/Spring-2019-Gems-Gemology-v2.pdf>

Sudarat Saeseaw, V. P. (2014). Three-Phase Inclusions in Emerald and Their Impact on Origin Determination. *Gems and Gemology*.

# GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS DE LA ESMERALDA COLOMBIANA

Cómo desarrollar un proceso de buenas prácticas orientadas a la exploración y estimación de recursos y reservas sobre un depósito esmeraldífero en Colombia.

