



Universidad de Buenos Aires
ARGENTINA



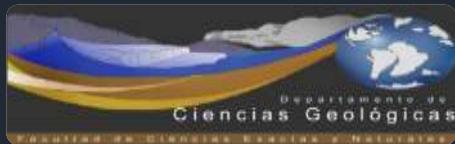
TRABAJO FINAL INTEGRADOR

Título: Análisis y caracterización de depósitos esmeraldíferos en Colombia, y su potencial para el desarrollo de proyectos mineros

Autor: Jaime Andrés Guerrero Pérez

Director: Dr. Carlos Herrmann

2019





UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS ESMERALDÍFEROS EN COLOMBIA, Y SU POTENCIAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS MINEROS*

Autor: Jaime Andrés Guerrero Pérez **

Palabras clave: Esmeralda, Depósitos Esmeraldíferos, Cinturón Esmeraldífero, Mina, Prospección, Exploración, Recursos, Lutitas, Cretácico.

RESUMEN

Los depósitos esmeraldíferos en Colombia localizados sobre los flancos de la Cordillera Oriental denominados Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO) y Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR), fueron formados bajo condiciones metalogénicas particulares que influyeron directamente en la calidad de las gemas; éstas han adquirido estatus internacional por su belleza. Debido a la singularidad de los procesos de formación en relación con otros reconocidos en el mundo, estos depósitos han sido estudiados por diversos autores quienes después de numerosos planteamientos concuerdan un modelo de depósito relativamente aceptado, relacionando su génesis con rocas sedimentarias, condiciones de baja presión y temperatura, y fuerte control tectónico.

La explotación de estos recursos ha cambiado de manera significativa en los últimos años, dejando atrás métodos poco tecnificados y profesionales para convertirse en operaciones relativamente completas y con estándares internacionales. En la actualidad, la inversión en un proyecto minero de esmeraldas en Colombia, es una gran oportunidad no solo para las empresas mineras sino también para el país. A través de varios logros, como unirse al Comité de Normas Internacionales de Informes de Reservas Minerales (CIRISCO) e instalaciones para la inversión, ha llevado a la minería a los mejores escenarios internacionales.

*Trabajo Final Integrador (TFI).

** Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas. Especialización en Geología Minera. Director: Dr. Carlos Herrmann.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF EMERALD DEPOSITS IN COLOMBIA, AND ITS POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF MINING PROJECTS*

Author: Jaime Andrés Guerrero Pérez**

Key words: Emerald, Emerald Deposits, Emerald Belt, Mine, Prospecting, Exploration, Resources, Shale, Cretaceous.

ABSTRACT

Emerald deposits in Colombia located on the flanks of the Eastern Mountain Range called the Western Emerald Belt (CEO) and the Eastern Emerald Belt (CEOR), were formed under particular metallogenic conditions that directly influenced the quality of the gems; these have acquired international status for their beauty. Due to the uniqueness of the formation processes in relation to others recognized in the world, these deposits have been studied by various authors who after numerous approaches today agree on a relatively accepted deposit model, relating their genesis to sedimentary rocks from conditions of low pressure and temperature with tectonic affects.

The exploitation of these resources has changed significantly in recent years, leaving behind non-technical and unprofessional methods to become quite complete operations with international standards. At present, an emerald mining project investment in Colombia, is a great opportunity not only for mining companies but also for the country. Through various achievements, such as joining the Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO) and facilities for investment, it has led mining to the best international scenarios.

*Final Project (TFI).

** Universidad de Buenos Aires. Faculty of Exact and Natural Sciences. Department of Geological Sciences. Specialization in Mining Geology. Director: Dr. Carlos Herrmann.

**TABLA DE CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	10
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.1 FASE 1: COMPILACIÓN Y ORDENAMIENTO DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.2 FASE 2: INTERPRETACIÓN Y DESARROLLO DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA	11
2.3 FASE 3: ELABORACIÓN Y EDICIÓN DEL DOCUMENTO FINAL	11
3. GEMAS: ESMERALDAS	12
3.1 PROPIEDADES	12
3.2.1 Color	15
3.2.2 Claridad	15
3.2.3 Carat (ct), Quilate	16
3.2.4 Talla	16
3.2.5 Corte	16
4. ESMERALDAS EN COLOMBIA.....	17
4.1 UBICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE ESMERALDAS	17
4.1.1 Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO)	18
4.1.2 Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR)	19
4.2 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA.....	19
4.3 GEOLOGÍA REGIONAL	21
4.4 GEOLOGÍA DE LOS CINTURONES ESMERALDÍFEROS	23
4.5 MINERALIZACIÓN	26
4.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	27
4.7 EDADES DE LA MINERALIZACIÓN	30
4.8 GEOQUÍMICA E ISOTOPÍA	30
4.9 INCLUSIONES FLUIDAS Y MICROTERMOMETRÍA	31
5. DEPÓSITOS ESMERALDÍFEROS EN EL MUNDO. COMPARACIÓN CON EL MODELO COLOMBIANO.....	33
5.1 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON ACTIVIDAD MAGMÁTICA.....	34
5.2 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON METAMORFISMO	37
5.3 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON PROCESOS HIDROTERMALES.....	38
5.3.1 Depósitos hidrotermales con influencia magmática.....	38
5.3.2 Depósitos hidrotermales sin influencia magmática (Colombia)	38
5.4 COMPARACIÓN DE CALIDAD DE ESMERALDAS	43



6.	PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE ESMERALDAS EN COLOMBIA	46
6.1	PROVINCIAS METALOGÉNICAS EN COLOMBIA	46
6.2	PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN.....	49
6.3	PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA.....	50
6.4	PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN GEOFÍSICA.....	52
6.5	IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PROSPECTABLES.....	54
7.	MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN.....	57
8.	MERCADO DE ESMERALDAS.....	61
9.	DESARROLLO DE UN PROYECTO MINERO DE ESMERALDAS EN COLOMBIA.....	63
9.1	INSTITUCIONALIDAD MINERA	64
9.2	PROPIEDAD DE RECURSOS MINEROS Y CONCESIONES MINERAS.....	64
9.3	PROCEDIMIENTOS	66
9.4	CICLO MINERO.....	68
9.5	OBLIGACIONES ECONÓMICAS.....	69
9.6	INCENTIVOS FISCALES	71
9.7	COMISIÓN COLOMBIANA DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES	72
9.8	DESARROLLO SOSTENIBLE.....	73
10.	PROYECCIÓN ECONÓMICA DE LA MINERÍA DE ESMERALDAS EN COLOMBIA	76
10.1	PROYECCIÓN PARA LA OFERTA	76
10.2	PROYECCIÓN PARA LA DEMANDA.....	78
11.	CONCLUSIONES	80
12.	RECOMENDACIONES	82
	AGRADECIMIENTOS.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	84



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del berilo.....	14
Figura 2. Variabilidad del color de una esmeralda.....	15
Figura 3. Talla de una esmeralda y su relación con la calidad del resultado	16
Figura 4. Localización de los cinturones esmeraldíferos de Colombia	17
Figura 5. Hidrografía del cinturón esmeraldífero occidental (CEOc).....	20
Figura 6. Hidrografía del cinturón esmeraldífero oriental (CEOr).....	20
Figura 7. Modelo tectónico de la placa Sudamericana.....	22
Figura 8. Esquema Oeste-Este de los Andes colombianos.....	22
Figura 9. Columnas litoestratigráficas en el CEOc.....	24
Figura 10. Columnas litoestratigráficas en el CEOr.....	25
Figura 11. Modelo de la mineralización de esmeraldas en el CEOc	26
Figura 12. Estructuración del CEOc en las zonas de Coscuez y Muzo.....	28
Figura 13. Sucesión de eventos tectónicos que contribuyeron al emplazamiento de las esmeraldas en Colombia.	28
Figura 14. Estructuras hidrotermales en zonas mineralizadas.	29
Figura 15. Inclusiones polifásicas en cuarzo y calcita en depósitos del CEOc	31
Figura 16. Inclusiones fluidas primarias en esmeralda de Chivor en el CEOr	32
Figura 17. Distribución mundial de las mineralizaciones de esmeralda.....	33
Figura 18. Espiral del tiempo para la formación de distintos tipos de depósitos de esmeralda en el mundo..	34
Figura 19. Modelo teórico para la formación de esmeralda en los depósitos relacionados con actividad magmática alojados en rocas máficas y ultramáficas..	36
Figura 20. Esquema teórico de la formación de esmeraldas en Colombia.....	39
Figura 21. Inclusión de parisita en esmeralda de Colombia.	40
Figura 22. Inclusión de pirita en esmeralda de Colombia.....	40
Figura 23. Promedio de concentración de Fe en esmeraldas de distintas zonas de Colombia, y muestras de depósitos de Afganistán y Brasil.....	43
Figura 24. Promedio de concentración de Sc en esmeraldas de distintas zonas de Colombia, y muestras de depósitos de Afganistán y Brasil.....	44
Figura 25. Resultados de análisis realizados a dos esmeraldas colombianas.....	45
Figura 26. Resultado de análisis realizado a esmeralda de diferente origen.....	45



Figura 27. Mapa de depósitos y ocurrencias minerales Grupo 1: Metales preciosos y gemas.	
Provincias metalogénicas. Escala 1:1.500.000.....	48
Figura 28. Valores isotópicos en venas productivas y no productivas de esmeraldas.	51
Figura 29. Método de polarización inducida y resistividad aplicado al área de operación en la mina Puerto Arturo en el CEOC.....	53
Figura 30. Identificación de áreas prospectables por esmeraldas en las áreas aflorantes de la Fm Rosablanca y Fm Muzo en el CEOC..	54
Figura 31. Identificación de áreas prospectables por esmeraldas en las áreas aflorantes de la Fm Santa Rosa y Fm Chivor en el CEOR.....	55
Figura 32. Galerías con sostenimiento de madera en mina ubicada en el CEOC..	58
Figura 33. Rampa con sostenimiento de puertas metálicas y shotcrete en mina ubicada en el CEO.....	59
Figura 34. Sección transversal del modelo de cuerpo mineralizado en el CEOC.....	60
Figura 35. Modelo operativo para la extracción de esmeraldas en el CEOC..	60
Figura 36. Producción y exportación de esmeraldas en Colombia.....	61
Figura 37. Mapa de los países productores de esmeraldas.....	62
Figura 38. Producción mundial de esmeraldas y participación de los principales países productores.....	62
Figura 39. Institucionalidad Minera de Colombia.....	64
Figura 40. Aplicación de un contrato de concesión minera.....	66
Figura 41. Procedimientos legales para realizar minería en Colombia.....	67
Figura 42. Ciclo de actividad minera en Colombia.....	68
Figura 43. Valor del canon superficiario en Colombia para proyectos mineros.	69
Figura 44. Porcentaje de regalía para un proyecto de esmeraldas en Colombia.	70
Figura 45. Países miembros del CIRSCO.....	72
Figura 46. Principios de la minería responsable del ICMM, en su totalidad aplicables a la minería de esmeraldas.	75
Figura 47. Proyección de oferta de esmeraldas en Colombia desde la actualidad hasta 2035, teniendo en cuenta modelo de continuidad, coexistencia y divergencia.....	77
Figura 48. Proyección de demanda de esmeraldas en Colombia desde la actualidad hasta 2035, teniendo en cuenta modelo de continuidad, coexistencia y divergencia.....	79



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades de la esmeralda.	12
Cuadro 2. Descripción de los atributos que presentan las gemas	13
Cuadro 3. Características de los depósitos esmeraldíferos en Colombia y su interpretación metalogénetica.....	41
Cuadro 4. Comparación y caracterización geológica de los diferentes tipos de depósitos esmeraldíferos en el mundo. Recuadro rojo: Depósitos de Colombia.	42
Cuadro 5. Títulos mineros asociados a esmeraldas para el 2018 en relación con probabilidades de éxito e inversión estimada para cada etapa de un proyecto.....	49
Cuadro 6. Condiciones favorables para prospección y exploración de esmeraldas en los cinturones esmeraldíferos.	56



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

INTRODUCCIÓN

Los depósitos esmeraldíferos de Colombia son reconocidos mundialmente por su alta calidad, formándose bajo condiciones geológicas de baja presión y temperatura. Las esmeraldas se caracterizan por su fluorescencia roja natural, producto de la reducida concentración de impurezas químicas en su composición.

La explotación de estos yacimientos localizados sobre los cinturones esmeraldíferos de la Cordillera Oriental de Colombia, datan desde épocas prehispánicas por parte de los indios Muzos, seguidos de los españoles en la época colonial; recién a principios del siglo XX el Estado colombiano asume el control de la actividad con la realización de diversos estudios por parte de agencias gubernamentales y universidades. Hoy, el nuevo escenario es liderado por la inversión de empresas mineras que juegan un papel fundamental en el mejoramiento técnico, social, económico y científico de las áreas de operación, dejando atrás tiempos en donde la explotación de estos recursos minerales era realizada bajo parámetros de informalidad, con pocos conocimientos geológicos y mediante operaciones técnicamente limitadas.

Por los motivos expuestos, el conocimiento de las características geológicas de los depósitos de esmeraldas de Colombia, resulta en la actualidad de vital importancia para identificar nuevas áreas de prospección y desarrollar el interés en la creación de nuevos proyectos mineros.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

1. OBJETIVOS

- Analizar la metalogenia regional de los depósitos esmeraldíferos en Colombia.
- Caracterizar y correlacionar los depósitos de esmeraldas de Colombia con otros depósitos esmeraldíferos en el mundo.
- Identificar áreas potenciales para la futura explotación de recursos esmeraldíferos (áreas prospectables).
- Evaluar las normativas y procedimientos actuales (técnicos, legales, ambientales y económicos) para desarrollar un proyecto minero de esmeraldas en Colombia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales para la elaboración del trabajo final integrador (TFI) son de fuente bibliográfica (publicaciones, textos, mapas e informes diversos). Su búsqueda se realizó a través de bibliotecas virtuales de universidades, Servicio Geológico Colombiano (SGC), Agencia Nacional de Minería de Colombia (ANM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi de Colombia (IGAC), Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (UPME), Federación Nacional de Esmeraldas de Colombia (FEDESMERALDAS), Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) e información publicada por las compañías mineras que operan en la zona, entre otros.

Además de las fuentes bibliográficas, este trabajo contó con el conocimiento previo adquirido por el autor en ocasión del tiempo de trabajo vinculado a una compañía minera que opera en el área.

La metodología para realizar el TFI se describe brevemente a continuación:

2.1 FASE 1: COMPILACIÓN Y ORDENAMIENTO DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta fase se realizó una búsqueda y compilación bibliográfica detallada de estudios y análisis realizados con anterioridad por diversos autores en la zona. También artículos, mapas geológicos, publicaciones y memorias explicativas.



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

2.2 FASE 2: INTERPRETACIÓN Y DESARROLLO DE LA INFORMACIÓN RECOPILADA

En esta fase se llevó a cabo la interpretación, análisis y desarrollo de toda la información obtenida previamente, aplicando los conocimientos aprendidos a lo largo de la Carrera de Especialización en Geología Minera e integrándolos con los conocimientos previos del autor.

2.3 FASE 3: ELABORACIÓN Y EDICIÓN DEL DOCUMENTO FINAL

Los resultados se presentaron de acuerdo con las normas vigentes, conteniendo texto, mapas, cuadros y figuras explicativas. Los capítulos son ordenados individualizando la información de las distintas áreas temáticas que abarcará el presente TFI (geológica, minera, legal, ambiental, económica).

**UBA**Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

3. GEMAS: ESMERALDAS

3.1 PROPIEDADES

Una gema es un material de origen inorgánico u orgánico, que reúne características como belleza, durabilidad, rareza y cuyo principal uso es el embellecimiento de una persona u objeto, o simple observación (*Cuadro 2*).

Las gemas “en bruto” a veces son también llamados objetos bellos, si bien su mayor estética y grado de belleza sólo se alcanza después de que es tallada y pulida para exponer en su mayor grado, su color y efectos ópticos. La durabilidad es una cualidad esencial, ya que una gema debe resistir el paso del tiempo, la abrasiva influencia del polvo, los golpes o roces contra otros objetos, el empañamiento, los daños químicos resultantes de la humedad, el humo u otros factores atmosféricos sin alterar su color. La rareza juega también un papel muy importante en el valor de las gemas, gobernada por la oferta y la demanda en función de la moda; el valor de mercado puede estar enormemente afectado por este factor.

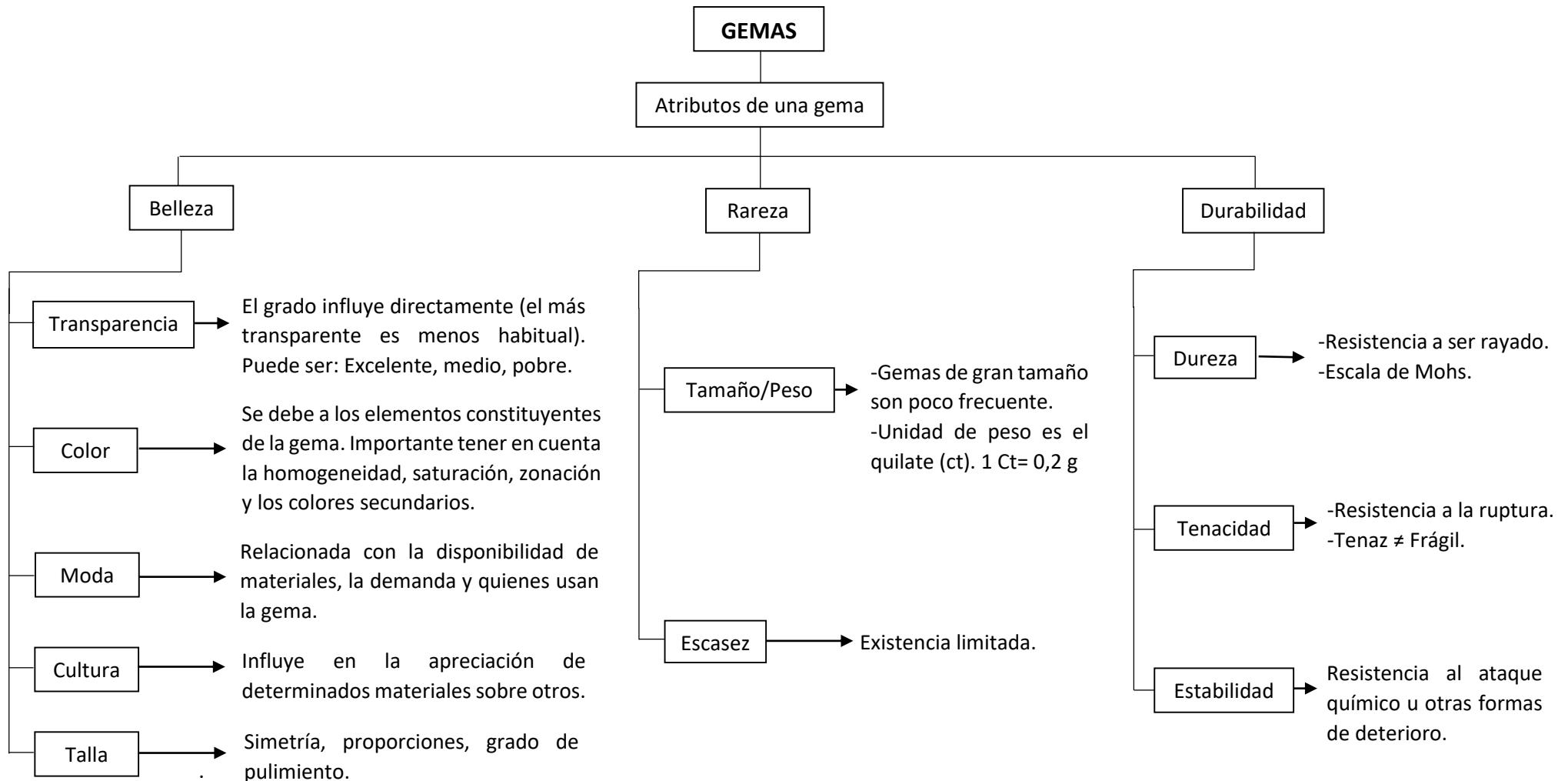
Cada especie mineral presenta una forma cristalográfica característica o hábito, que se define como la forma más común en que aparece y suele ser una forma geométrica o una combinación de dos o más formas geométricas. La esmeralda se encuentra como prismas hexagonales, presenta un hábito prismático y corresponde a una variedad del berilo. Su dureza se encuentra entre 7,5-8 en la escala de Mohs y su color está dado por la presencia de elementos químicos como el cromo y el vanadio (*Cuadro 1*).

Cuadro 1. Propiedades de la esmeralda. Realizado sobre la base de Terraza y Montoya (2011).

Propiedades de la Esmeralda

Categoría: Silicatos- Ciclosilicatos	Índice de refracción: 1,56 – 1,60
Familia: Berilo	Birrefringencia $\delta = 0,0040\text{--}0,0070$
Fórmula química: $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6\text{:Cr}$	Transparencia: De transparente a translúcido
Raya: Blanca	Carácter óptico: Uniaxial
Brillo: Vítreo	Sistema cristalino: Hexagonal
Hábito cristalino: Prismático	Exfoliación: Imperfecta
Fractura: De desigual a concoidea	Dureza: 7,5-8 en la escala de Mohs
Peso específico: 2,65 - 2,80	Luminiscencia frente a luz ultravioleta: Fluorescencia muy variable

Cuadro 2. Descripción de los atributos que presentan las gemas. Realizado sobre la base de Kubaczka (2019).



Además de las esmeraldas, existen diversas variedades de berilo que cuentan con similares propiedades químicas pero con diferentes colores. Algunas variedades son: goshenita (berilo incoloro, transparente), aguamarina (berilo transparente, azul verdoso), morganita (berilo rosa pálido a rosa naranja), heliodoro (berilo dorado, variedad amarillo oro), bixbita (berilo rojo), pezzottaita (berilo rojo a rosa).

La esmeralda es un silicato de estructura anular del grupo de los ciclosilicatos que están formados por anillos de tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ enlazados con una relación Si: O=1:3 en el que el anillo $(\text{Si}_6\text{O}_{18})^{12-}$ es el armazón básico del berilo. Las formas más comunes de los cristales son prismas de primer orden, prismas con facetas piramidales y prismas dihexagonales. El hábito es prismático, frecuentemente estriado verticalmente. La exfoliación es imperfecta (0001), principalmente a través de su eje más largo (eje **C**), (Hurlbut y Klein, 1994), (Fig. 1).

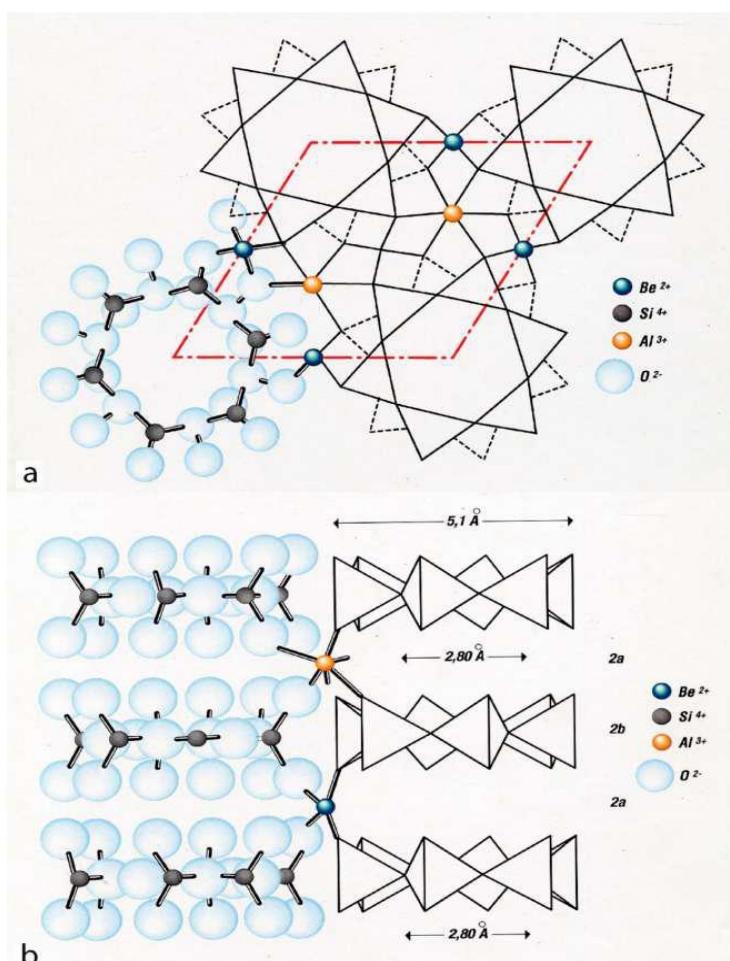


Figura 1. Estructura del berilo. a) Anillos de silicato hexagonal apilados paralelos al eje **C** se mantienen unidos por Al³⁺ (octaédrico) y Be²⁺ (tetraédrico). b) Vista lateral perpendicular al eje **C**. Tomado de Charoy (1998) en Giuliani *et al.* (2019).

3.2 VALOR DE LA ESMERALDA

Establecer un precio fijo para una esmeralda no es posible, inclusive teniendo dos gemas con similares características. Además de no ser un *commodity*, el valor está dado por la consideración del comprador, quien tiene en cuenta variables sustentadas en el trabajo del Instituto Gemológico de América (GIA) para la graduación de diamantes, ayudando a los consumidores a comprender las pequeñas diferencias en la calidad de las gemas y asimilando el precio adecuado para adquirirlas.

Este sistema de valuación se denomina las “4 Cs”, utilizándose 3 de ellas para las características físicas de las gemas y la restante determinada por la experticia de artesanos en el tema. Las cuatro variables para determinar el precio de una esmeralda son:

3.2.1 Color

El color de una esmeralda está dado por su contenido de cromo y vanadio. La saturación y homogeneidad en la coloración verdosa, proporciona un valor estimado para la gema. Si se tiene una excelente saturación y homogeneidad en el color, el valor de la esmeralda es relativamente alto. De lo contrario, el valor disminuirá en relación a estas características (Fig. 2).

Las esmeraldas de menor valoración son denominadas “morrallas” con color verde débil, las de valoración media “chisperos” con color verde intenso y las de mayor valoración “gotas de aceite” con color verde muy intenso.



Aumento en saturación y homogeneidad en el color, además del valor de la gema.

Figura 2. Variabilidad del color de una esmeralda. Tomado de Web Artesanías Colombianas.
<https://www.artesaniascolombianas.online/esmeraldas-colombianas/>

3.2.2 Claridad

El nivel de claridad está relacionado con la cantidad de fisuras o inclusiones que tiene una esmeralda. Estas fisuras e inclusiones están dados por los procesos de génesis, ambientes de formación y/o geología estructural de yacimiento. Si la cantidad es alta, el precio generalmente será bajo.

3.2.3 Carat (ct), Quilate

El peso para medir una esmeralda está dado en quilates (1 ct es igual a 0,2 g) y aunque el peso tiene relación con el tamaño de la gema, esta relación no es directamente proporcional. El aumento del precio de una esmeralda con respecto a la cantidad de quilates tampoco es lineal, debido a la valoración de otros factores como color y claridad que controlan el precio de la gema.

3.2.4 Talla

La talla es un procedimiento que puede añadirle gran valor a una esmeralda. Es un proceso muy importante en la industria e involucra elementos que deben ser considerados en detalle como la experiencia y habilidad del tallador, quien una vez finalizado su trabajo entregará la gema lo más bella e ideal posible para su posterior venta.

En las gemas en general, se pueden diferenciar dos grupos de tallados: facetados con caras geométricamente planas (utilizadas en gemas transparentes) y cabujones con superficies curvas (usada en gemas opacas). Para las esmeraldas se utilizan los tallados facetados. Algunos tipos son: talla sello, talla pera y talla esmeralda (la más usada), (*Fig. 3*).



Figura 3. Talla de una esmeralda y su relación con la calidad del resultado. Tomado de Web Artesanías Colombianas. <https://www.artesaniascolombianas.online/esmeraldas-colombianas/>

De las cuatro variables anteriormente expuestas, tres deben ser evaluadas en detalle (color, claridad y talla) y por personas expertas, debido a que ofrecen matices que pueden llegar a ser sutiles y ocasionar valoraciones erróneas en el mercado. El peso es una variable que no presenta margen de duda, siendo su resultado exacto. Sin embargo, para definir el valor exacto de una esmeralda, no es posible realizarlo a través de esta única variable y se debe tener en cuenta todas las características presentadas en la gema.

4. ESMERALDAS EN COLOMBIA

4.1 UBICACIÓN DE LOS DEPÓSITOS DE ESMERALDAS

Los yacimientos esmeraldíferos en Colombia se localizan en la zona andina sobre la Cordillera Oriental, dentro de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y en menor medida en Santander. Las mineralizaciones están distribuidas en dos cinturones esmeraldíferos sobre los flancos Occidental y Oriental de la Cordillera. Los cinturones son estrechos (50-100 Km), elongados (250-270 Km) y aproximadamente paralelos entre sí en dirección NE-SW.

El Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEOc) comprende las minas de Coscuez, Peñas Blancas, La Palma, Yacopí, La Pita, Quípama y Muzo; el Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR) comprende las minas de Santa Rosa y Chivor (*Fig. 4*). El acceso a los dos cinturones se puede realizar desde la capital colombiana vía terrestre en aproximadamente 5 horas de viaje, o por vía aérea hasta la pista de aterrizaje del municipio de Quípama para el CEOC o los diferentes helipuertos localizados en las regiones y áreas de operación.

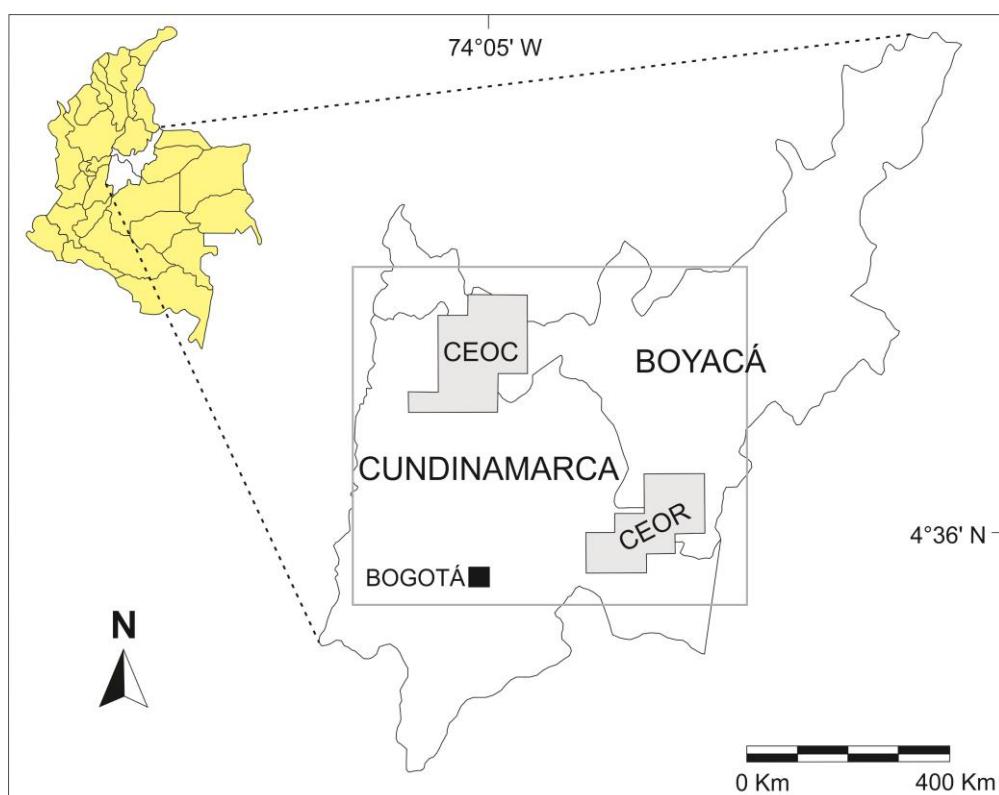


Figura 4. Localización de los cinturones esmeraldíferos de Colombia.



4.1.1 Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEOc)

Está ubicado sobre el flanco oeste de la Cordillera Oriental de Colombia en los departamentos de Boyacá (principalmente), Cundinamarca y Santander. Los municipios más destacados dentro de este cinturón son: Muzo, Quípama, Coscuez, Maripí, Pauna, La Belleza y Florián.

Este cinturón esmeraldífero es el de mayor producción de gemas en la actualidad y sus minas más representativas e importantes son las de Muzo y Coscuez, reconocidas a nivel internacional por su calidad de gemas e historial de producción.

➤ Minas de Muzo

Son las minas con la mayor producción de esmeraldas en la actualidad del país, liderada por la mina de Puerto Arturo, operada por la multinacional estadounidense Minería Texas Colombia S.A. De estas minas provienen las gemas de color verde intenso y altísima pureza llamadas esmeraldas “gotas de aceite”, entre las de mayor calidad en el mundo.

Las áreas de operación se encuentran entre 900 y 1.000 metros sobre el nivel del mar y son explotadas desde antes del descubrimiento de América. La explotación de estos depósitos fue realizada a través de minería a cielo abierto, minería aluvial y minería subterránea. Este último método es el más utilizado en la actualidad por medio de galerías y rampas, siguiendo cuerpos vetiformes y/o zonas de brechas con mineralizaciones.

➤ Minas de Coscuez

En tiempos pasados fueron las de mayor producción en el territorio nacional, pero con el avanzar de los años sus recursos fueron disminuyendo. En la actualidad estas minas se encuentran bajo concesión de la multinacional canadiense Fura Gems Inc. en una etapa de exploración avanzada y de reestructuración del área para avanzar con la explotación de los recursos restantes.

Al igual que en las minas de Muzo, la explotación antiguamente se realizaba a cielo abierto, de manera subterránea y/o aluvial. En la actualidad se planifica continuar con minería subterránea identificando galerías realizadas en anteriores operaciones.



4.1.2 Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR)

Está ubicado sobre el flanco este de la Cordillera Oriental de Colombia en los departamentos de Boyacá (principalmente) y Cundinamarca. Las poblaciones más importantes son Chivor, Santa María de Batá, Gachalá, Ubalá y Macanal. A pesar que en la actualidad la producción de esmeraldas no es alta en comparación con la del Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO), su potencial para la estructuración y elaboración de proyectos mineros es bueno. Las minas más representativas son las de Chivor.

➤ Minas de Chivor

Ubicadas al sur oriente del departamento de Boyacá, son minas antiguas con poca tecnificación explotadas principalmente a través de minería subterránea con producciones de esmeraldas de mediana-alta calidad. Seguida por la agricultura, la minería es la segunda actividad económica de la población; en la actualidad el gobierno nacional promueve la formalización de numerosos proyectos mineros para impulsar el crecimiento económico de la región y el interés de inversionistas.

4.2 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGRAFÍA

La cadena de los Andes en Colombia se divide (de la más antigua a la más joven) en tres Cordilleras: Central, Occidental y Oriental. Estas se encuentran separadas por los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena, y se orientan en general al NNE y NE.

Los cinturones esmeraldíferos se ubican en piedemontes de la Cordillera Oriental, en áreas montañosas, con drenaje subparalelo y subdendrítico de densidad media y desarrollo de valles juveniles. Los ríos que drenan el área del CEOC son de la cuenca hidrográfica del río Magdalena (*Fig. 5*) y los que drenan el área del CEOR pertenecen a la cuenca hidrográfica del río Meta (*Fig. 6*). El relieve en los cinturones esmeraldíferos es moderado a fuerte con áreas montañosas que en algunas zonas es suavizado debido a la presencia de depósitos cuaternarios de origen aluvial, coluvial o fluvio-torrencial.

La altura máxima en el Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO) es de 2.450 m.s.n.m y la mínima es de 250 m.s.n.m. En el Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR) la altura máxima es de 3.000 m.s.n.m y la altura mínima es de 600 m.s.n.m.

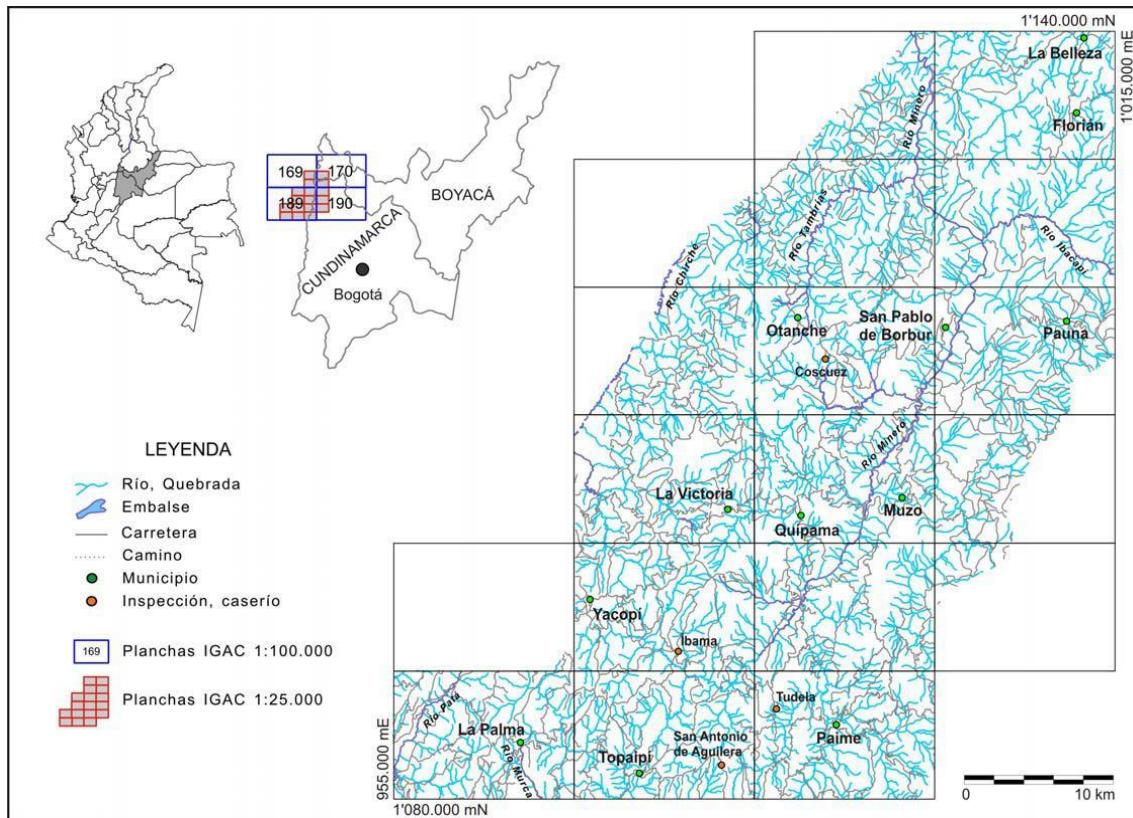


Figura 5. Hidrografía del cinturón esmeraldífero occidental (CEO). Tomado de Terraza y Montoya (2011).

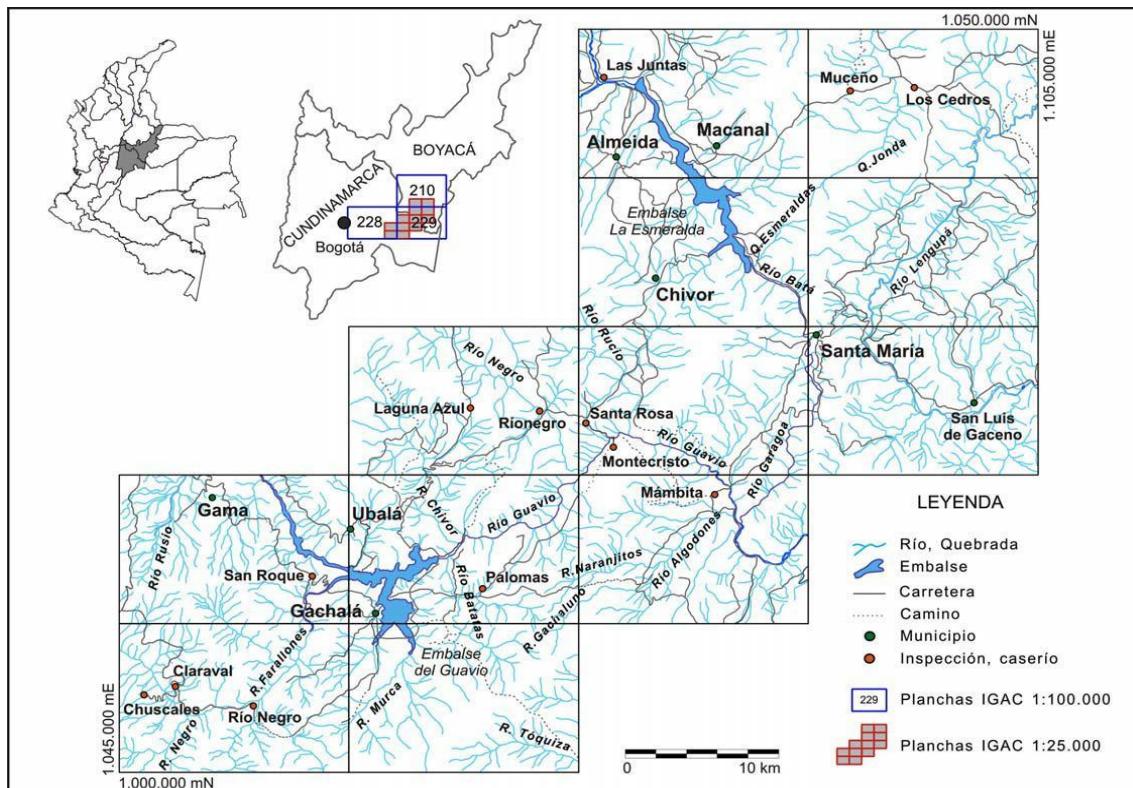


Figura 6. Hidrografía del cinturón esmeraldífero oriental (CEOR). Tomado de Terraza y Montoya (2011).



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

4.3 GEOLOGÍA REGIONAL

Los Andes Colombianos han sido interpretados geológicamente como un conjunto de terrenos acrecionados al margen occidental de Suramérica, conformando un cinturón plegado y fallado con una dirección estructural predominantemente al NNE y en el cual se ha identificado deformación transcurrente oblicua, al ENE y al NW (Acosta *et al.* 2007).

Debido a su ubicación en la parte noroccidental de la placa suramericana, Colombia se encuentra en un sitio de colisión entre las placas de Nazca, Caribe y el borde de la placa Sudamericana (*Fig. 7*).

La subducción de la placa de Nazca dio como origen el levantamiento de las cordilleras, formando inicialmente la Cordillera Central, que permaneció emergida durante la sedimentación del Triásico-Jurásico y casi todo el Cretácico para inundarse a finales del período y luego emerger definitivamente en el Eoceno. Siguió la Cordillera Occidental, compuesta por corteza oceánica y sedimentos marinos profundos como resultado de los múltiples episodios de acreción desde el Paleozoico tardío. Cuando la cuenca fue rellenada con sedimentos y afectada por procesos posteriores de empujes desde la zona de subducción contra el cratón, los sedimentos emergieron formando la Cordillera Oriental a mediados del Neógeno; hoy en día continúa levantándose (Van der Hammen, 1958; Cooper *et al.* 1995; Acosta *et al.* 2007), (*Fig. 8*).

La Cordillera Oriental donde se ubican los cinturones esmeraldíferos, está compuesta en su núcleo por rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico, y por rocas ígneas extrusivas e intrusivas del Jurásico. Controles tectónicos, transversales y longitudinales, han permitido la exhumación de una espesa secuencia de sedimentos del Cretácico con facies y espesores diferentes en la zona axial de la Cordillera. Las rocas del Cenozoico y depósitos no consolidados del Cuaternario cubren parcialmente a la región, lo que dificulta reconocer algunas de las estructuras presentes. Muchos autores han reconocido estructuras de fallamiento transcurrente en la zona axial de la Cordillera Oriental, asociadas regionalmente a fallas subverticales o de alto ángulo en profundidad (Acosta *et al.* 2007).

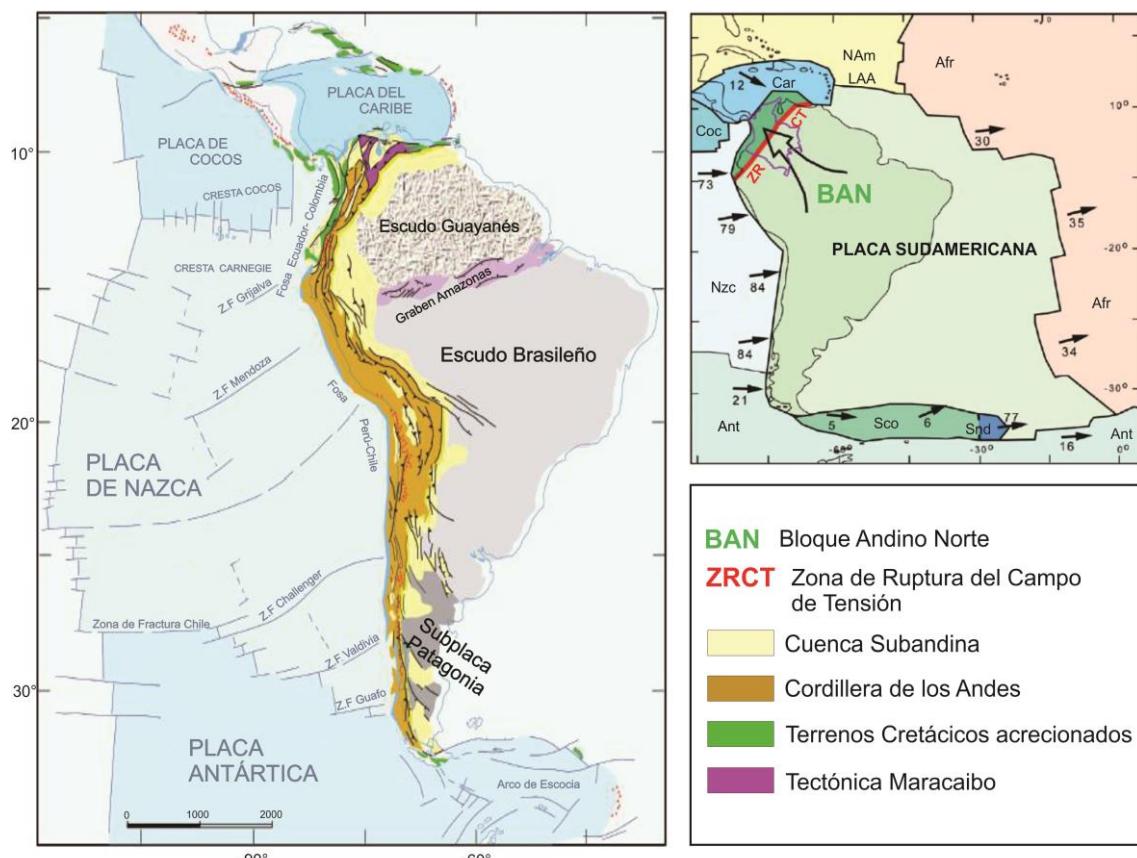


Figura 7. Modelo tectónico de la placa Sudamericana. Las flechas indican el movimiento relativo actual con respecto a América del Sur. Tomado de Cediel y Ojeda (2011).

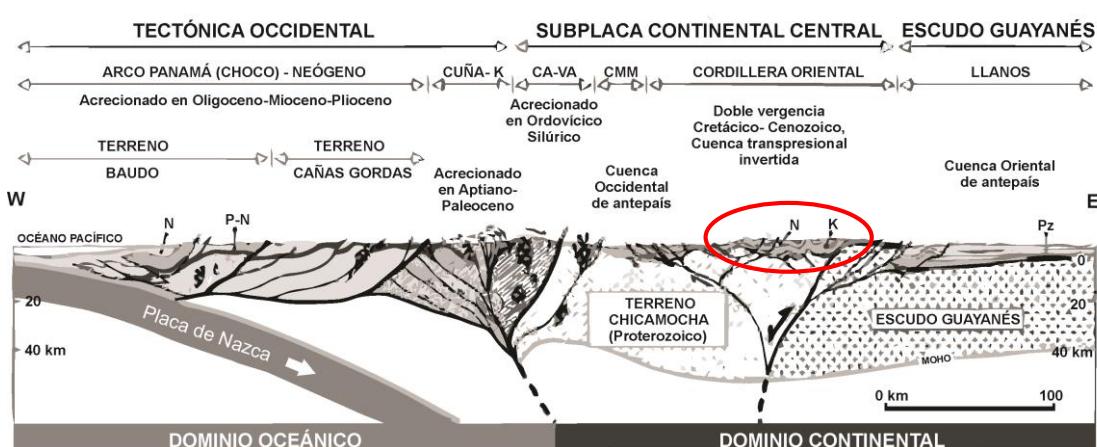


Figura 8. Esquema Oeste-Este de los Andes colombianos. Círculo rojo: Cordillera Oriental en donde se ubican los cinturones esmeraldíferos. Tomado de Cediel *et al.* (2003).



4.4 GEOLOGÍA DE LOS CINTURONES ESMERALDÍFEROS

La Cordillera Oriental es una faja ligeramente plegada que cabalga al este la cuenca de antepaís de los Llanos y al oeste la cuenca del Magdalena medio. El cinturón fue el resultado de la inversión tectónica en el Mioceno medio (15 Ma). La mayor parte de la Cordillera Oriental está formada por gruesas capas de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas y afectadas tectónicamente.

La mineralización de esmeraldas está alojada, como vetas y brechas, en rocas del Cretácico Inferior (135 a 116 Ma) que se caracterizan composicionalmente por sucesiones de areniscas, calizas, lutitas y evaporitas.

Los depósitos del Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEOc) se encuentran plegados y fallados a escalas regionales y locales. El régimen tectónico es compresivo y transpresivo, manifestándose por la presencia de fallas inversas con salto transcurrente. Los planos de falla en zonas con mineralización esmeraldífera por lo regular no están mineralizados y las brechas que normalmente se reconocen en las minas son de origen hidrotermal, confundiéndose con brechas de origen tectónico cuando algunas de las fallas afectan la zona mineralizada (Terraza, 2019). La litología que porta la mineralización de esmeralda está compuesta principalmente por intercalaciones de lutitas negras silíceas, lutitas calcáreas, calizas, calizas dolomíticas y pequeños niveles de arenisca de la Formación Rosablanca (Valanginiano inferior), Formación Furatena (Valanginiano), Formación Muzo (Hauteriviano-Barremiano) y Formación Paja (Hauteriviano-Barremiano-Aptiano tardío). La textura fina granular de la mayoría de las unidades litoestratigráficas influye en la deformación de las rocas debido a su comportamiento dúctil que genera foliación intensa con fallas con poca expresión geomorfológica y en algunas zonas replegamiento intenso.

Para la explotación de esmeraldas, se realizó el levantamiento de columnas estratigráficas de las principales formaciones geológicas aflorantes en el CEOc en tres ubicaciones diferentes (Caparrapí, Muzo y Florián), correlacionándolas y definiendo los niveles litológicos estratégicos (Terraza y Montoya, 2011), (*Fig. 9*).

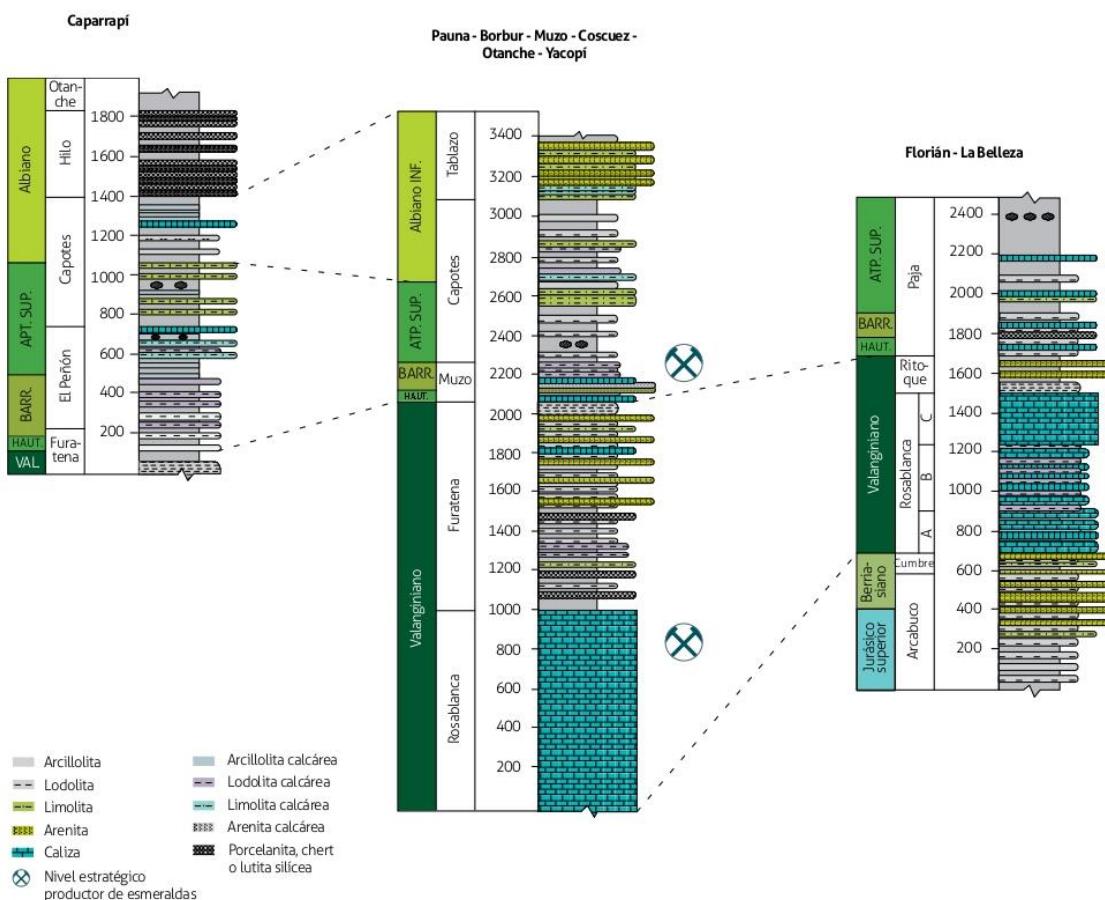


Figura 9. Columnas litoestratigráficas en el CEOC. Con símbolo de mina se indican los niveles con mineralización de esmeraldas. Tomado de Terraza y Montoya (2011).

Los depósitos del cinturón esmeraldífero oriental (CEOR) están ubicados en la parte basal por una sucesión litoestratigráfica arenolímiosa del Paleozoico superior (Devónico-Carbonífero) correspondiente al Grupo Farallones, sobre la cual descansan inconformemente las unidades del Cretácico inferior (Formación Batá, Chivor, Ubalá o Santa Rosa). Altos y bajos de basamento Paleozoico (con zonas entre semiplanas a muy empinadas) limitados por fallas normales condicionaron la sedimentación cretácica en la región del CEOR, hecho que se evidencia especialmente en las unidades basales del Cretácico inferior correspondientes al piso Berriasiano. La Formación Santa Rosa (Berriasiano) presenta niveles de lutitas, lutitas calcáreas y evaporitas, con varios sectores (Río Bacacas, Chivor - Gachalá) con mineralizaciones de esmeraldas (ver su ubicación en las columnas litoestratigráficas según Terraza y Montoya, 2011), (Fig. 10).

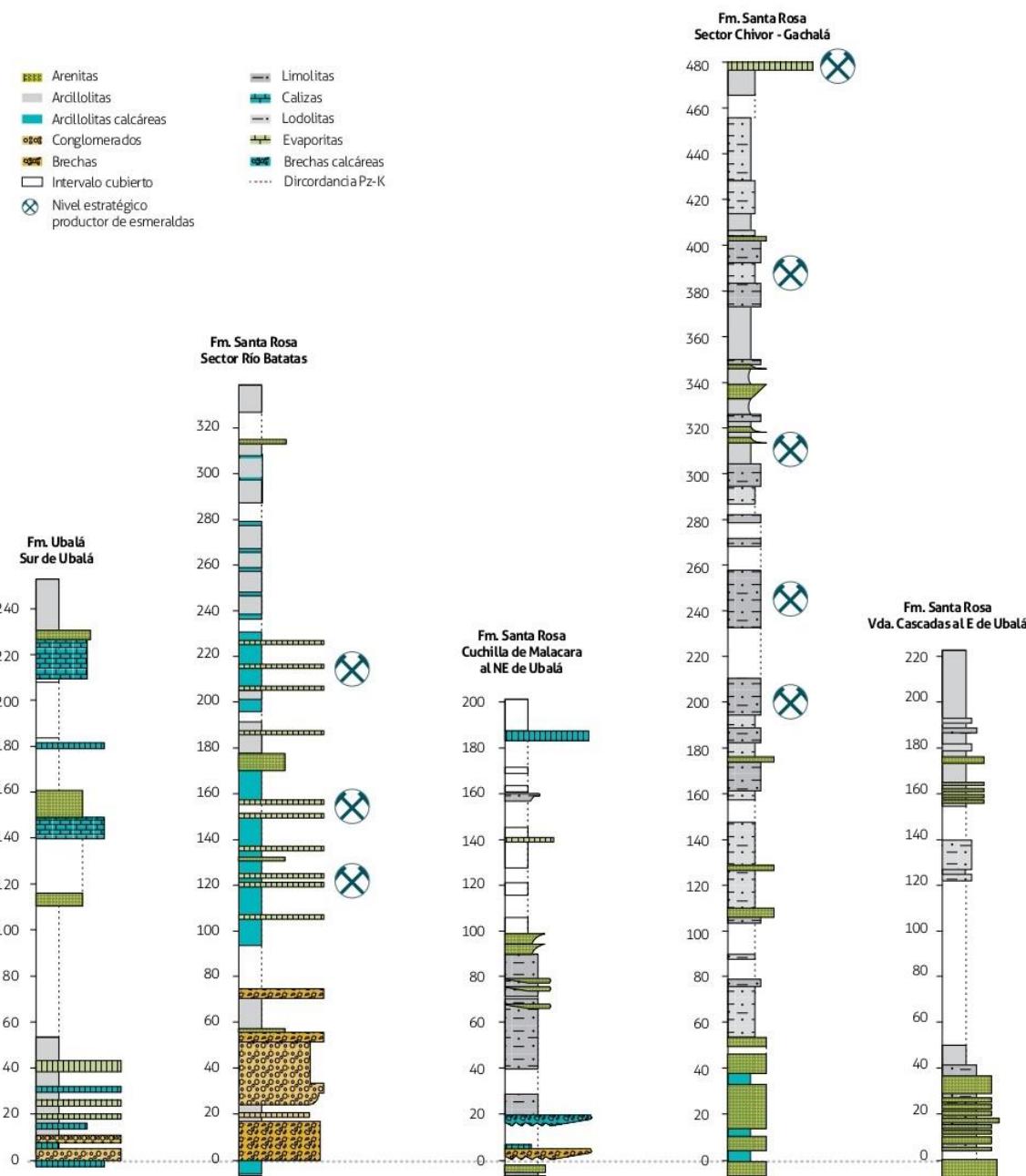


Figura 10. Columnas litoestratigráficas en el CEOR. Con símbolo de mina se indican los niveles con mineralización de esmeraldas. Tomado de Terraza y Montoya (2011).

4.5 MINERALIZACIÓN

En los dos cinturones mineralizados las venas que contienen esmeraldas se asocian con brechas estratiformes y con un proceso de albitización de las lutitas negras. Las venas son paralelas formando un sistema de venas extensionales (Cheillettz y Giuliani, 1996). La primera etapa en este sistema se compone por venas llenas de calcita fibrosa, pirita y fuchsita. Se asocia con la formación de planos de falla que condujeron los fluidos hidrotermales e indujeron la formación de albita y calcita en las lutitas negras. El metasomatismo de sodio y calcio en lutitas negras y simultáneamente la lixiviación de elementos mayores (Si, Al, K, Ti, Mg, P), elementos trazas (Ba, Be, Cr, V, Rb, Sc, U, B, C) y elementos de tierras raras de las lutitas, fue acompañado de una redistribución parcial dentro del relleno mineral de las venas (Giuliani *et al.* 1993). La siguiente etapa se caracteriza por la formación de fallas y pliegues con las cuales se asocian venas extensionales y brechas hidráulicas llenas de calcita, dolomita, pirita, fuchsita, albita, y la precipitación en las cavidades de fluorita, apatito, parisita, dolomita, esmeralda y cuarzo (Hall, 1976), (Fig. 11).

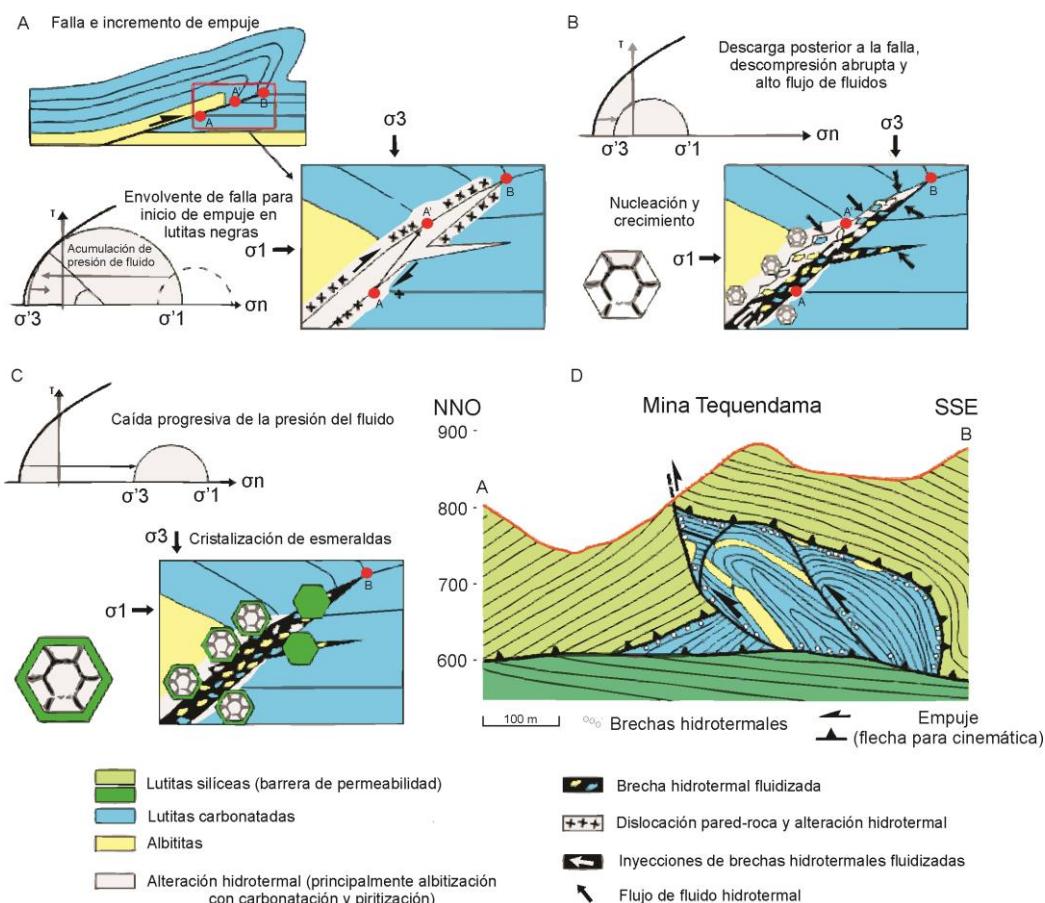


Figura 11. Modelo de la mineralización de esmeraldas en el CEOC. A: Propagación de empuje y falla. B: Nucleación y crecimiento de esmeralda. C: Formación de esmeraldas en las venas. D: Sección transversal de mina Tequendama. Diagramas circulares de Mohr en A, B y C, τ = esfuerzo cortante; σ_n = estrés normal; σ_1 y σ_3 = principales tensiones. Tomado de Pignatelli *et al.* (2015).



4.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El mapeo estructural detallado y el análisis geométrico sugieren que los controles estructurales sobre la mineralización son diferentes entre el Cinturón Esmeraldífero Occidental y el Cinturón Esmeraldífero Oriental (Branquet *et al.* 1999 a, b). En el CEOC, Muzo y Coscuez se caracterizan por estructuras compresivas formadas a lo largo de fallas, mientras que en el CEOR los depósitos esmeraldíferos como Chivor presentan estructuras extensionales ramificadas en un nivel evaporítico brechificado (Branquet *et al.* 2015). Estas estructuras tectónicas son sincrónicas con la circulación de los fluidos hidrotermales.

En el CEOC, los depósitos individuales miden aproximadamente 100 metros de ancho y muestran numerosos pliegues y fallas de desgarre. En Muzo, los empujes se evidencian por la presencia de lutitas negras calcáreas sobre lutitas negras silíceas y las estructuras tectónicas están asociadas con la circulación de fluidos en la lutita negra calcárea rica en carbono que indujeron una intensa albitización, carbonatación y piritización. Las lutitas negras silíceas no tienen mineralización (Oppenheim, 1948), (*Fig. 12 y 14*).

En Coscuez, los pliegues y empujes fueron guiados por la falla de Coscuez que actuó como conducto vertical para los fluidos mineralizantes desarrollados en la lutita negra calcárea rica en carbono. Las brechas formadas por la apertura de sitios dilatantes relacionados con presiones de fluidos y reemplazo hidrotermal, son similares a las descritas para el depósito de Muzo (Branquet *et al.* 1999b).

En el CEOR, las minas están dispersas a lo largo de un nivel regional de brechas que contienen esmeralda (Branquet *et al.* 1999a, 2015). El nivel de brechas en el área de Chivor es estratiforme (más de 10 km de largo y 1,10 metros de espesor) y en gran parte las brechas hidrotermales están compuestas por fragmentos de caliza y lutita negra carbonatada- albitizada, cementado por carbonatos y pirita (*Fig. 14*). Su formación está relacionada con la disolución de un horizonte evaporítico. Todas las estructuras mineralizadas están ramificadas desde el nivel de brechas. En las minas de Chivor las mineralizaciones de esmeraldas se encuentran en fallas listricas y en fracturas generadas por esfuerzos extensionales.

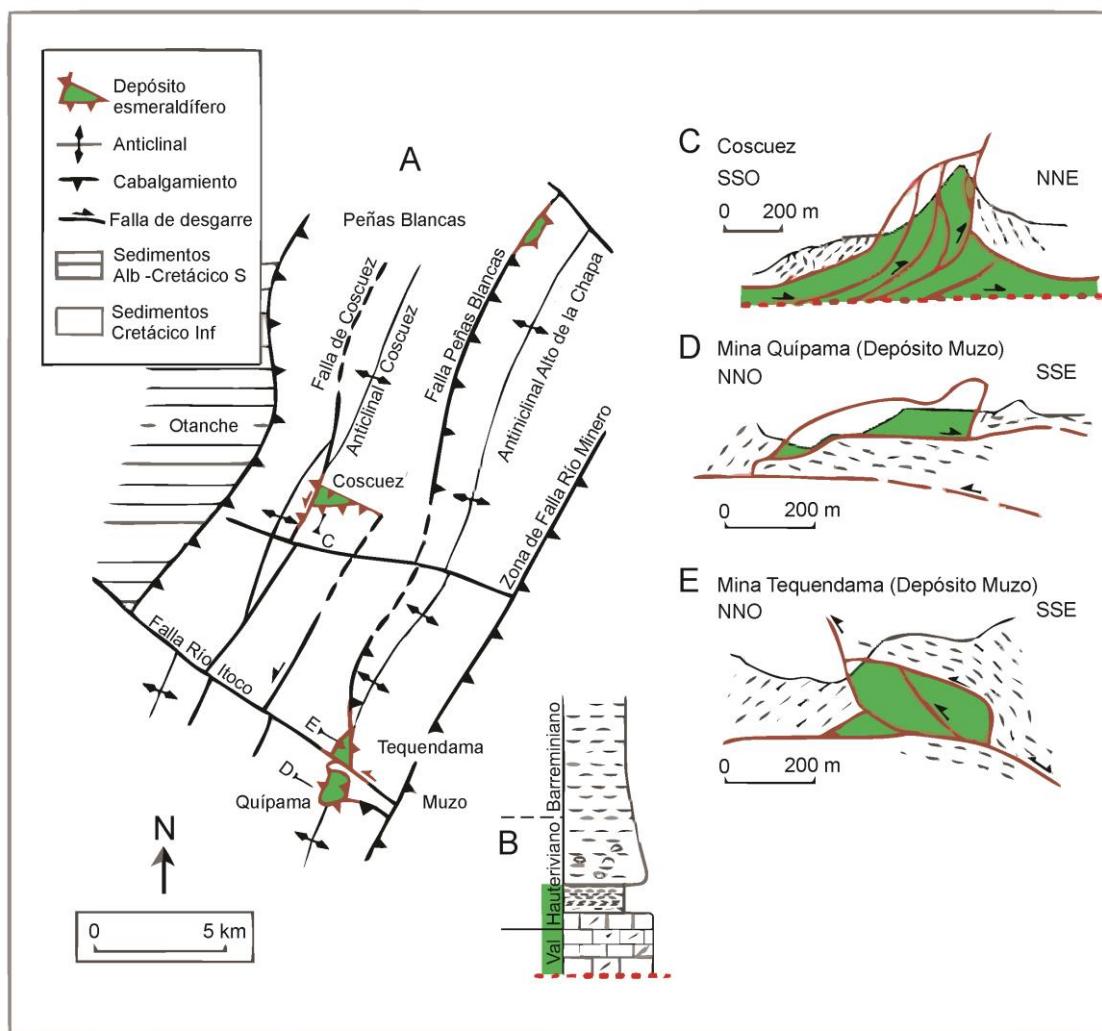


Figura 12. Estructuración del CEOC en las zonas de Coscuez y Muzo. Tomado de Giuliani *et al.* (2019).

Ingeominas y Mora (2005) plantean una sucesión de eventos tectónicos que contribuyeron al emplazamiento de esmeraldas, liderado por un proceso de plegamiento (*Fig. 13*).

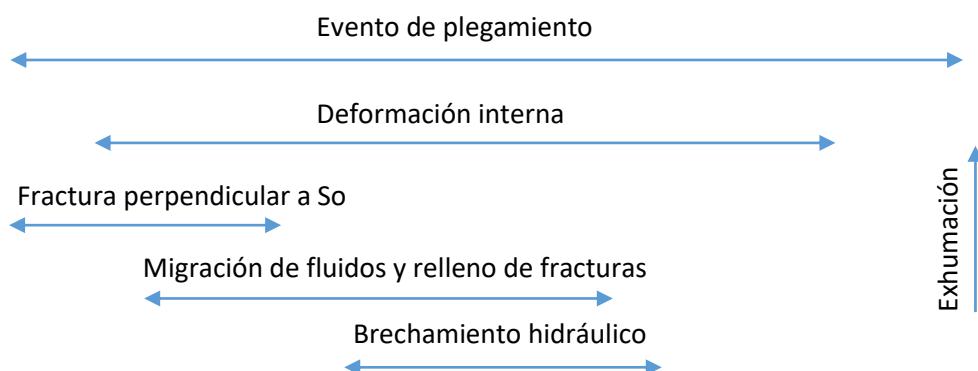


Figura 13. Sucesión de eventos tectónicos que contribuyeron al emplazamiento de las esmeraldas en Colombia. Tomado de Ingeominas y Mora (2005).

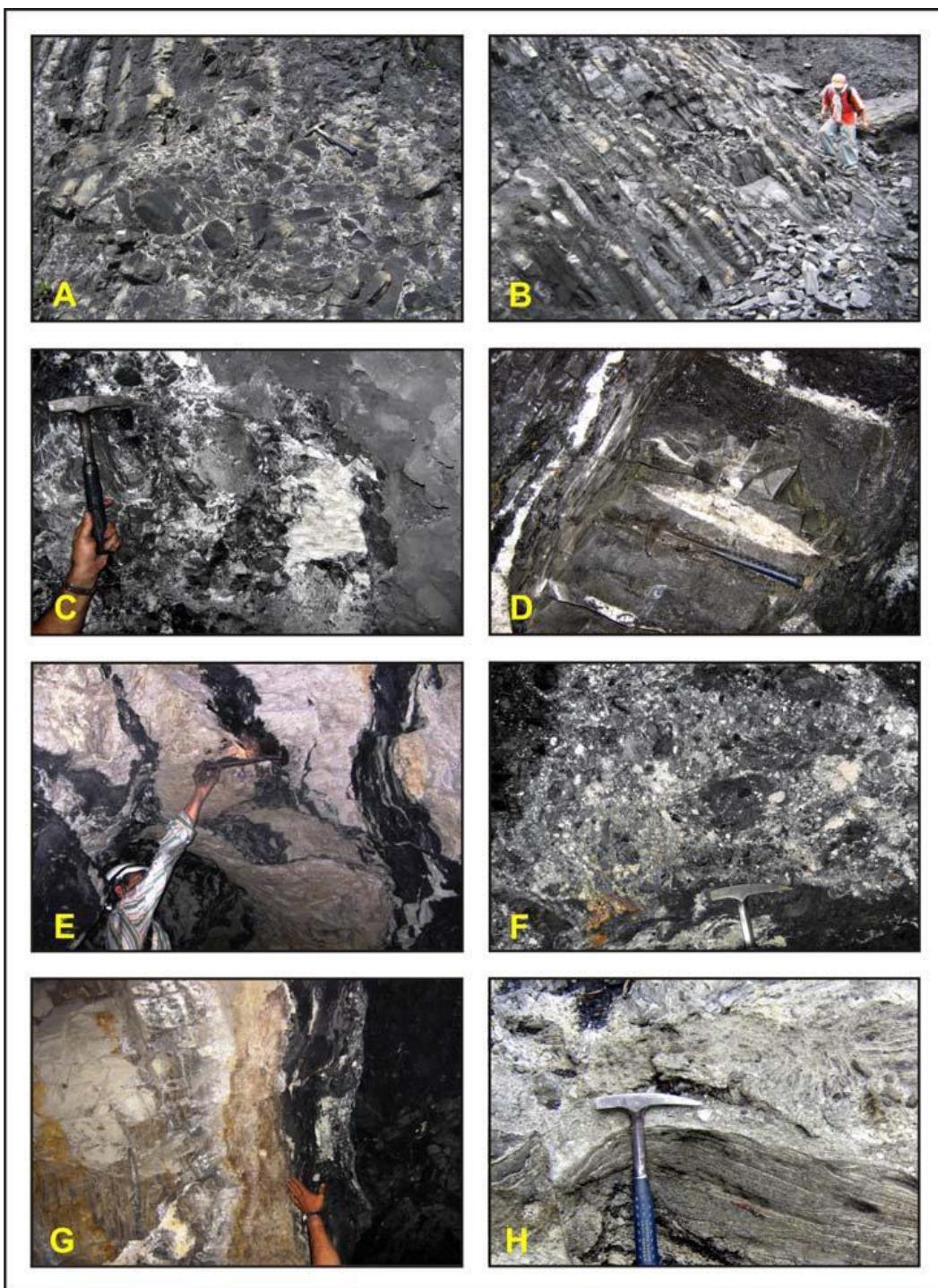


Figura 14. Estructuras hidrotermales en zonas mineralizadas. A: Brecha hidráulica, Fm Muzo, Minas de Coscuez. -B: Venas de calcita paralelas a la estratificación, Fm Muzo, Minas de Coscuez. -C: Lutita con venas de calcita-dolomita de aspecto brechoide, Fm Muzo, Minas de Muzo. -D: Venas de calcita lenticulares, Fm Rosablanca, Minas de Peñas Blanca. -E: Lutita con bandeadimientos albitíticos, Fm Muzo, Minas de Muzo. -F: Brecha de clastos de lutita cementados con calcita y dolomita, Fm Santa Rosa, Minas de Gachalá. -G y H: Nivel evaporítico albitizado con pirita, calcita y dolomita, Fm Chivor, Minas de Chivor. Tomado de Terraza y Montoya (2011).



4.7 EDADES DE LA MINERALIZACIÓN

Las edades obtenidas por Cheilletz *et al.* (1991) y Cheilletz *et al.* (1995) que oscilan entre 32 y 38 Ma para el CEOC y 62 a 68 Ma para el CEOR, así como las de Romero *et al.* (2000) de 67 Ma para los depósitos del CEOC y de 61 Ma para el CEOR, concuerdan con estudios regionales (Van der Hammen, 1958; Gómez *et al.* 2003; Cortés *et al.* 2005) que muestran evidencias de la presencia de deformación y plegamiento desde el Maastrichtiano-Paleoceno y durante el Eoceno.

Mantilla *et al.* (2007) propone la edad $12,4 \pm 0,9$ Ma para las esmeraldas del CEOC, concordante con procesos de fuerte plegamiento, levantamiento e inicio de erosión en la Cordillera Oriental durante el Mioceno medio (Van der Hammen, 1958; Cooper *et al.* 1995).

4.8 GEOQUÍMICA E ISOTÓPIA

Los depósitos esmeraldíferos de Colombia están relacionados con infiltraciones de fluidos hidrotermales en zonas de fracturas, conformando un sistema de venas que desarrollan un intenso halo producido por metasomatismo sódico y carbonático dentro de las lutitas negras cretácicas (LN) encajantes. La lixiviación de casi todos los elementos mayores (K, Al, Si, Ti, Mg y P), elementos trazas (Ba, Be, Cr, Rb, Sc, U, V, B, C) y las tierras raras de las LN, es acompañada por su redistribución parcial dentro del relleno mineral de las venas. La geoquímica de los isótopos del oxígeno de los carbonatos hidrotermales y el cuarzo, indica un fuerte enriquecimiento en el $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas en equilibrio con la mineralización ($+10 < \delta^{18}\text{O H}_2\text{O} < +18\%$) lo cual corresponde a aguas de cuencas sedimentarias (Giuliani *et al.* 1999). Los procesos de albitización favorecen la formación de esmeraldas mientras que el metasomatismo potásico relacionado a metamorfismo regional y efectos tectónicos dinámicos, inhibe la mineralización al generar temperaturas superiores (Mendoza, 1996).

Mendoza (1996) establece una relación de Na/K mayor a 1 en zonas mineralizadas e inferior a 1 en zonas no mineralizadas.

Cheilletz *et al.* (1994) argumenta que el contenido de Be en la lutita negra fuera de las áreas mineralizadas que fueron lixiviadas oscila entre 2 y 6 ppm, mientras que las concentraciones en las zonas lixiviadas oscilan entre 0,1 y 3,0 ppm Be.

4.9 INCLUSIONES FLUIDAS Y MICROTERMOMETRÍA

Ortega (2007, en Terraza y Montoya 2011), muestra resultados de inclusiones fluidas obtenidos en el cinturón esmeraldífero occidental (CEOc) en el Cerro Coscuez a partir del análisis de tres muestras de venas. El resultado indica que el cuarzo presenta inclusiones polifásicas primarias con formas variadas redondeadas donde el líquido ocupa el 55% del volumen, el vapor el 20% y un cubo de halita un 25%. El tamaño de las inclusiones oscila entre 2 y 25 μm aproximadamente (*Fig. 15 izq.*).

En complemento, las calcitas muestran inclusiones diferentes al cuarzo, compuestas por inclusiones polifásicas primarias con más de un sólido con la siguiente distribución: salmuera 55-60%, vapor 15-20%, sólido 1: 15% y sólido 2: 10% (*Fig. 15 der.*).

Los análisis microtermométricos de las inclusiones polifásicas del cuarzo se registran temperaturas de homogenización de la halita entre 263 y 340 °C. La salinidad obtenida a partir de las temperaturas de fusión del hielo y/o la halita es entre 35,5 y 41,5% en peso equivalente NaCl y las temperaturas de decrepitación entre los 261 y 322°C. Los análisis microtermométricos de las inclusiones polifásicas de la calcita de esta lámina muestran temperaturas de homogenización de la halita entre 322 y 326°C, y salinidades entre 39,9 y 40,2% en peso equivalente NaCl.

De los datos anteriores en las venas hidrotermales mediante el análisis de microtermometría de minerales de calcita y cuarzo, se determinó que las inclusiones fluidas son primarias polifásicas saturadas en halita y presentan un sistema composicional de $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{CO}_2$, donde los fluidos acuoso-salinos que llenaron las venas comprenden eventos que alcanzaron temperaturas de homogenización de la halita en un rango de 261 a 326°C.

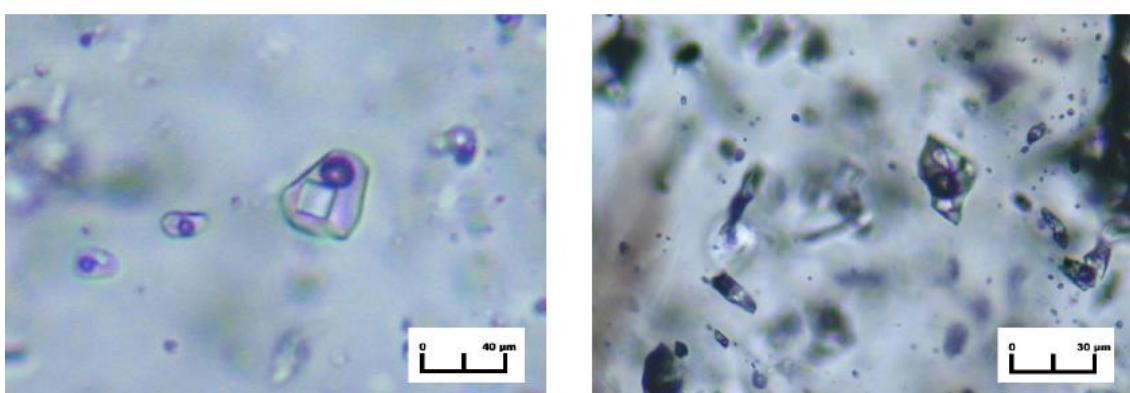


Figura 15. Inclusiones polifásicas en cuarzo (izquierda) con tamaños entre 2-25 μm y calcita (derecha) con más de un sólido, en depósitos del CEOc. Tomado de Ortega (2007, en Terraza y Montoya 2011).

Por otra parte, en el cinturón esmeraldífero oriental (CEOR), Silva (2008, en Terraza y Montoya 2011) demuestra mediante análisis de inclusiones fluidas realizadas en las minas de San Francisco y San Gregorio, que existen asociaciones de inclusiones primarias y secundarias que presentan datos microtermométricos similares (*Fig. 16*). Las temperaturas a las cuales ocurrieron los diferentes cambios de fases indicarían que el sistema químico de las IF en términos generales es de tipo $H_2O + NaCl + CaCl_2 (\pm KCl + FeCl_3 + CO_2 + N_2?)$ con temperaturas mínimas de entrampamiento entre 300 y 340°C.

Estudios elaborados en la Universidad de Virginia Tech (Estados Unidos) con la *técnica laser ablation ICP-MS* en inclusiones fluidas hospedadas tanto en carbonatos como en berilos, indican que la composición del fluido mineralizante es aún más compleja, siendo posible relacionarlo con el siguiente sistema químico: $H_2O + NaCl + CaCl_2 + KCl + FeCl_2 + LiCl + (\pm CsCl, GaCl_3) + CO_2 + N_2$.

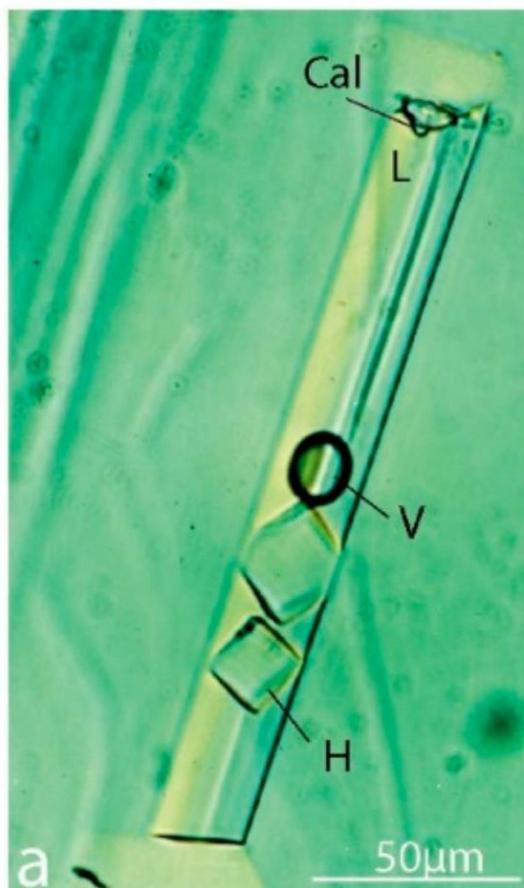


Figura 16. Inclusiones fluidas primarias en esmeralda de Chivor en el CEOR. Contiene dos cubos de halita, una burbuja de gas redondeada y dos cristales de calcita con salmuera.

Tomado de Pignatelli *et al.* (2015).

5. DEPÓSITOS ESMERALDÍFEROS EN EL MUNDO. COMPARACIÓN CON EL MODELO COLOMBIANO

Los depósitos esmeraldíferos se encuentran distribuidos en varios países del planeta y están relacionados con diferentes procesos geológicos como magmatismo, metasomatismo o sedimentarios (*Fig. 17*). Estos procesos han dado características particulares a cada depósito y han influido directamente en la calidad de la gema.

Países como Canadá, Estados Unidos y Noruega, pese a contar con manifestaciones de mineralización de esmeraldas, en la actualidad no constituyen regiones productoras por la baja cantidad o calidad del recurso.

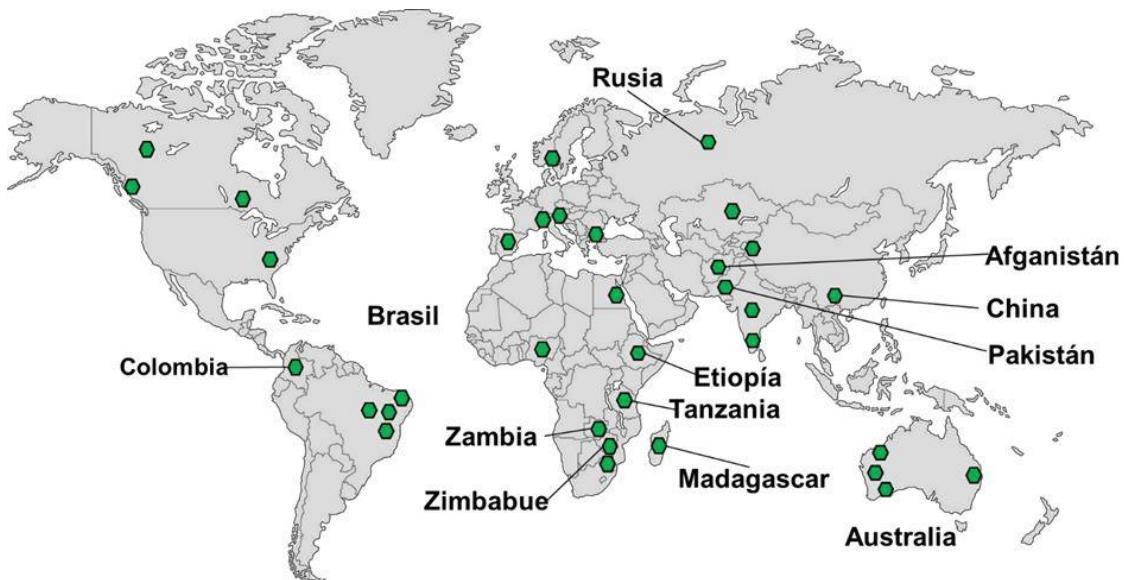


Figura 17. Distribución mundial de las mineralizaciones de esmeralda. Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>

En la escala de tiempo geológico los yacimientos de esmeraldas van desde depósitos antiguos como Gravelotte en Sudáfrica (2.97 Ga) y Carnaíba en Brasil (2 Ga) hasta los más jóvenes como Khaltaro en Pakistán (9 Ma) y Muzo en Colombia (32 Ma), (*Fig. 18*).

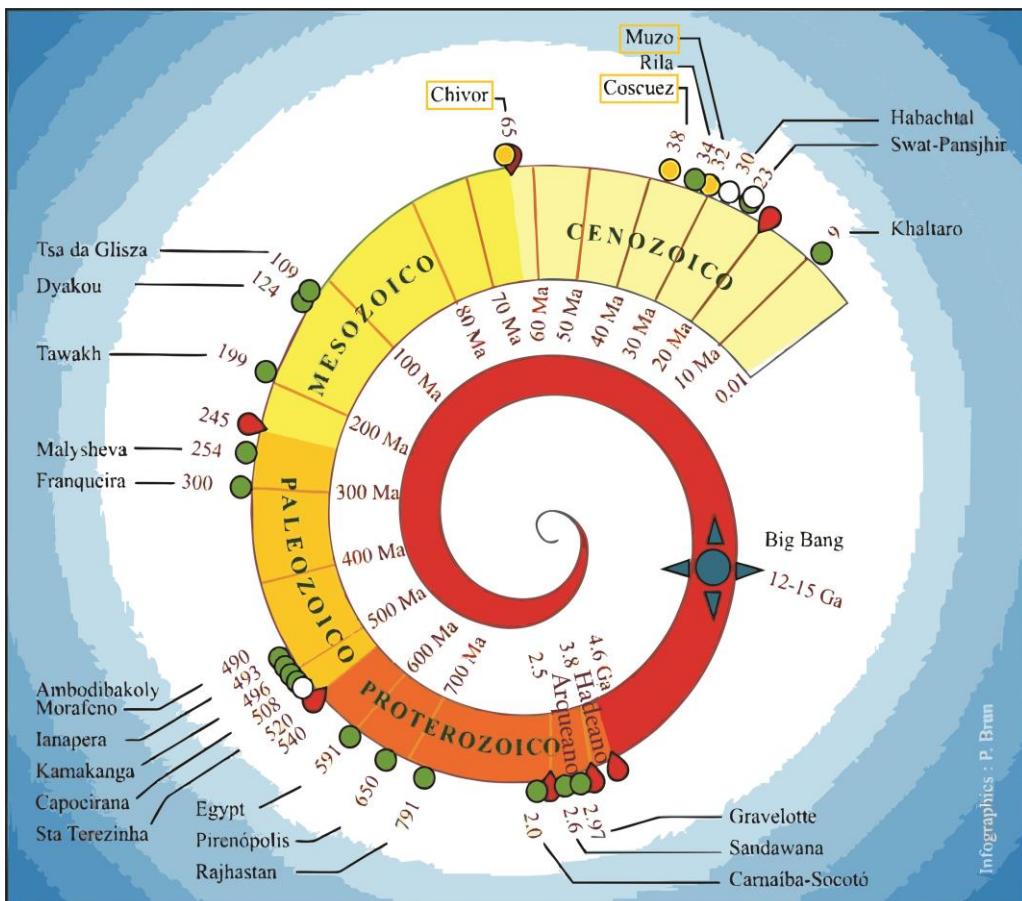


Figura 18. Espiral del tiempo para la formación de distintos tipos de depósitos de esmeralda en el mundo. Círculos rojos: límite era geológica; Círculos verdes: depósitos relacionados con actividad magmática; Círculos blancos: depósitos relacionados con metamorfismo; Círculos amarillos: depósitos relacionados con procesos hidrotermales (Colombia). Tomado de Giuliani *et al.* (2019).

En este trabajo, los depósitos esmeraldíferos se clasificarán genéticamente en tres modelos (depósitos relacionados con actividad magmática, depósitos relacionados con metamorfismo y depósitos relacionados con actividad hidrotermal), resumiendo la metalogenia de cada uno de ellos. La comparación entre las diferentes génesis y el modelo de esmeraldas en Colombia se presenta en un esquema (*Cuadro 4*).

5.1 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON ACTIVIDAD MAGMÁTICA

5.1.1 Depósitos relacionados con actividad magmática alojados en rocas máficas y ultramáficas



En el modelo relacionado con actividad magmática, rocas ígneas intrusivas de composición felsica de las últimas etapas de cristalización (pegmatitas) asociadas a granitoides portadoras del Be, intruyen rocas maficas a ultramáficas en las cuales se encuentra el Cr y V necesario para formar la esmeralda. Por lo tanto, este modelo de depósito está asociado a la intrusión de rocas graníticas en rocas encajantes maficas a ultramáficas (Recio y Zubías, 2007), (*Fig. 19*).

El Be se concentra en los fluidos residuales de las etapas finales de cristalización de rocas ígneas intrusivas junto con álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), sílice (SiO_4^{2-}), alúmina (AlO_4^{2-}), tierras raras luvianas, así como con elementos y complejos volátiles tales como fluoruro (F^-), hidróxilos (OH^-), carboxilos (CO_2H), boro (B) y fósforo (P). De esta forma, a medida que avanza el grado de cristalización de un magma, las concentraciones de Be aumentan en el fluido residual (Mulligan, 1968).

Las pegmatitas de composición felsica están compuestas principalmente por cuarzo, microclina, albita y muscovita. Son muy importantes económicamente, ya que su fase magmática residual es rica en agua y produce grandes cristales de tales minerales. Los elementos mineralizantes típicos de las pegmatitas son: B, F, P y S y por lo tanto son comunes minerales como berilo, turmalina, topacio, fluorita, criolita, apatito, ambigónita, siderita, columbita, tantalita, molibdeno, casiterita y minerales de tierras raras (Garcés, 1995).

Las temperaturas de formación de las esmeraldas en los yacimientos de tipo pegmatítico suelen ser superiores a los 350°C y los datos de inclusiones fluidas suelen indicar precipitación a partir de salmueras complejas ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$), con salinidades del 12-40% equivalente de NaCl (Recio y Zubías, 2007).

Algunos ejemplos de este tipo de yacimientos se localizan en Zambia (Kafubu), Canadá (Tsa da Gliza), Australia (Menzies), Madagascar (Ianapera), Zimbabue (Sandawana), Sudáfrica (Gravelotte) y Etiopía (Kenticha) en donde recientemente fue descubierto el depósito Halos-Shakiso alojado en una serie volcánico-sedimentario (Arqueano-Proterozoico) asociado con pegmatitas y cuarzo, similares a las pegmatitas proximales Ta-Nb-Be de la mina de Kenticha. En Sudamérica, depósitos de esmeraldas relacionados con pegmatitas se encuentran en Brasil (Carnaíba), en el contacto entre pegmatitas y serpentinitas de la serie Jacobina en un evento ocurrido hace 1.900 Ma (Giuliani *et al.* 2019).



Figura 19. Modelo teórico para la formación de esmeralda en los depósitos relacionados con actividad magmática alojados en rocas máficas y ultramáficas. Tomado de Giuliani *et al.* (2019).

5.1.2 Depósitos relacionados con actividad magmática alojados en rocas metasedimentarias

Estos depósitos de esmeralda están asociados con intrusiones graníticas en litologías sedimentarias o metasedimentarias. Generalmente son subeconómicos y se describen variantes que dependen de la naturaleza de las rocas hospedadoras y los estilos de mineralización.

En Dyakou (China) el granito porfiroide del Cretácico inferior penetró metaareniscas de biotita, cuarcita, gneis y anfibolita de formaciones neoproterozoicas inferiores y superiores. La intrusión formó skarns y venas de cuarzo que son cortadas por pegmatitas. La esmeralda en venas de cuarzo es menos abundante que en pegmatitas, pero de mayor calidad. Algunas pegmatitas muestran una zonificación local con una zona exterior enriquecida en feldespato potásico, y una zona interior de esmeralda y cuarzo (Giuliani *et al.* 2019).



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

En Delbegetey (Kazajistán), la mineralización de esmeralda se limita a un granito que intruye areniscas carboníferas (Giuliani *et al.* 2019).

Otros ejemplos de este tipo de yacimientos se encuentran en Noruega (Eidsvoll), Canadá (Lened) y Australia (Emmavile).

5.2 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON METAMORFISMO

Los depósitos de esmeraldas atribuidos a metamorfismo se habrían originado en eventos sin o postectónicos por intercambios químicos (metasomatismo) entre rocas félasicas (gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos granatíferos o pegmatitas premetamórficas) con rocas adyacentes portadoras de Cr como serpentinitas. La relación entre las rocas que proveen el Cr y Be puede ser tectónica.

La mayoría de estos depósitos se caracterizan por la ausencia de intrusiones graníticas y los depósitos están vinculados a la circulación de fluidos y metasomatismo en zonas de cizallamiento o sistemas venosos (Giuliani *et al.* 2019).

Este tipo de yacimientos se encuentran por lo general en zonas de escudo, las cuales han sufrido casi siempre varios eventos orogénicos que han cambiado parcial o totalmente las rocas originarias.

Algunos ejemplos de este tipo de depósitos se presentan en China (Davdar), Afganistán (Valle de Panjshir), Estados Unidos (Heddenite), Austria (Habachtal), Brasil (Santa Terezinha de Goáis y Itaberai), Pakistán (Swat), Australia (Poona), Egipto (Djebel Sikait) y Zambia (Musakashi), (Giuliani *et al.* 2019).

En el yacimiento Santa Terezinha de Goiás (Brasil), la migración de fluidos hidrotermales está controlada por estructuras tectónicas tales como zonas de cizallamiento. Las venas pegmatíticas están ausentes y la mineralización es estratiforme. La zona rica en esmeralda se encuentra a lo largo de la foliación (Giuliani *et al.* 2019).



5.3 DEPÓSITOS RELACIONADOS CON PROCESOS HIDROTERMALES

Este tipo de depósitos se pueden clasificar en hidrotermales con influencia magmática e hidrotermales sin influencia magmática.

5.3.1 Depósitos hidrotermales con influencia magmática

Se presentan en las últimas etapas de cristalización magmática, cuando soluciones hidrotermales son expulsadas del magma como líquidos alcalinos ricos en constituyentes volátiles (fase neumatólítica), depositándose en zonas de cizalla, fisuras y cavidades. Por lo general presentan reemplazos y alteraciones en las rocas encajantes y se han clasificado según su profundidad en hipotermales, mesotermiales y epitermales (Garcés, 1995).

Este tipo de yacimiento se caracteriza por la interacción de soluciones con rocas volcánicas, en donde el Be es derivado de micas y feldespatos de granitos y el Cr de rocas máficas encajantes (Schwarz *et al.* 2002).

Este tipo de depósito se presenta en Guantú (Nigeria), a partir de la alteración de la parte basal de pegmatitas; las esmeraldas se formaron por albitización mediante metasomatismo alcalino a temperaturas de 400 a 450 °C.

5.3.2 Depósitos hidrotermales sin influencia magmática (Colombia)

Los yacimientos colombianos son un caso especial dentro de este modelo, debido a que el origen de los yacimientos de esmeraldas en los dos cinturones responde a procesos de tipo hidrotermal sin influencia magmática, relacionados con salmueras provenientes de evaporitas que se encontraban en la cuenca sedimentaria e interactuaron con lutitas carbonosas que liberaron Cr, V y Be, a temperaturas entre 290-350 °C y presión de 900-1100 bares, cercanos a la superficie (*Fig. 20*).

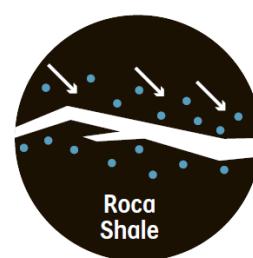
1. Movimientos tectónicos favorecen la liberación de aguas basales



3. Metasomatismo sódico lixiviando Be, Cr, V



2. Movilización de fluidos a través de fracturamientos.
Formación albita y calcita



4. Formación de esmeraldas

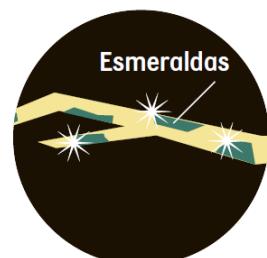


Figura 20. Esquema teórico de la formación de esmeraldas en Colombia. Tomado de Emerald Explorers Group.

La mineralización de esmeralda se aloja en rocas sedimentarias del Cretácico Inferior (135 a 116 Ma) compuestas principalmente por una sucesión de calizas, lutitas y evaporitas. Las rocas salinas y sulfatadas fueron necesarias e importantes para la formación de la esmeralda que presenta inclusiones minerales de parisita, pirita, albita o carbonatos, como características propias de las gemas colombianas (*Fig. 21 y 22*).

Las evaporitas son responsables de la alta salinidad de las salmueras (~40% de NaCl equivalente) y los fluidos H₂O-NaCl-CO₂-(Ca-K-Mg-Fe-Li-SO₄) fueron atrapados por la esmeralda durante su crecimiento. En carbonatos y piritas la composición de los fluidos encontrados es homogénea y similar para los dos cinturones (Giuliani *et al.* 1990 a, b, c; Cheilletz *et al.* 1994).

Las inclusiones fluidas muestran la presencia de salmueras CaCl₂-NaCl a temperaturas del eutéctico desde -56,1°C hasta -31,6°C. Los rangos de temperatura de fusión de halita (T_fh) están entre 284°C y 326°C. La temperatura de homogenización líquido-vapor está entre 215°C y 330°C. La combinación de temperatura de fusión de halita (T_fh) y temperatura de fusión del hielo (T_fi), permitió la estimación de la composición total del fluido: (H₂O)55% - (NaCl)30% -(CaCl₂)15%. La constante T_fh mostró que el fluido fue homogéneo en la temperatura de cierre, mientras que varias T_fh >300°C para Th = 250°C indican que la solución estuvo en el límite de la saturación. En este caso, se puede admitir que T_fh puede ser la temperatura real de formación de la inclusión (T= 300°C – 350°C, P= 1,3 – 1,5 Kb), (Giuliani *et al.* 1991).



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



Photography: John Zamora/CDTEC

Figura 21. Inclusión de parisita en esmeralda de Colombia. Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>



Photography: John Zamora/CDTEC

Figura 22. Inclusión de pirita en esmeralda de Colombia. Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>

**UBA**

Universidad de Buenos Aires

Argentina *virtus robur et studium**Especialización en Geología Minera**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales*

Estudios de isótopos de azufre realizados en piritas sincrónicas con la mineralización de esmeralda varían desde $\delta^{34}\text{S} +14,8$ a $19,4\text{\textperthousand}$, mientras la pirita sedimentaria de las lutitas negras dan $-2,4\text{\textperthousand}$ y sugiere la ausencia de participación de fuentes sulfurosas magmáticas (*Cuadro 3*). Los valores altos $\delta^{34}\text{S}$ involucran la reducción de sulfatos evaporíticos sedimentarios marinos a sulfuros hidrogenados por la interacción con estratos ricos en materia orgánica (Giuliani *et al.* 1995 a, b).

Cuadro 3. Características de los depósitos esmeraldíferos en Colombia y su interpretación metalogénética.

Tipo de análisis	Valores obtenidos	Interpretación
Isótopos del azufre 34 ($\delta^{34}\text{S}$)	$14,8\text{\textperthousand} < \delta^{34}\text{S} < 19,4\text{\textperthousand}$	No tiene relación con magmatismo
Composición de los fluidos	(H ₂ O)55% - (NaCl)30% - (CaCl ₂)15%	Existió lixiviación de niveles evaporíticos
Isótopos de Oxígeno	Media (CEOCC): $+16,8 \pm 0,1\text{\textperthousand}$ Media (CEOR): $+21,2 \pm 0,5\text{\textperthousand}$	Aguas connatas
Radiometría Ar ⁴⁰ /Ar ³⁹ en muscovitas	CEOCC: 38 ± 2 a 32 ± 2 Ma CEOR: 65 ± 3 Ma	Edades relacionadas con dos eventos tectónicos diferentes
Condiciones regionales	Formación entre 290-350 °C a presiones de 1100 bar	Temperaturas bajas de formación



Cuadro 4. Comparación y caracterización geológica de los diferentes tipos de depósitos esmeraldíferos en el mundo. Recuadro rojo: Depósitos de Colombia

Tipo de Depósito	Actividad Magmática		Metamórfico		Procesos Hidrotermales	
Ambiente Geológico	Intrusivo granítico		Metamorfismo regional Metamorfismo de contacto		Con influencia magmática	Sin influencia magmática
Aporte del Be, Si, Al	Pegmatitas graníticas Aplita Granitos evolucionados		Gneises Qz-Fl Esquistos Granatíferos		Micas y feldespatos de granitos	Shales Fluidos
Aporte del Cr, V	Rocas máficas y ultramáficas Shales		Serpentinitas		Rocas máficas	Shales
Roca Caja	Rocas máficas y ultramáficas	Rocas (meta)sedimentarias	Rocas metamórficas			Rocas Sedimentarias
Tipo		Gneis Cuarcitas Shales	Metamorfismo de rocas sedimentarias/ Migmatitas	Metamorfismo de rocas máficas y ultramáficas	Rocas máficas y ultramáficas metamorfoseadas	Lutitas silíceas, Lutitas calcáreas
Mineralización	Venas y/o Metasomatismo	Skarn, Venas, Greisen	Zona de cizalla Venas	Zona de cizalla	Zona de cizalla, Venas, Fallas	Zonas de cizalla, Venas
Origen del Fluido	Hidrotermal, metasomático		Metasomático, hidrotermal	Metamórfico, metasomático	Magmático-metasomático con removilización metamórfica	Hidrotermal, metasomático
Edad de formación	Entre 2.970 Ma y 9 Ma		520 Ma, 30 Ma y 23 Ma			65 Ma y 32 Ma
T° de formación Esmeralda	> 350 °C				400 a 450 °C	< 350 °C
Depósitos En el mundo	Zambia (Kafubu) Canadá (Tsa da Gliza) Australia (Menzies) Brasil (Carnaíba) Madagascar(Ianaper) Zimbabwe(Sandawan) Etiopía (Kenticha) (Halo-Shakiso) Ucrania (Wolodarsk) Pakistán(Khaltaro) Sudáfrica (Gravelotte)	Noruega (Eidsvoll) China (Dyakou) Canadá (Lened) Australia (Emmavile) Kazajistán (Delgebetey)	China (Davdar) Afganistán (Panjsher) Estados Unidos (Heddenite)	Austria (Habachtal) Brasil (Itaberai) Pakistán (Swat-Mingora-gujar-kili, Barang)	Brasil (Santa Terezinha de Goiás) Australia (Poona) Egipto (Djebel Sikait) Zambia (Musakashi)	Nigeria (Guantú) Colombia (Chivor, Coscuez, Muzo)

5.4 COMPARACIÓN DE CALIDAD DE ESMERALDAS

No obstante las diferencias en la génesis y edad de formación de distintos tipos de depósitos, cuando se requiere conocer con certeza el origen de las esmeraldas se acuden a análisis especializados y en detalle que permitan diferenciar una gema de una región con respecto a otra. Estas técnicas no causan daños a las gemas, son de fácil aplicación y no demoran la expedición de un reporte.

Actualmente se trabaja con tres parámetros: el doblete de Fermi, espectrometría Raman y el análisis cuantitativo de diferentes elementos químicos utilizando fluorescencia de rayos X tipo dispersivo y señales de agua deuterada en espectrometría infrarroja.

El Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (CDTEC) ha realizado una caracterización química de muestras de esmeralda mediante un equipo de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva, Panalytical.

La comparación de las esmeraldas colombianas con las de Brasil y Afganistán, muestran promedios elevados de Fe de estas últimas con respecto a las de Colombia. Mientras el promedio en Brasil es alrededor de 19.000 ppm y en Afganistán alrededor de 16.000 ppm, en Colombia los promedios más altos son de Gachalá con aproximadamente 2.200 ppm (Fig. 23).

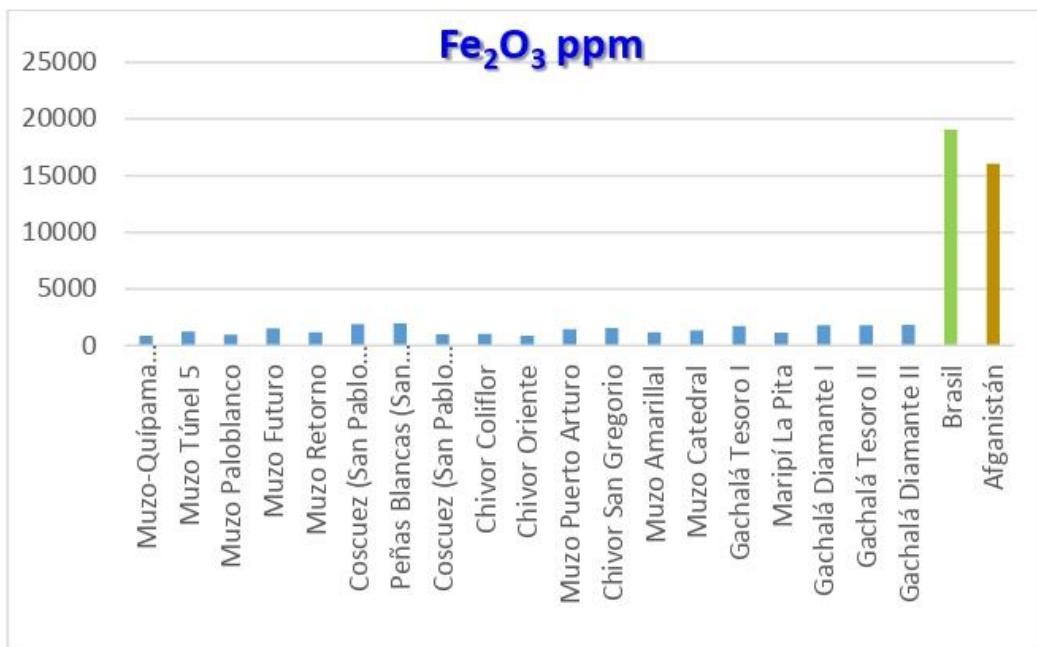


Figura 23. Promedio de concentración de Fe en esmeraldas de distintas zonas de Colombia, y muestras de depósitos de Afganistán y Brasil. Tomado de Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (2017).

Los depósitos de Afganistán, por su parte, presentan un promedio de alrededor de 700 ppm de escandio, valor elevado al comparar con los de Colombia cuyo promedio más alto se observa en Gachalá, alrededor de 350 ppm (*Fig. 24*).

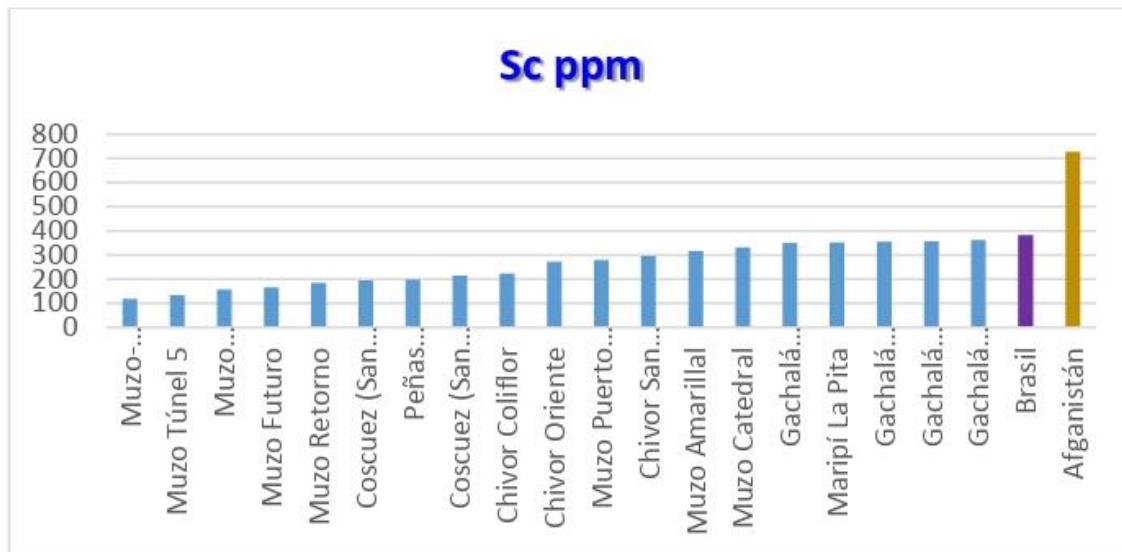


Figura 24. Promedio de concentración de Sc en esmeraldas de distintas zonas de Colombia, y muestras de depósitos de Afganistán y Brasil. Tomado de Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana (2017).

También han realizado análisis a través de espectroscopia UV-Vis-Nir que permiten la distinción de elementos cromóforos (aquellos que influyen directamente en el color de la esmeralda) como cromo (Cr^{3+}), vanadio (V^{3+}) y hierro (Fe^{2+} , a veces Fe^{3+}).

En las gemas colombianas se identificaron únicamente cromo (Cr^{3+}) y vanadio (V^{3+}), (*Fig. 25*), mientras que para esmeraldas de otras partes del mundo, además de los elementos anteriormente mencionados, se suma el hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}), (*Fig. 26*); constituyendo una clara diferenciación para clasificar el sitio de origen de la esmeralda.

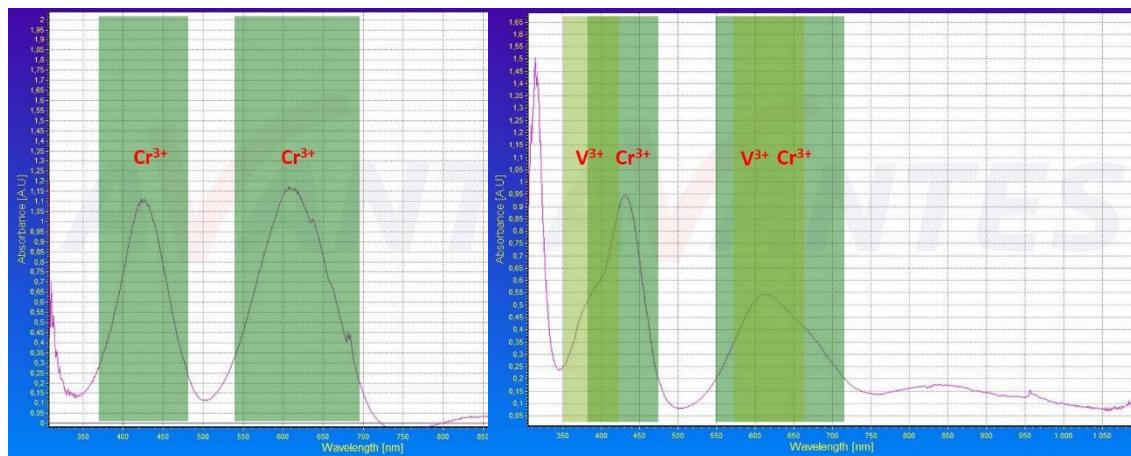


Figura 25. Resultados de análisis realizados a dos esmeraldas colombianas en los cuales el color es producido por cromo (Cr^{3+}) y cromo (Cr^{3+}) + vanadio (V^{3+}) respectivamente. Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>

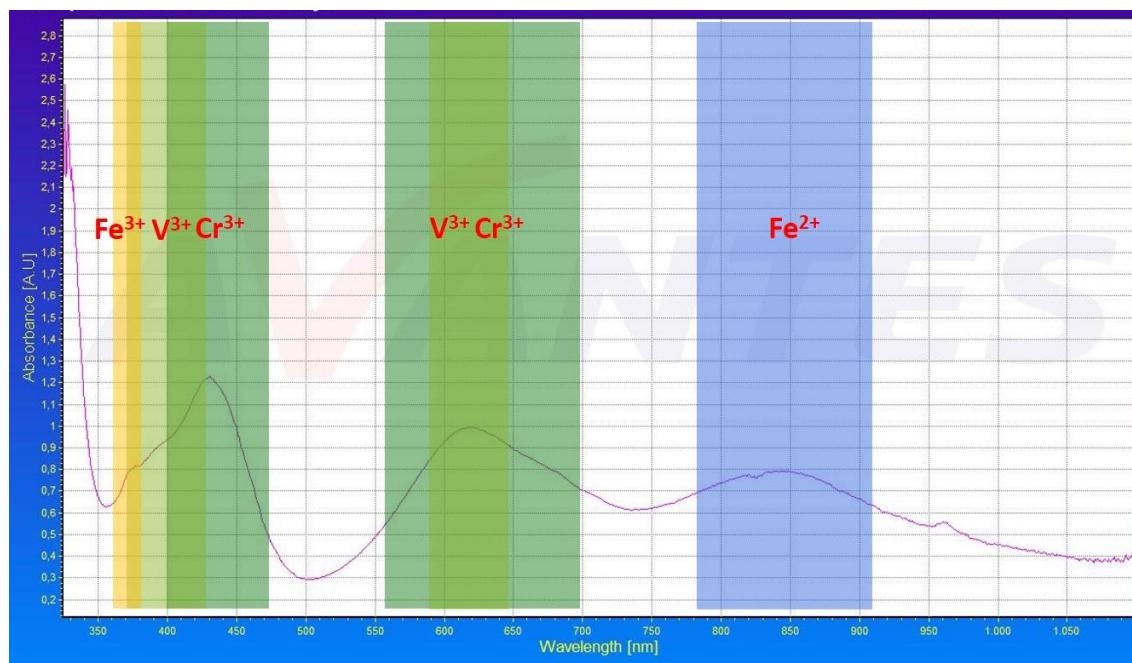


Figura 26. Resultado de análisis realizado a esmeralda de diferente origen, en las que el color no solamente es producido por cromo (Cr^{3+}) y vanadio (V^{3+}), sino también por hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}). Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>



6. PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE ESMERALDAS EN COLOMBIA

6.1 PROVINCIAS METALOGÉNICAS EN COLOMBIA

Una provincia metalogénica es un área caracterizada por una notable concentración de depósitos minerales con una asociación mineral o metálica a escala regional (Bateman, 1942; Evans, 1980). Además, es un sector de la corteza terrestre con una evolución geológica-tectónica común, y como consecuencia, una mineralización específica común definida por su composición mineralógica, forma, estilo y edad geológica (Petroscheck, 1965; Smirnov, 1982).

Para la prospección y exploración de depósitos minerales es necesario tener claro la distribución de las provincias metalogénicas y sus relaciones espaciales-temporales con los rasgos geológicos regionales. Esto es de gran importancia para ampliar la posibilidad de encontrar nuevas áreas de interés, correlacionándolas con yacimientos ya conocidos que fueron formados bajo condiciones metalogénicas similares.

En Colombia están definidas cinco provincias metalogénicas que asocian similares características o episodios de mineralización (Salinas *et al.* 1999). Estas provincias son:

6.1.1 Provincia metalogénica de La Guajira (I)

Se encuentra geológicamente limitada al oeste por la falla de Santa Marta - Bucaramanga y al sur por el lineamiento de Sevilla y la falla de Oca. En esta provincia ha ocurrido una etapa de mineralización de oro en veta en el Neógeno y se encuentran otros tipos de mineralizaciones como talco y magnesita.

6.1.2 Provincia metalogénica Andina Occidental (II)

Se ubica en un basamento Cretácico de origen oceánico que se encuentra limitado al este por el sistema de fallas del río Cauca y al oeste por el Océano Pacífico. Durante el Cretácico, un ambiente marino de fondo oceánico rico en manganeso y cobre permitió la formación de importantes concentraciones locales de estos minerales.

En esta provincia se justifica la exploración de pórfidos cupríferos (Cu, Cu-Au), VMS, manganeso volcanogénico, oro vetiforme, bauxita, magnesita y placeres auríferos.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

6.1.3 Provincia metalogénica Andina Central (III)

Se ubica geológicamente entre el sistema de fallas Cauca- Romeral al oeste y los sistemas de fallas Suaza-Prado, La Plata, Cucuana, Pericos y Mulatos al este. Su ambiente es de corteza continental, aunque en menor medida se encuentran fragmentos de corteza oceánica emplazados tectónicamente. El Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno son las épocas de metalogénesis de la provincia representados por mineralizaciones hidrotermales de oro vetiforme y depósitos diseminados. También se encuentra cobre, talco, asbestos, cromo, barita, mercurio y níquel.

6.1.4 Provincia metalogénica Andina Oriental (Esmeraldas), (IV)

Se encuentra limitada al oeste por las fallas de la Plata, Cucuana, Pericos, Mulatos y al este por el sistema de fallas del borde Llanero. Esta provincia se caracteriza por poseer un ambiente de corteza continental con basamento precámbrico afectado por eventos intrusivos del Paleozoico, Jurásico y Cretáceo, y corresponde a la de los depósitos esmeraldíferos en Colombia, más específicamente en la subprovincia metalogénica Guavio-Muzo en donde la época de metalogénesis para las gemas es el Cretácico (*Fig. 27*).

6.1.5 Provincia metalogénica Cratón Amazónico (V)

Se encuentra dentro de las regiones geográficas de Orinoquía, Amazonia, Macizo de Garzón y la Serranía de la Macarena al Sureste del país, siendo su límite Este en el sistema de fallas del borde Llanero y la falla de Gualcáramo. El basamento de la provincia es Precámbrico de carácter continental, afectado por eventos magmáticos (Precámbrico y Paleozoico) con los cuales se asocian las mineralizaciones existentes. En esta provincia metalogénica se encuentran depósitos de placeres auríferos y placeres aluviales de arenas negras con circón, ilmenita y magnetita.

Para la prospección y exploración de depósitos esmeraldíferos es necesario centrarse en la provincia metalogénica Andina Oriental (IV), más específicamente en la subprovincia metalogénica Guavio-Muzo que alberga los depósitos de esmeraldas, además de fosfatos, yeso, hierro, barita, cobre y plomo.

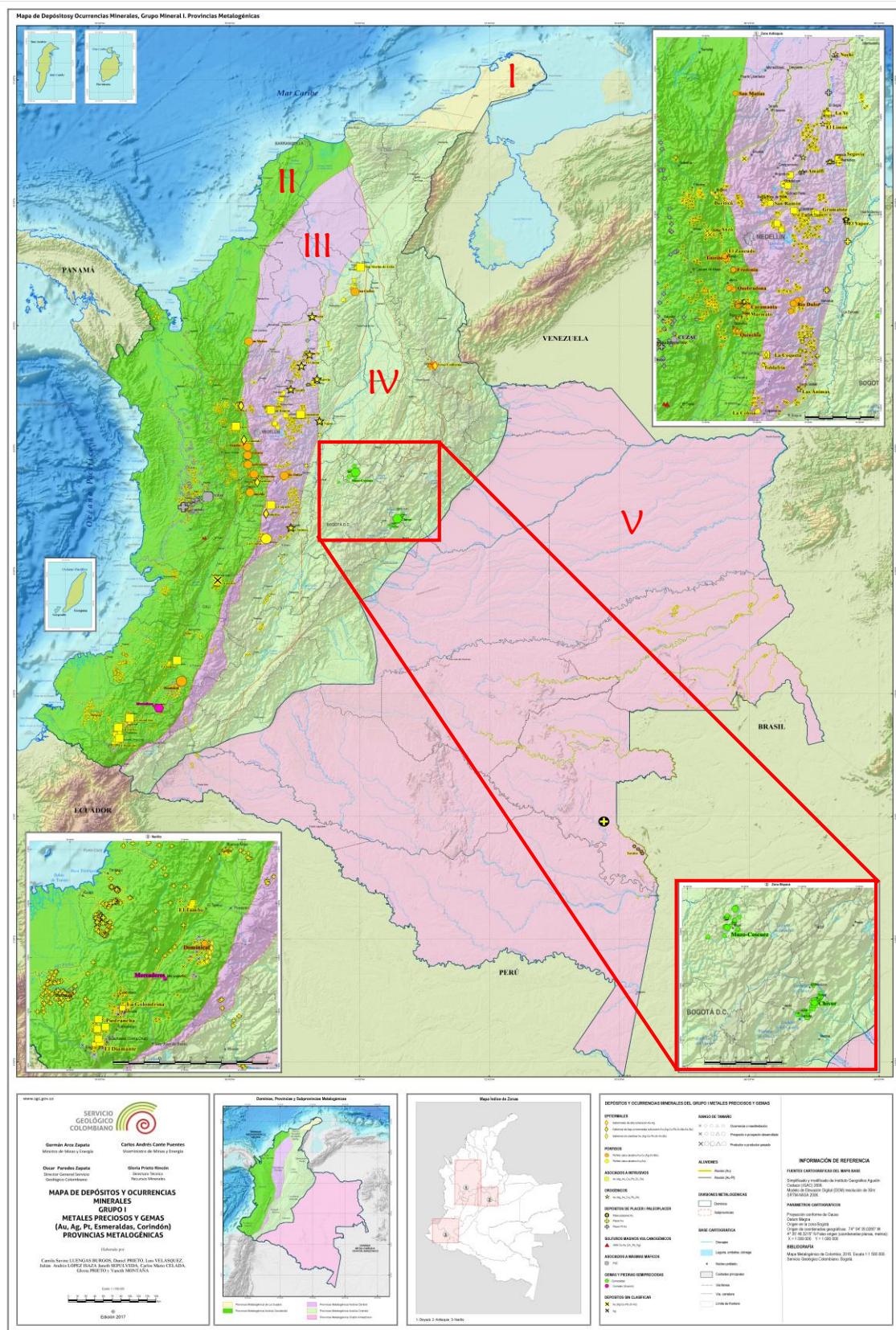


Figura 27. Mapa de depósitos y ocurrencias minerales grupo 1: Metales preciosos y gemas. Provincias metalogénicas. Escala 1:1.500.000. Recuadros rojos: Cinturones esmeraldíferos localizados en provincia metalogénica Andina Oriental. Tomado de Luengas *et al.* (2017).



6.2 PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN

Para la transformación de un depósito mineral en una mina, se llevan a cabo una serie de etapas que constituyen el proyecto minero propiamente dicho. Estas etapas demandan capital, exactitud, esfuerzo y tiempo, y asumen riesgos máximos al inicio (estadísticamente de cada 100 proyectos mineros aproximadamente 3 son exitosos) pero que disminuyen conforme la evolución y desarrollo de cada etapa (*Cuadro 5*).

Las etapas que constituyen un proyecto minero desde el inicio al final son: prospección, exploración, prefactibilidad, factibilidad y construcción, explotación y cierre de mina.

En Colombia, los proyectos mineros esmeraldíferos deberán estar establecidos en áreas dentro de la provincia metagénica Andina Oriental, en la subprovincia metagénica Guavio-Muzo.

Para el 2018 y según datos de la Agencia Nacional de Minería (ANM) de Colombia, 325 títulos mineros estaban asociados a esmeraldas (56.729 ha), 27 de ellos se encontraban en etapa de exploración (3.252 ha), 32 títulos en etapa de construcción y montaje (6.820 ha) y 266 títulos en etapa de explotación (46.657 ha). Además, existían 457 propuestas de concesión minera en esmeraldas (237.383 ha) equivalente al 0,21% del territorio nacional.

Cuadro 5. Títulos mineros asociados a esmeraldas para el 2018 en relación con probabilidades de éxito e inversión estimada para cada etapa de un proyecto.

Etapa	Núm. Proyectos	Éxito %	Inversión estimada
			Millones \$USD
Prospección		0,5 - 1 %	< 1
Exploración	27	1-15 %	1 – 10
Prefactibilidad		25 – 50 %	20 – 40
Factibilidad y construcción	32	75 – 100 %	55- 70
Eplotación	266	100	> 70



6.3 PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN GEOQUÍMICA

6.3.1 Interpretación de la relación Na/K

El seguimiento de las relaciones anómalas de Na/K (mayor a 1) o de concentraciones anómalas de sodio o algunos elementos de tierras raras, puede constituir un importante indicador a nivel regional y local para la prospección y exploración de estos depósitos (Mendoza, 1996).

➤ Agua

La alta movilidad del sodio por meteorización de la roca y circulación de aguas superficiales y subterráneas, su alto coeficiente de dispersión en la región (60 %) y la homogeneidad de la muestra, constituye un factor para seleccionar áreas promisorias especialmente las que presentan albitización (lutitas albitizadas).

Los análisis del contenido de Na en agua de la zona mineralizada, alcanzan valores altos dado la gran solubilidad del mineral, generando alta contaminación en las zonas de intenso fracturamiento o de desechos de explotación de las minas. El control geológico en detalle y el análisis estructural constituyen la principal recomendación para la programación de la fase exploratoria geoquímica en aguas.

➤ Sedimentos activos

Para los sedimentos activos, la relación Na/K decrece considerablemente si se compara con rocas y suelos, producto de la alta dispersión por la mayor movilidad química y física del Na y por la baja dispersión del K, el cual presenta una mayor adsorción en las fases de oxidación y presencia de arcillas de los sedimentos activos.

La relación Na/K positiva, mayor de 1, es correlacionable con valores anómalos del La, correspondiendo a la paragénesis que existe en la mineralización de esmeralda-parisita en la región de Muzo.

La utilización de sedimentos activos en la prospección de esmeraldas está limitada a los procesos de dispersión de la mayoría de elementos y adsorción de ellos por arcillas. Sin embargo, constituye una herramienta de apoyo en el estudio de la paragénesis y en la explicación petrológica, mineralógica y ambiental que origina la migración de estos elementos.

➤ Suelos

El comportamiento químico de Na, K y otros elementos en suelos residuales de las áreas mineralizadas o cerca de ellas, determinó valores altos para la relación Na/K en los horizontes B (> 1.57) y A (> 1.4), mientras que en las áreas no mineralizadas esta relación decrece (< 1).

➤ Rocas

En rocas el bajo contenido de K indica que el metasomatismo potásico no fue importante; tampoco debe considerarse primordial la existencia de una fase evaporítica. En rocas con relación Na/K alta la presencia de mica es casi nula, lo cual puede ser un indicador de campo en la fase exploratoria al considerar la alteración de la roca y las condiciones meteóricas presentes.

6.3.2 Isótopos

Emex Group a través de su grupo de investigación de la Universidad Nacional de Taiwan, ha realizado investigaciones que resultan útiles para la exploración de esmeraldas; proponen que el rango de $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) entre 18 a 21,8‰ y -4 a -10,3‰ para $\delta^{13}\text{C}$ (PDB), representa la firma isotópica de los fluidos hidrotermales que condujeron a la mineralización de esmeralda. Por esto, cualquier calcita proveniente de vetas hidrotermales de la Formación Muzo (CEO) con un valor isotópico cercano a este rango de valores y con el entorno geológico apropiado, tiene la posibilidad de asociarse con esmeraldas (Fig. 28).

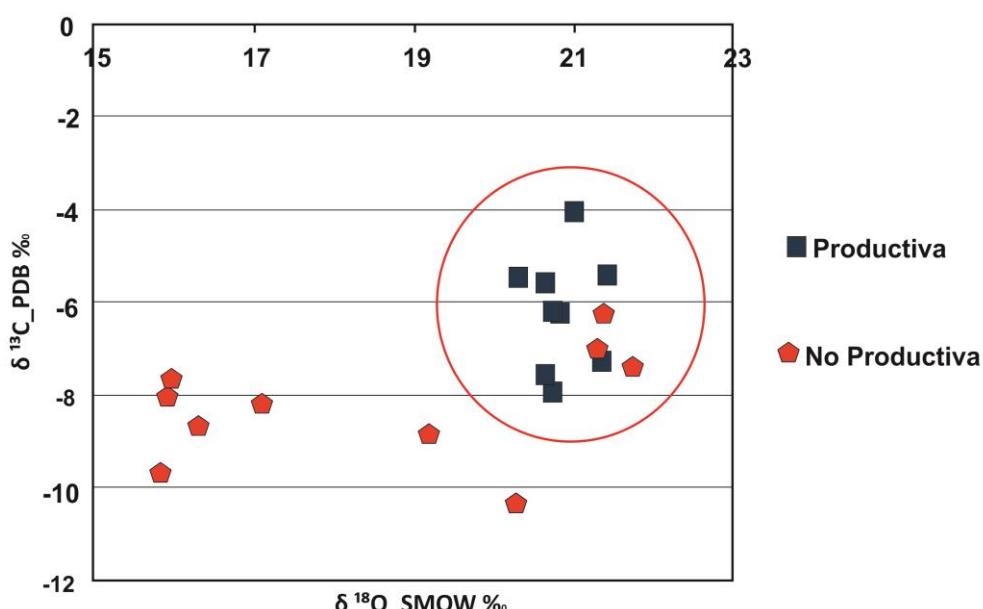


Figura 28. Valores isotópicos en venas productivas y no productivas de esmeraldas. Tomado de Emerald Explorers Group.



La comparación en la composición isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ en carbonatos y del $\delta^{34}\text{S}$ en piritas presentes en los rellenos de venas hidrotermales es útil en las etapas de exploración, debido a que se ha establecido preliminarmente que los valores muy ligeros (negativos) están relacionados a venas con mineralizaciones esmeraldíferas, mientras que los valores muy pesados (valores positivos) se relacionan con materiales de venas donde no se ha reportado la presencia de esmeraldas (Terraza y Montoya, 2011).

6.4 PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN GEOFÍSICA

Los depósitos esmeraldíferos de Colombia presentan relación con la presencia de pirita asociada a zonas productivas de esmeraldas. A través de esta relación y de la detección de anomalías geofísicas, es posible determinar áreas potencialmente mineralizadas.

Ochoa (2003) realizó una evaluación magnetométrica, radiométrica y geoeléctrica de depósitos esmeraldíferos en áreas cercanas a los municipios de Chivor y Macanal en el CEOR. En sus resultados muestra que las áreas con potencial esmeraldífero tienen en común:

- Resistividades menores a 1 ohm-m.
- Baja radiactividad (menor a 60 cps) debido a la alteración de zonas potásicas a zonas albitizadas y alta radiactividad por la presencia de minerales radiactivos asociados. Esta última de manera excepcional y eventual.
- Alta concentración de sodio (30,5%) y concentración anómala de radón (mayor >30).
- La presencia de rasgos estructurales alineados en una dirección aproximada de N50°E desde la quebrada Negra hasta el Alto de Muceño.

En complemento, para la correlación y evaluación de las áreas potencialmente favorables en mineralización de esmeraldas, es importante acompañar las respuestas geofísicas con los datos geoquímicos.

Minería Texas Colombia S.A, empresa que opera en el CEOC en Muzo, determinó la respuesta de las rocas a través del método polarización inducida y resistividad; la diferencia negativa de la polarizabilidad se encuentra en el fondo de valores bajos de resistividad y localizados cerca de las fallas locales, es decir, zonas con potencial productivo (*Fig. 29*).

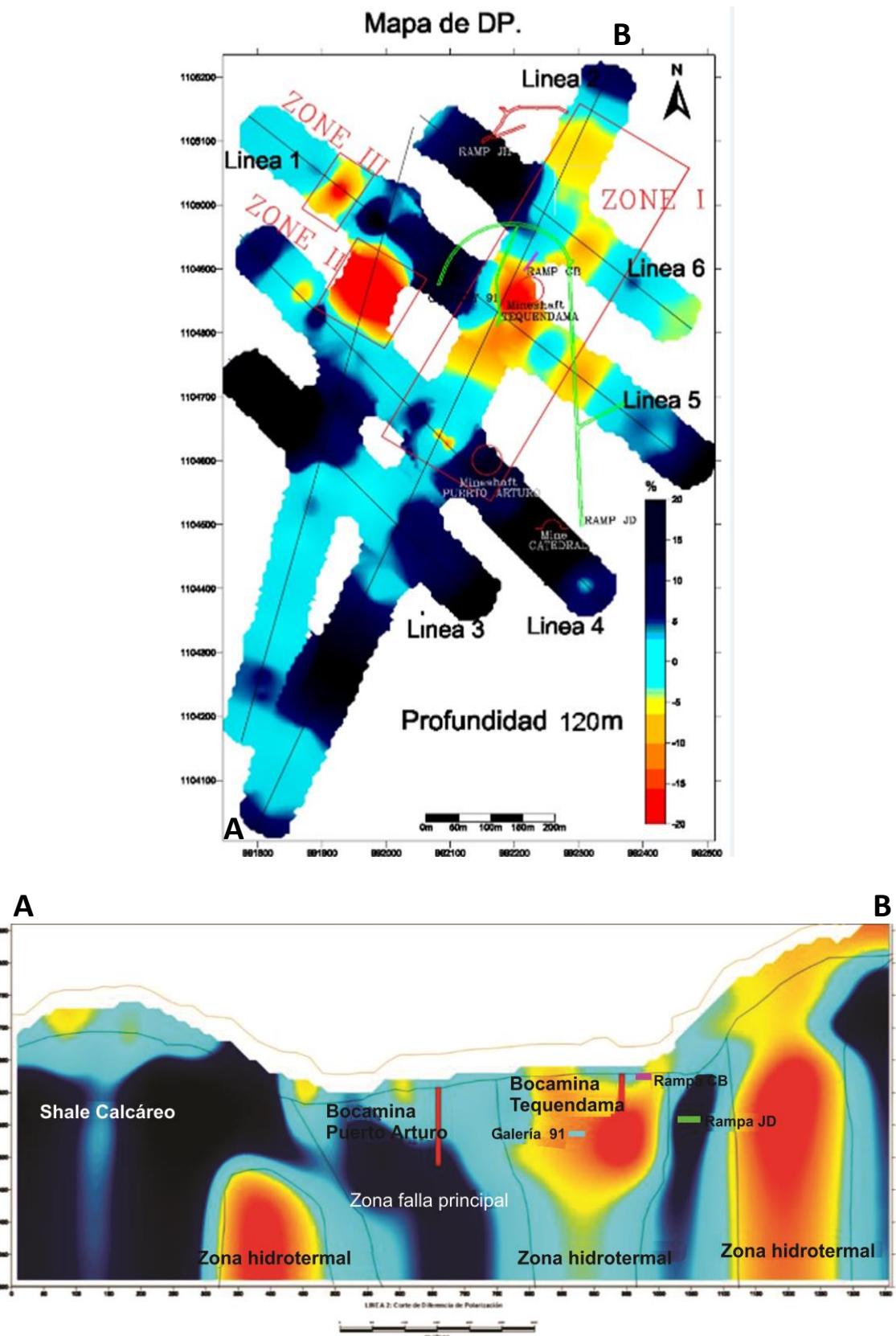


Figura 29. Método de polarización inducida y resistividad aplicado al área de operación en la mina Puerto Arturo en el CEOC por parte de Minería Texas Colombia S.A. Tomado de Web Minería Texas Colombia S.A. <http://www.mtcol.com/>

6.5 IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS PROSPECTABLES

6.5.1 Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEOc)

En una prospección inicial es recomendable ubicar las áreas en formaciones calcáreas del Cretácico Inferior con edades entre 145 y 130 Ma tales como la Formación Rosablanca (Valanginiano) y la Formación Muzo (Hauteriviano- Barremiano), teniendo en cuenta posibles trampas estructurales a través de intersecciones de zonas de falla con tendencia a NE y NW, desarrolladas dentro de un modelo compresivo regional.

En el presente trabajo se recomienda realizar prospecciones mineras en dos áreas: a) Al Norte de la localidad La Victoria, en donde hay intersecciones de fallas inversas con orientación NE que afectan a la Formación Muzo y en donde cercanamente se ha reportado mineralizaciones de esmeralda.

b) Al Norte de la localidad de San Pablo de Borbur, en los contactos fallados de la Formación Muzo con la Formación Rosablanca (*Fig. 30*).

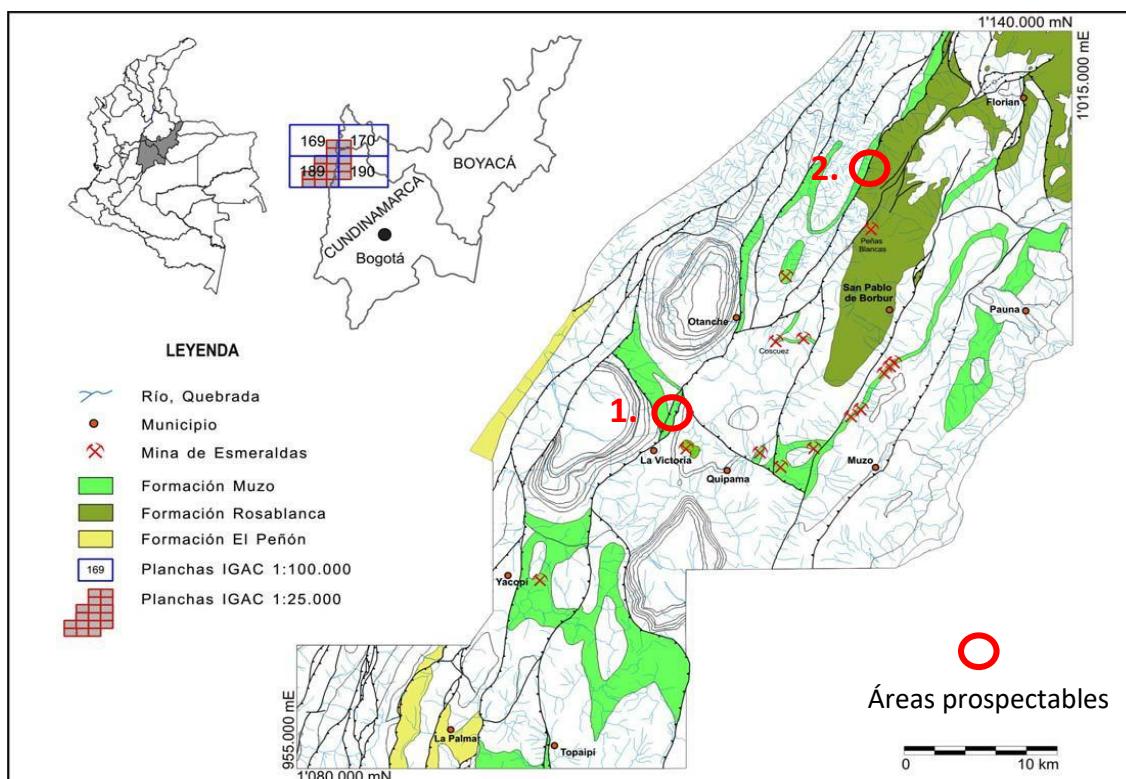


Figura 30. Identificación de áreas prospectables por esmeraldas en las áreas aflorantes de la Fm Rosablanca y Fm Muzo en el CEOc. Mapa base tomado de Terraza y Montoya (2011).

6.5.2 Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR)

En una prospección inicial es recomendable ubicar las áreas en formaciones calcáreosiliciclásticas del Cretácico Inferior con edades cercanas a los 145 Ma tales como: Formación Santa Rosa (Berriásano) y Formación Chivor (Berriásano). Además de tener en cuenta los rasgos estructurales alineados en una dirección aproximada de N50°E.

Para esta área se recomienda realizar prospecciones mineras en dos sitios: a) En cercanías de la localidad de Palomas en la intersección de fallas (de rumbo e inversa) en la Formación Santa Rosa.

b) En cercanías de la localidad de Rionegro en donde se evidencia un contacto geológico fallado entre la Formación Chivor y la Formación Santa Rosa (*Fig. 31*).

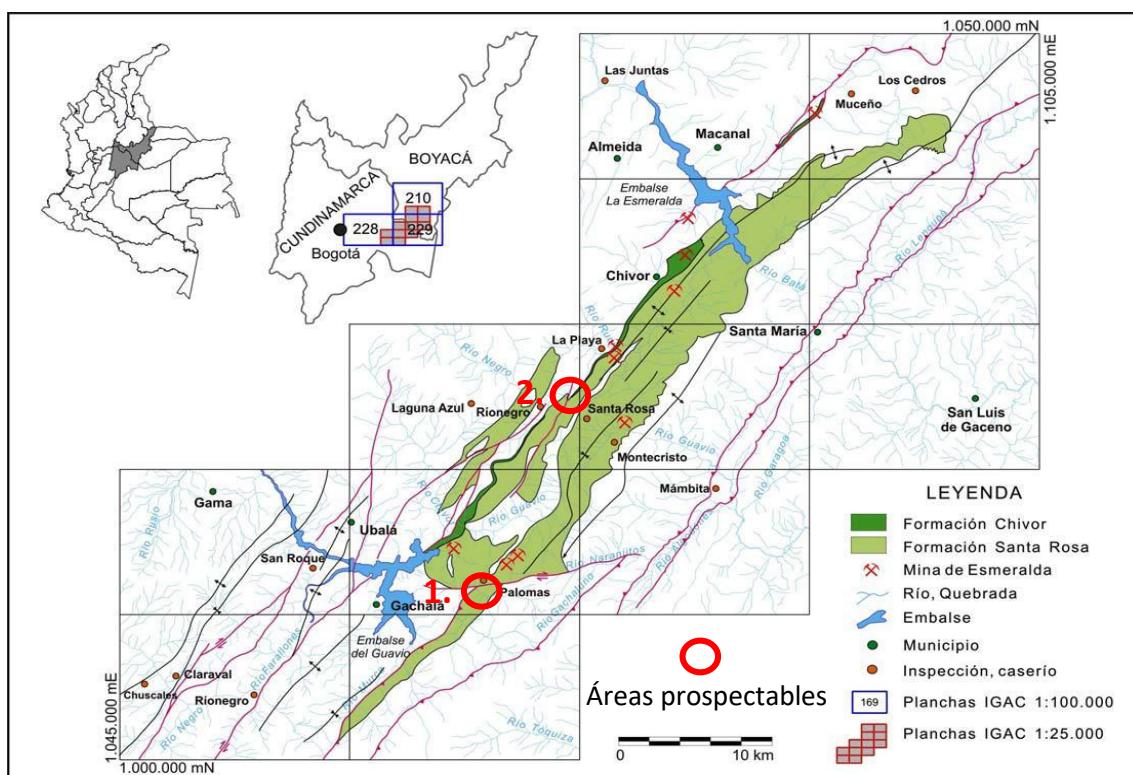


Figura 31. Identificación de áreas prospectables por esmeraldas en las áreas aflorantes de la Fm Santa Rosa y Fm Chivor en el CEOR. Mapa base tomado de Terraza y Montoya (2011).

Con el objetivo de aumentar la probabilidad de encontrar mineralización de esmeralda en los eventuales prospectos ubicados con los parámetros inicialmente recomendados, se recomienda evaluar otras condiciones que han sido establecidas por investigaciones y estudios de otros autores (Giuliani *et al.* 2019; Terraza y Montoya, 2011; Mendoza, 1996), y que han sido adaptados en este trabajo (*Cuadro 6*).



Cuadro 6. Condiciones favorables para prospección y exploración de esmeraldas en los cinturones esmeraldíferos.

- 1.** Zonas con profusión de venas y brechas hidrotermales cortando la estratificación que indiquen eventos mineralizantes como hidrofracturamiento, venas, niveles con bandeamientos albitíticos y brechamiento con “bolsas” de rellenos hidrotermales.
 - 2.** Asociaciones minerales como: albita, calcita, dolomita, parisita, fluorita, fuchsita y pirita.
 - 3.** Relaciones anómalas de Na/K mayor a 1, concentraciones anómalas de sodio o de algunos elementos de tierras raras.
 - 4.** Enriquecimiento en Na, Ca, Mg, Mn y S, y empobrecimiento en K, Si y Al, en los shales de los bloques tectónicos.
 - 5.** Concentraciones de berilio en lutitas negras entre 0,1 y 3,0 ppm.
 - 6.** Composición isotópica del $\delta^{13}\text{C}$ en los carbonatos y del $\delta^{34}\text{S}$ en piritas presentes en los rellenos de venas hidrotermales, en donde los valores bajos (negativos) están relacionados a venas con mineralizaciones esmeraldíferas.
 - 7.** Rangos de $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) entre 18 a 21,8‰ y -4 a -10,3‰ para $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) en calcitas de vetas hidrotermales para posibilitar la asociación y mineralización de esmeralda.
 - 8.** Mineralización abundante de pirita asociada con venas portadoras de esmeralda, que posibilite la aplicación de métodos geofísicos como polarización inducida (IP) y resistividad eléctrica.
-

Si las áreas objetivas resultan primariamente favorables y cumplen con los parámetros preestablecidos, sería necesario avanzar en etapas exploratorias con mapeo geológico, ejecución de trincheras y programas de perforación.



7. MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

Los métodos de explotación de minas de esmeraldas en Colombia en los dos cinturones esmeraldíferos, han ido evolucionando con el tiempo. Desde los inicios en épocas prehispánicas, los indios Muzo -quienes habitaban parte de la zona y se sentían atraídos por la belleza en el color de la esmeralda-; tomaban las gemas en el borde de los ríos y las preservaban. Seguidos de los españoles, quienes se apropiaron de las áreas y esperaban especialmente épocas de lluvia para hacer revisar el sedimento transportado y depositado por los afluentes de la zona. Posteriormente, cuando el Estado colombiano asume el control de esta actividad a partir del siglo veinte, comienzan a utilizarse métodos de explotación principalmente subterráneos y en menor medida a cielo abierto.

Los métodos a cielo abierto consistían en seleccionar superficialmente macizos posiblemente productivos para posteriormente ser volados y debilitados a través de explosivos. El material que resultaba de la voladura era tomado y removido por maquinaria pesada para ser lavado y revisado ante la posible presencia de las gemas. Estos métodos no eran tecnificados ni adecuados desde el punto de vista ambiental, geológico y económico, por lo que en la actualidad no son utilizados.

La minería subterránea es el método de explotación más utilizado en este tipo de minería en Colombia, en donde el seguimiento al comportamiento de las vetas, ha sido el pilar en los avances de los frentes. A partir del año 2010, se han mejorado las condiciones en las que operan las minas tanto en el CEOR como especialmente en el CEOC, debido al establecimiento y fiscalización de normativas mineras por parte del gobierno, y a la llegada de empresas que han invertido en la tecnificación de minas, equipos e implementos necesarios para cumplir el objetivo de llevar a cabo una minería responsable con estándares internacionales.

El ingreso a las minas de esmeraldas en Colombia se realiza a través de ascensores o malacates mineros en pozos verticales hasta el nivel deseado, a través de una bocamina sección galería o por medio de una boca mina sección rampa. Dentro de las minas la intercomunicación entre nivel y nivel en galerías generalmente está dada por malacates mineros o escaleras verticales. Los malacates mineros además de transportar personal, ayudan a la evacuación de la carga hacia la superficie.

Teniendo en cuenta la geología de la zona y la baja calidad geotécnica de la roca que componen las áreas de operación (lutitas generalmente), los avances se realizan en galerías con sostenimiento de madera en su gran mayoría o en rampas con sostenimiento metálico. La madera de tipo “sapán”, se caracteriza en la región por ser muy resistente a condiciones de alta presión y humedad, manteniendo parte de sus propiedades y consistencia a lo largo del tiempo.

El sostenimiento en galerías es colocado generalmente cada 1,5 a 2 metros de avance, 2 a 3 metros de altura y 1,5 a 2 metros de ancho, aunque estas medidas pueden variar según la mina o calidad de la roca en el frente (*Fig. 32*).

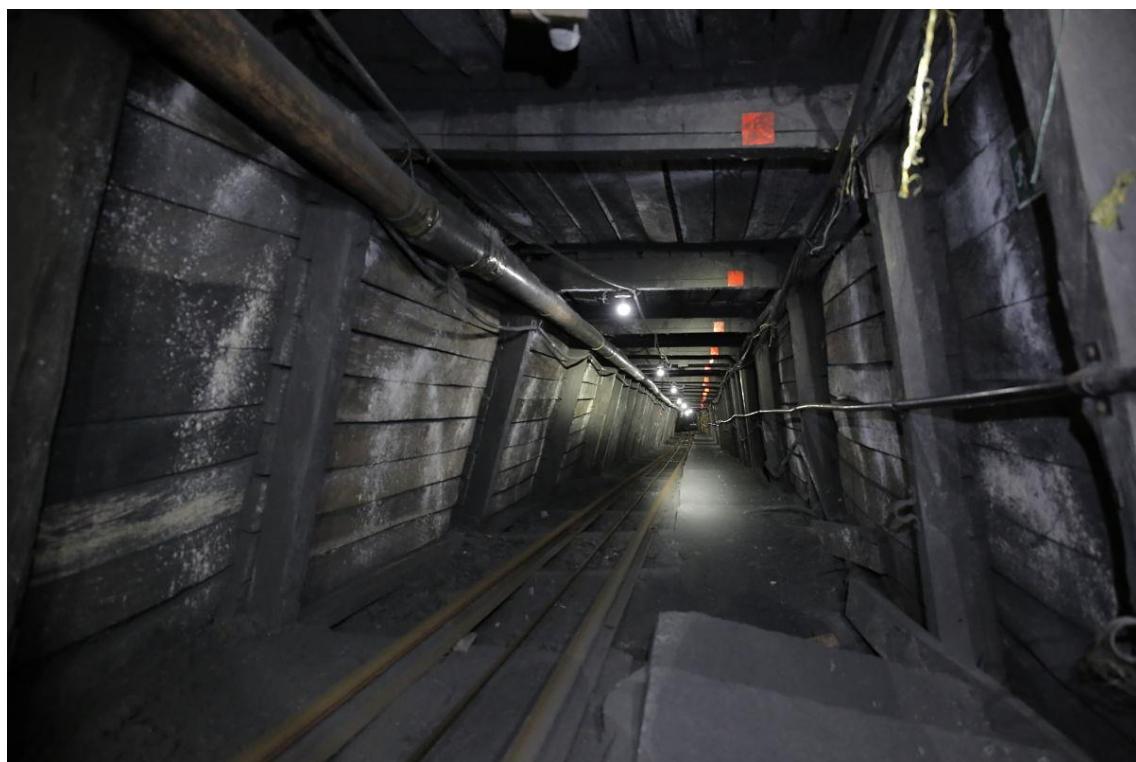


Figura 32. Galerías con sostenimiento de madera en mina ubicada en el CEOC. Tomado de Web Esmeraldas Santa Rosa S.A. <https://www.esmeraldassantarosa.com/>

Para las secciones rampa el sostenimiento es con puertas metálicas o cementando las paredes con ayuda de pernos y mallas colocados equidistantemente y perpendiculares a la estratificación. Las medidas en estas secciones son mayores respecto a las galerías, permitiendo el acceso de maquinaria y equipos de gran tamaño, además de servicios y rutas de evacuación que se intercomunican entre sí dentro de la mina (*Fig. 33*).



Figura 33. Rampa con sostenimiento de puertas metálicas y shotcrete en mina ubicada en el CEOC. Tomado de Semana (2017).

Los avances en los frentes productivos en las minas de esmeraldas no son mayores respecto a otros tipos de minería, debido a que no se utilizan explosivos y a que el procedimiento de extracción de la gema es manual. La producción es llevada a cabo únicamente por personas asignadas por el dueño de la mina o por profesionales en geología, quienes depositan las gemas en una bolsa especial y quienes una vez finalizado el turno, la llevan junto con personal de seguridad a superficie bajo estrictas medidas y protocolos establecidos, para ser clasificadas por los dueños o altos cargos de la mina y ser enviadas a su destino.

La carga de los frentes productivos es puesta en coches mineros de seguridad y llevada a superficie para ser lavada y verificada ante la posible presencia de gemas que no fueron vistas en los frentes de operación.

Fura Gems Inc., empresa que opera en Coscuez en el CEOC, ha retomado y recuperado antiguas galerías para continuar su proceso de exploración, identificando y caracterizando la geología del área (*Fig. 34*). De igual manera Minería Texas Colombia S.A también en el CEOC en Muzo, realiza su explotación teniendo como base antiguos túneles, tecnificándolos y desarrollando nuevos, además de construir distintas secciones rampa para el ingreso de ventilación, servicios, equipos, y maquinaria pesada, entre otros (*Fig. 35*).

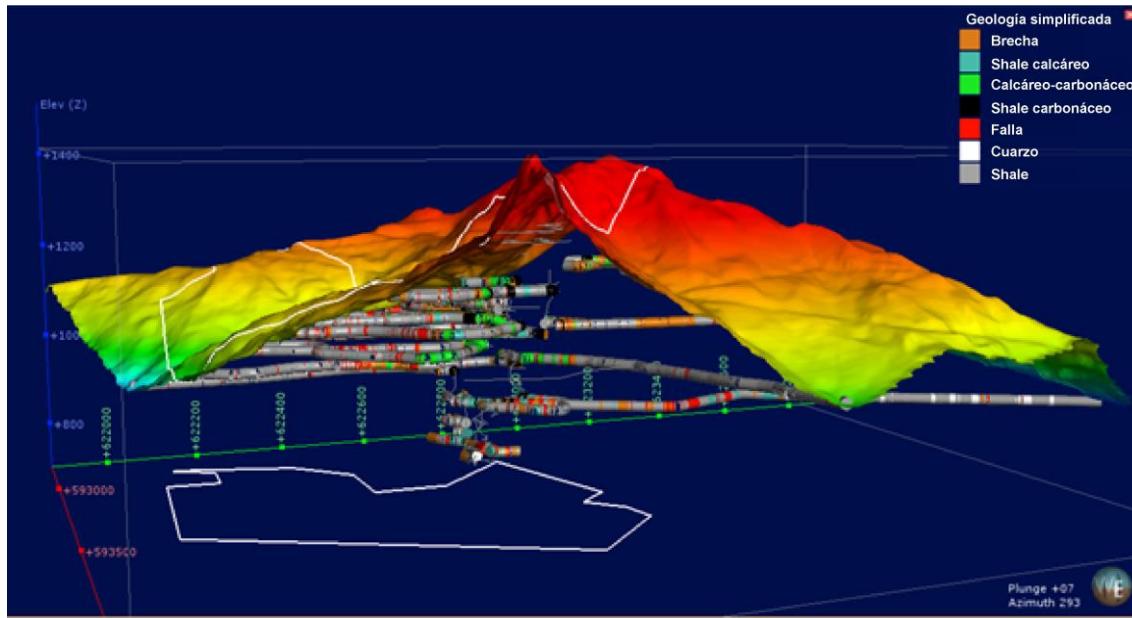


Figura 34. Sección transversal del modelo de cuerpo mineralizado en el CEOC. Método de explotación: Minería subterránea operada por Fura Gems Inc. Tomado de Fura Gems Inc. (2018).



Figura 35. Modelo operativo para la extracción de esmeraldas en el CEOC. Método de explotación: Minería subterránea operada por MTC a través de galerías y rampas. Tomado de Minería Texas Colombia S.A (2017).

8. MERCADO DE ESMERALDAS

La producción y exportación de esmeraldas en Colombia ha ido en crecimiento durante los últimos años, produciendo más de 2 millones de quilates por año y exportando similares números a países como Estados Unidos, China, Tailandia, India, Japón, Italia, Alemania, España y Emiratos Árabes (*Fig. 36*). Estas gemas son apreciadas en mercados internacionales y son parte fundamental de la economía del país si se tiene en cuenta que el 0,5% de las exportaciones colombianas y el 2% de las exportaciones mineras son de esmeraldas y tributan regalías anuales por cerca de \$3 millones de USD que representan más del 0,5% de las regalías mineras en el país.

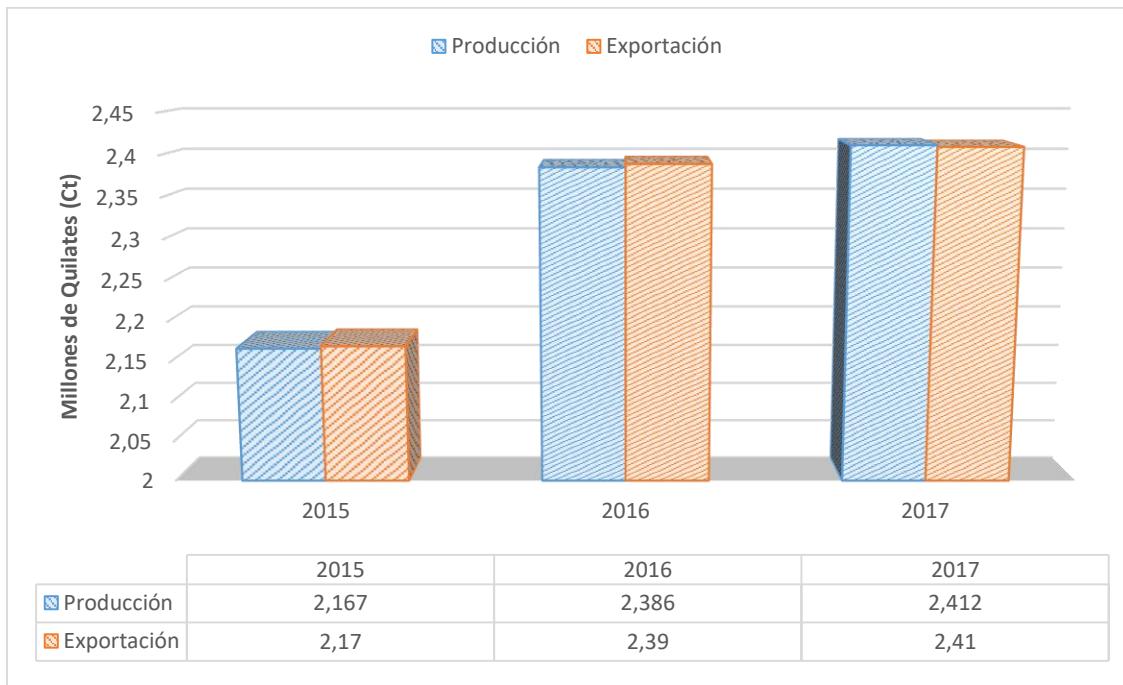


Figura 36. Producción y exportación de esmeraldas en Colombia. Realizado con datos de la Agencia Nacional de Minería (2018).

Entre los países productores de esmeraldas en el mundo se encuentran China, Australia, Canadá, Afganistán, Pakistán, Madagascar, Rusia, Etiopía, Tanzania, Zimbabue, Brasil, Colombia y Zambia, siendo estos últimos países los de mayor producción (*Fig. 37 y 38*).



Figura 37. Mapa de los países productores de esmeraldas. Tomado de Web Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. <http://www.gemlabcdtec.com/>

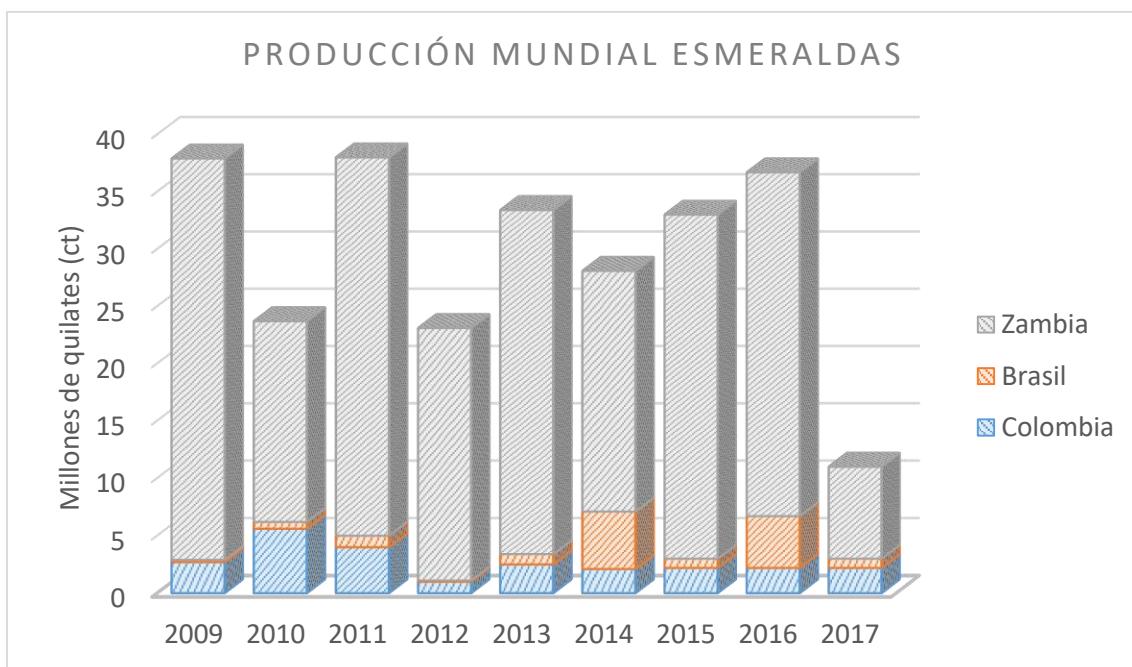


Figura 38. Producción mundial de esmeraldas y participación de los principales países productores. Realizado con datos de Federación Nacional de Esmeraldas de Colombia (2015), Agencia Nacional de Minería (2018), Unidad de Planeación Minero-Energética (2018), United States Geological Survey (2019).



9. DESARROLLO DE UN PROYECTO MINERO DE ESMERALDAS EN COLOMBIA

La minería en Colombia representa alrededor de 2% del Producto Interno Bruto (PIB), aportando más de \$11.700 millones USD en impuestos y regalías al país durante la última década. Genera más de 300.000 empleos directos y más de 1.000.000 de empleos indirectos por medio de sus encadenamientos productivos y se prevé que esta cifra siga en aumento debido a los proyectos de formalización e inversión que tiene en marcha el actual gobierno.

De acuerdo con el reporte del Banco de la República correspondiente al segundo trimestre de 2019, el sector de minas y canteras registró durante este periodo una inversión de \$699 millones USD, representando el 18% de la Inversión Extranjera Directa (IED) en el país y evidenciando un 10% de crecimiento en relación al segundo trimestre del año anterior. La IED acumulada en el sector al 30 de junio 2019 llegó a los 1.334 millones de dólares, manteniendo su tendencia positiva al registrar un aumento del 31% frente al primer semestre de 2018.

Colombia es un país con alto potencial para la inversión en el desarrollo de proyectos mineros y buen conocimiento de la geología, geofísica y geoquímica del territorio nacional para la búsqueda de minerales económicamente viables. Según la Agencia Nacional de Minería (ANM) para el 2018, se contó con más de 8.000 títulos mineros otorgados en el país, de los cuales 325 títulos estaban asociados a proyectos mineros de esmeraldas que constituyeron los 1332 títulos esmeraldíferos para el 2019. Esto demuestra una clara tendencia e interés en la inversión en proyectos esmeraldíferos que, pese a no tener reservas probadas en el país, según Óscar Vaquero (Presidente de FEDESMERALDAS) solo se ha explotado el 10% de la capacidad de producción en el territorio nacional.

Además, según el informe del Banco Mundial Doing Business 2018 “Colombia es una de las economías con mayor facilidad para hacer negocios con más de 12 tratados de libre comercio, 20 acuerdos de inversión y 10 de doble tributación, así como una excelente ubicación geográfica”, por lo que se pronostica un excelente escenario para la inversión a proyectos esmeraldíferos en los próximos años.

9.1 INSTITUCIONALIDAD MINERA

En Colombia de acuerdo con el Decreto 0381 de 2012, la institucionalidad minera está a cargo del Ministerio de Minas y Energía, en cabeza del Viceministro de Minas quien se encarga de la gestión en políticas relacionadas a la exploración y explotación del potencial minero del país. Esta área se conforma con la Dirección de Formalización Minera y la Dirección de Minería Empresarial. En complemento se cuenta con instituciones como la Agencia Nacional de Minería (ANM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) quienes complementan la estructura minera del país (Fig. 39).



Figura 39. Institucionalidad Minera de Colombia. Tomado de Agencia Nacional de Minería (2018).

9.2 PROPIEDAD DE RECURSOS MINEROS Y CONCESIONES MINERAS

En Colombia por amparo de la Ley 685 de 2001 por la cual se expide el Código de Minas y en orden del Artículo 5. *Propiedad de los Recursos Mineros* del Capítulo I de la *Propiedad Estatal*: “Los minerales de cualquier clase y ubicación, yacentes en el suelo o el subsuelo, en cualquier estado físico natural, son de la exclusiva propiedad del Estado, sin consideración a que la propiedad, posesión o tenencia de los correspondientes terrenos, sean de otras entidades públicas, de particulares o de comunidades o grupos.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Quedan a salvo las situaciones jurídicas individuales, subjetivas y concretas provenientes de títulos de propiedad privada de minas perfeccionadas con arreglo a las leyes preexistentes.” (Ministerio de Minas y Energía, 2001).

Por otra parte, el derecho a explorar y extraer recursos minerales está amparado en el Código de Minas en el Artículo 14. *Titulo Minero* del Capítulo II *Derecho a explorar y explotar:* “*A partir de la vigencia de este Código, únicamente se podrá constituir, declarar y probar el derecho a explorar y explotar minas de propiedad estatal, mediante el contrato de concesión minera, debidamente otorgado e inscrito en el Registro Minero Nacional.*” (Ministerio de Minas y Energía, 2001).

El contrato de concesión puede durar hasta 60 años y es otorgado por la Agencia Nacional de Minería (ANM) e inscrito en el Registro Minero Nacional. Con base a información de la ANM para acceder a este derecho, existen dos maneras:

1. Primero en el tiempo, primero en derecho:

En las áreas libres para el desarrollo de la minería, la primera solicitud o propuesta de concesión minera confiere un derecho de prelación frente a otros interesados para obtener la concesión, en caso de que se cumplan los requisitos legales.

2. Negociación de un título minero existente:

Los títulos son negociables entre partes privadas y los derechos de concesión podrán transferirse en su totalidad o en parte por medio de una cesión que requiere aprobación de la autoridad minera. El contrato de concesión otorga el derecho exclusivo a realizar las obras necesarias para explorar, explotar, procesar, transportar y embarcar los minerales específicos cubiertos por el título, en los términos y condiciones establecidos por el Código Minero. Los titulares pueden solicitar una adición al contrato de concesión si encuentran otros minerales dentro del área otorgada que no están incluidos en su concesión inicial.

A través de una solicitud de un certificado de área Libre, es posible hacer la verificación del área a solicitar en el Catastro Minero colombiano.

Para tramitar una cesión de derechos de concesión se requiere verificación de la notificación previa de la cesión a la autoridad minera, verificación de la capacidad jurídica de las partes y verificación de la capacidad económica del cessionario. Para acceder a la aplicación de un contrato de concesión minera se inicia con la compra del derecho en línea, seguido de varias etapas que finalmente determinan la inscripción o rechazo de la aplicación (*Fig. 40*).

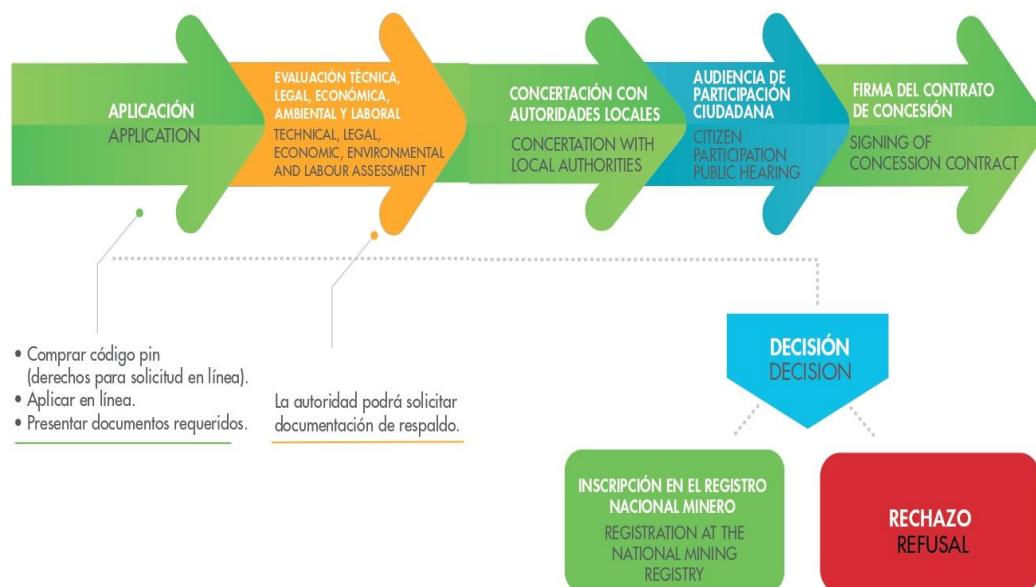


Figura 40. Aplicación de un contrato de concesión minera según la Agencia Nacional de Minería (2018).

9.3 PROCEDIMIENTOS

En Colombia hay libertad de empresa y actividad económica. Las actividades económicas, aunque reguladas y sujetas a inspección, vigilancia y control, se rigen por el principio de igualdad, por lo que los inversionistas extranjeros están sujetos a la misma normatividad y pueden acceder a los mismos beneficios.

Para la realización de un proyecto minero, es necesario tener en cuenta cada una de las autoridades relacionadas al sector y los procedimientos a llevar a cabo según sea la etapa del proyecto. Los procedimientos para desarrollar un proyecto minero en Colombia se observan en la siguiente figura (*Fig. 41*).



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



Figura 41. Procedimientos legales para realizar minería en Colombia. Tomado de Agencia Nacional de Minería (2018).

9.4 CICLO MINERO

De acuerdo con el código de minas de Colombia de la Ley 685 de 2001, el ciclo de la actividad minera y el tiempo de la duración del contrato de concesión, están dados por diferentes términos y actividades que comienzan desde la inscripción en el Registro Nacional Minero (RNM) hasta la solicitud de un área de explotación.

Cada una de las etapas presentan responsabilidades y compromisos que deben ser cumplidos a cabalidad para la vigencia del contrato (*Fig. 42*).

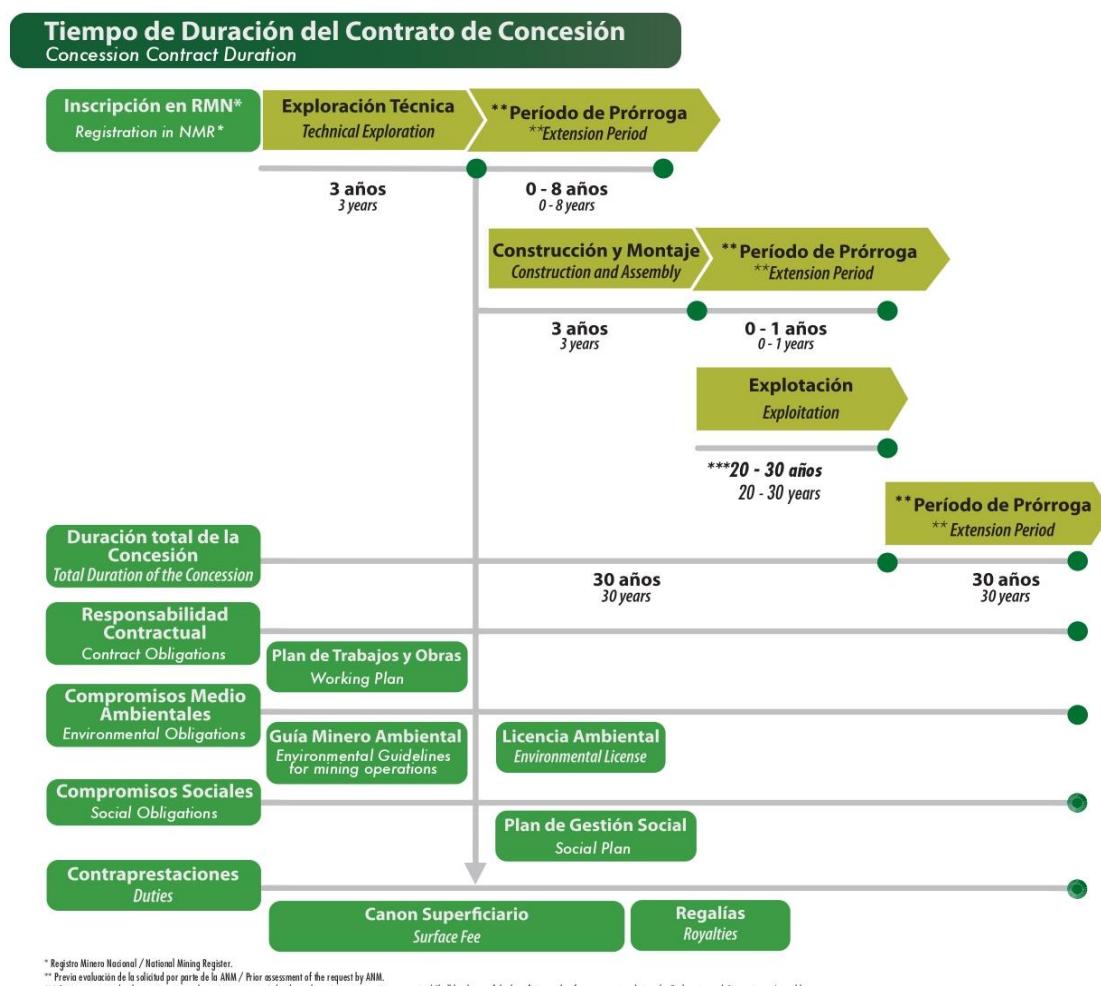


Figura 42. Ciclo de actividad minera en Colombia según la Agencia Nacional de Minería (2018).



9.5 OBLIGACIONES ECONÓMICAS

El concesionario debe pagar al Estado los siguientes valores de acuerdo con la etapa en la que se encuentra el proyecto minero. De acuerdo en la información brindada por la ANM, se muestran a continuación.

➤ Exploración:

Se debe pagar una cuota de alquiler de canon superficiario (*Fig. 43*). El canon será equivalente a un salario mínimo diario legal vigente (SMDLV) por hectárea/año, según el área y fase del proyecto de acuerdo con la escala. Para el 2019, 1 SMDLV en Colombia equivale a 27.604 COP o 8,37 USD aproximadamente.

NÚMERO DE HECTÁREAS NUMBER OF HECTARES	0 a 5 Años 0 - 5 Years	Más de 5 años hasta 8 Años 5 - 8 Years	Más de 8 años hasta 11 Años 8 - 11 Years
	SMDLV/ha* OMDW/ha*	SMDLV/ha* OMDW/ha*	SMDLV/ha* OMDW/ha*
0-150	0,5	0,75	1
151-5.000	0,75	1,25	2
5001-10.000	1,0	1,75	2

Figura 43. Valor del canon superficiario en Colombia para proyectos mineros según la Agencia Nacional de Minería (2018).

➤ Construcción y montaje:

Se continuará cancelando el valor equivalente al último canon pagado durante la etapa de exploración.

➤ Explotación:

Se debe pagar regalías como compensación económica por el derecho a explotar los recursos minerales. Las regalías se calculan como un porcentaje del valor de la producción minera calculada en boca de mina. La liquidación de las regalías se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$V = C \times P \times R$$

V = Valor de la regalía a pagar

C = Cantidad del mineral explotado (boca de mina)

P = Precio base del mineral

R = Porcentaje de Regalía



El precio base se establece según el mineral y si es o no es producto de exportación, y en todos los casos está referido a boca de mina o centro de acopio. En general, para minerales de exportación se toma el precio FOB puerto colombiano ponderado en el período de liquidación (tres o seis meses), descontando los costos de transporte, manejo y portuarios.

El porcentaje a pagar en regalías en el país depende directamente del mineral explotado, para las esmeraldas; se establece que corresponde al 1,5% (Fig. 44). En Colombia cerca de \$3 millones USD de regalías son generadas anualmente por el sector esmeraldífero.

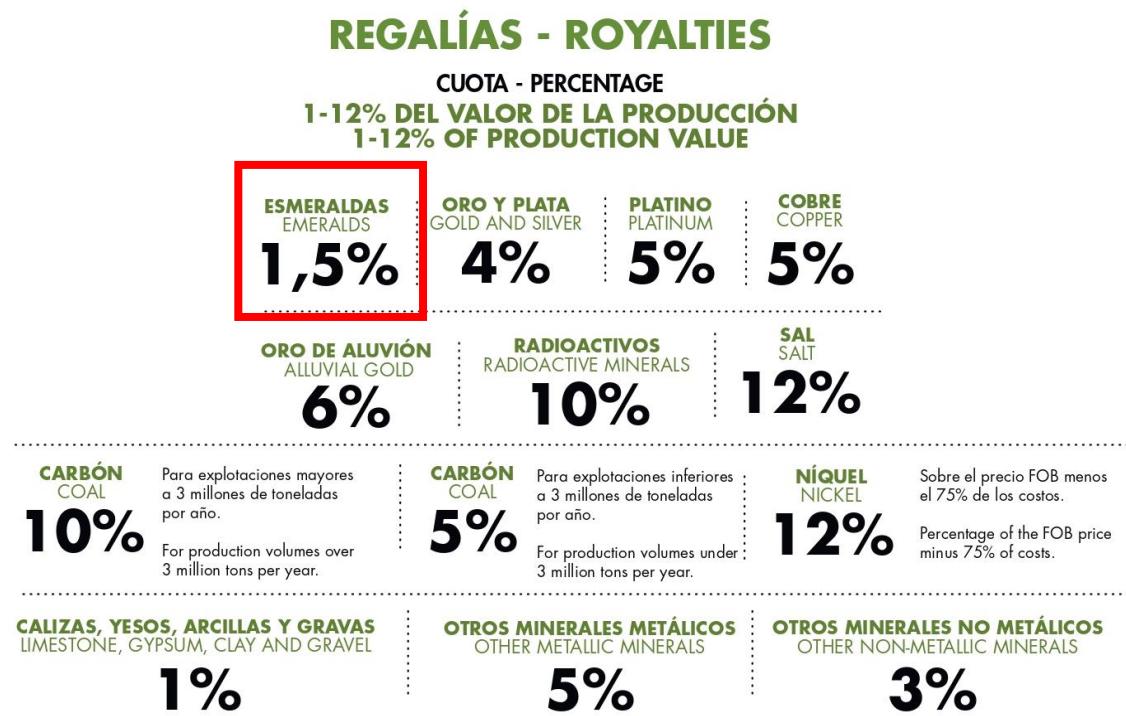


Figura 44. Porcentaje de regalía para un proyecto de esmeraldas en Colombia. Tomado de Agencia Nacional de Minería (2018).



9.6 INCENTIVOS FISCALES

Los incentivos fiscales son los estímulos en forma de bonificaciones que otorga el Gobierno nacional en los pagos de ciertas obligaciones tributarias y que se conceden para promover la actividad minera en el país. Estos incentivos aplican para proyectos mineros de esmeraldas en el país y son los siguientes:

- A la Inversión extranjera en minería otorgando un Certificado de Reembolso Tributario (CERT) a las empresas que incrementen las inversiones en exploración minera, el cual corresponderá a un porcentaje del valor del incremento. El valor del CERT constituirá un ingreso no constitutivo de renta ni ganancia ocasional para quien lo percibe o adquiere y podrá ser utilizado para el pago de impuestos (Ley 1819 de 2016, Art. 365).
- A la Importación de maquinaria en donde el valor del impuesto sobre las ventas pagado por la adquisición o importación de maquinaria pesada para industrias básicas, podrá descontarse del impuesto sobre la renta (Art. 258-2 del Estatuto Tributario).
- A la Exploración minera en donde las inversiones en activos para evaluación y exploración de recursos naturales no renovables que se realicen entre el 1 de enero de 2017 y el 31 de diciembre de 2027, serán amortizables por el método de línea recta en un término de 5 años (Art. 143-1 del Estatuto Tributario, modificado por el Art. 86 de la Ley 1819 de 2016).
- A las Obras por impuestos que hace referencia a que las empresas en exploración y explotación de minerales podrán acogerse al mecanismo de pago de obras por impuestos, hasta por un 50% del valor de la renta, en municipios de las Zonas más Afectadas por el Conflicto Armado – ZOMAC, relacionado con el suministro de agua potable, alcantarillado, energía, salud pública, educación pública, construcción y/o reparación de infraestructura vial (Ley 1819 de 2016, Art. 238).
- A La Protección del medio ambiente que otorga un descuento del 25% en el impuesto de renta en las inversiones realizadas en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente, con acreditación de la autoridad ambiental (Ley 1819 de 2016, Art. 103).
- A la Investigación e innovación minera que otorga un descuento del 25% en el impuesto de renta, del valor invertido en proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación, con previa aprobación del Consejo Nacional de Beneficios Tributarios de Ciencia y Tecnología en Innovación (Ley 1819 de 2016, Art. 104).

9.7 COMISIÓN COLOMBIANA DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES

El Comité Internacional para el Reporte de Recursos y Reservas (CRIRSCO), es un organismo reconocido a nivel mundial y avalado por el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) como la entidad que representa a la industria minera en los asuntos relacionados con la clasificación y reporte de recursos y reservas minerales.

En el año 2018 Colombia ingresó al CRIRSCO y pasó a ser parte de los 12 países que lo integran, siendo el tercero en Latinoamérica luego de Chile y Brasil (Fig. 45).



Figura 45. Países miembros del CRIRSCO. Tomado de Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards –CRIRSCO- (2019).

Ante el Comité Internacional para el Reporte de Recursos y Reservas (CRIRSCO), existe una entidad sin ánimo de lucro que actúa como la Organización Nacional de Reportes Colombianos (NRO) denominada Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR). Fue creada en Bogotá el 6 de febrero del 2018 y entre sus funciones se encuentra registrar Personas Competentes (PC), aquellas que poseen las competencias, capacidades, habilidades y comportamiento ético para hacer reportes públicos y estimación de recursos-reservas minerales; y la de producir y ser responsable de mantener el Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (ECRR), de acuerdo con el modelo y los estándares CRIRSCO.



El ECRR establece los requerimientos mínimos, recomendaciones y directrices para el Reporte Público de los Resultados de Exploración y Estimación de Recursos y Reservas Minerales en Colombia. Estas definiciones contenidas en el ECRR son idénticas, o no materialmente diferentes de las definiciones que se usan en los otros países aceptados y reconocidos por el Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO), (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales, 2018).

La integración de Colombia al CRIRSCO favorece de gran manera a la minería nacional, aportando transparencia y capacidad técnica, además de abrir numerosas posibilidades para el país como la valoración de propiedades mineras, competitividad de los concesionarios dentro de la industria minera global, apalancamiento financiero, acceso al capital de riesgo, creación de valor en la industria minera con responsabilidad social y ambiental, planificación de proyectos mineros sostenibles, y reconocimiento de los profesionales nacionales a través de acuerdos de reciprocidad con países miembros del CRIRSCO.

Es por esto y al crecimiento en la Inversión Extranjera Directa (30 de junio 2019 llegó a \$1.334 millones USD y registró un aumento del 31% frente al primer semestre de 2018) que actualmente Colombia se encuentra en un escenario preparado para continuar promoviendo y ejecutando mejores prácticas mineras que sigan impulsando el desarrollo económico, social y ambiental del país, además de posicionarlo en la mira internacional para el desarrollo e inversión de proyectos mineros para el beneficio del sector.

9.8 DESARROLLO SOSTENIBLE

La minería en Colombia destaca e impulsa la economía del país, por lo que es importante que las compañías mineras adopten una filosofía de sostenibilidad como un objetivo principal dentro de su planeación estratégica a corto, mediano y largo plazo, teniendo criterios, políticas, estrategias, estudios e indicadores que sirvan de guía para alcanzar el desarrollo sostenible en donde es prioritario la componente social, ambiental y económica.

Una minería sostenible es una actividad que tiene una continuidad en el tiempo, logrando una inserción adecuada en el desarrollo general y entendiéndose satisfactoriamente con otras actividades económicas en su área de influencia geográfica para su impulso. Además, implica el respeto por el medio ambiente, la dignidad de sus trabajadores y la dignidad de las poblaciones originarias del área tanto en las etapas iniciales del proyecto como en las finales,



garantizando las necesidades actuales de la sociedad, sin poner en riesgo la de las futuras generaciones, Oyarzún y Roberto (2011, en Pachón 2014).

La minería bajo una política de desarrollo sostenible, promovida por el Estado y ejecutada por las empresas es un escenario ideal para la continuidad del desarrollo como concepto significativo de sostenibilidad, entendido como una razonable flexibilidad en el uso de los recursos, preservando aquellos fundamentales para la vida de la humanidad y creando formas diferentes de desarrollo para las poblaciones involucradas (Pachón, 2014).

Para seguir promoviendo y realizando minería sostenible en la zona de los proyectos esmeraldíferos, es necesario continuar con la legalización y formalización de la actividad que genera un impacto positivo en las áreas de influencia, permitiendo la disminución notable de las afectaciones ambientales que pueda acarrear la actividad y la mejora de las condiciones socio-económicas en el sector. Estas condiciones han ido mejorando en los últimos años y se ven reflejadas en la actualidad en proyectos con un adecuado manejo de aguas, residuos y escombreras, además de relaciones contractuales formales con todas las prestaciones sociales a los trabajadores.

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) declaró 10 principios de la minería responsable que sirven como guía a las empresas mineras que estén actualmente operando o quieran incursionar en Colombia, así como de los países en busca de este objetivo. Estos principios fueron establecidos en mayo de 2003 y responden a los desafíos clave identificados por el programa de cambio denominado Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable (*Fig. 46*).

En Colombia, para el desarrollo de proyectos mineros se pueden tomar como base estos principios y aplicarlos para la consecución de una minería sustentable. La totalidad de estos principios son aplicables a la minería de esmeraldas y según la International Council on Mining and Metals (2015), estos principios son:

1. Implementar y mantener prácticas éticas de negocios y sistemas sólidos de gobierno corporativo y transparencia para respaldar el desarrollo sostenible.
2. Integrar los temas de desarrollo sustentable a la estrategia y el proceso de toma de decisiones de la empresa.
3. Apoyar los derechos humanos fundamentales y el respeto por culturas, costumbres y valores, en la relación con los empleados y grupos afectados por nuestras actividades.

4. Implementar estrategias de gestión de riesgo basadas en información válida y una sólida base científica, y que tengan en cuenta las percepciones de las partes interesadas en relación con los riesgos.
5. Buscar el mejoramiento continuo del desempeño en salud y seguridad con el objetivo último de lograr la ausencia total de daños.
6. Buscar el mejoramiento continuo del desempeño ambiental, por ejemplo, en el ámbito de la gestión del agua, el consumo de energía y el cambio climático.
7. Contribuir a la conservación de la biodiversidad y a enfoques integrados de planificación territorial.
8. Facilitar y estimular el diseño, uso, reutilización, reciclaje y disposición responsables de nuestros productos que contengan metales y minerales.
9. Contribuir al desarrollo social, económico e institucional de las comunidades situadas en nuestras áreas de operación.
10. Implementar con las partes interesadas mecanismos de información, comunicación y participación que sean efectivos, transparentes y verificables.



Figura 46. Principios de la minería responsable del ICMM, en su totalidad aplicables a la minería de esmeraldas. Tomado de International Council on Mining and Metals (2015).



10. PROYECCIÓN ECONÓMICA DE LA MINERÍA DE ESMERALDAS EN COLOMBIA

Las proyecciones que se presentan a continuación y que comprenden desde la actualidad hasta el año 2035 considerando tres modelos (continuidad, coexistencia, divergencia) para los cuales se plantean argumentos hipotéticos que dan valor a cada una de las proyecciones, fueron elaboradas por la Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (2018), utilizando datos de la Agencia Nacional de Minería (ANM) y modificadas por el autor (*Fig. 47 y 48*).

10.1 PROYECCIÓN PARA LA OFERTA

En el modelo de continuidad se considera:

- La prolongación en la explotación de la mayoría de los recursos esmeraldífero a través de métodos artesanales y con baja tecnificación.
- No ingreso de nuevas empresas tecnificadas.
- La trazabilidad y el seguimiento a la explotación de esmeraldas, siga siendo un reto para la institucionalidad minera.
- Presiones por parte de comunidades para impedir la continuidad en la explotación del recurso por parte de empresas no locales y/o multinacionales.
- No explotación de nuevas zonas.
- Tendencia de decrecimiento en producción esmeraldífera a corto (CP), mediano (MP) y largo plazo (LP), alcanzando cifras por debajo de 1,5 millones de quilates para el 2035.

En el modelo de coexistencia se considera:

- Tendencia al crecimiento en la producción a corto (CP) y mediano plazo (MP) alcanzando alrededor de 4 millones de quilates en 2028, y posteriormente un decrecimiento gradual a largo plazo (LP).
- Continuación en la operación de empresas tecnificadas como Fura Gems Inc. y Minería Texas Colombia S.A que aportarían gran capacidad de producción.
- Llegada al territorio nacional de nuevas empresas tecnificadas y con buenas prácticas que permiten el desarrollo y descubrimiento de nuevos recursos esmeraldíferos.

- Localización de nuevas zonas potenciales para el desarrollo de nuevos proyectos mineros.
- Aceptación por parte de las comunidades a inversionistas extranjeros y al desarrollo de proyectos mineros en sus territorios.

En el modelo de la divergencia:

- Tendencia al decrecimiento en la producción en el corto (CP), mediano (MD) y largo plazo (LP) alcanzando cifras inferiores a 900 mil quilates para el 2035.
- Disminución en la tecnificación de las minas y falta de información geológica para búsqueda de recursos esmeraldíferos.
- No descubrimiento de nuevos depósitos y agotamiento de los actuales, aumentando costos de extracción.
- Salida de multinacionales actuales por agotamiento del recurso.
- Falta de inversión e incursión extranjera y/o nacional en los depósitos esmeraldíferos.

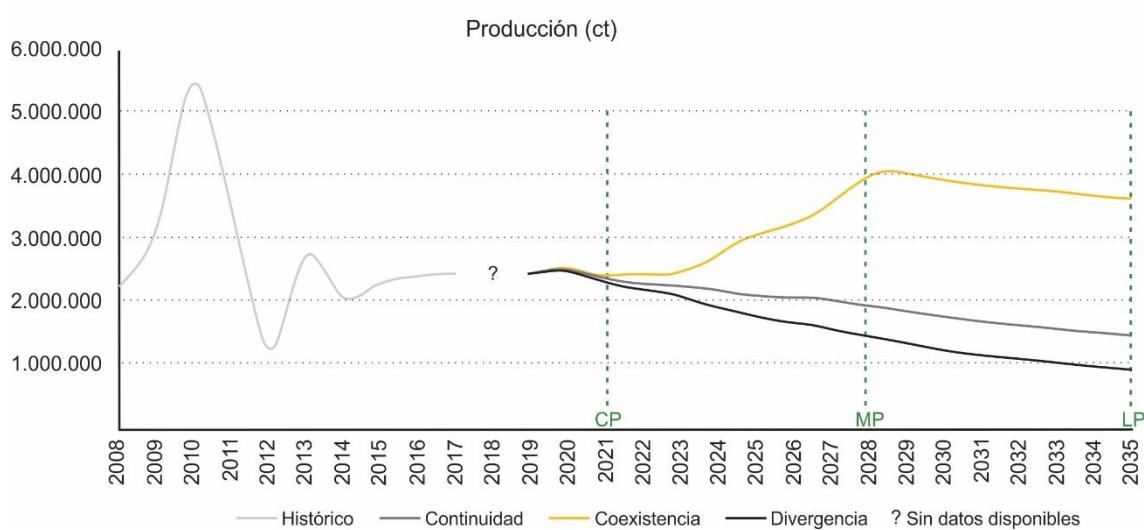


Figura 47. Proyección de oferta de esmeraldas en Colombia desde la actualidad hasta 2035, teniendo en cuenta modelo de continuidad, coexistencia y divergencia. Tomado de Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (2018) y modificado por autor.

**UBA**

Universidad de Buenos Aires

Argentina *virtus robur et studium**Especialización en Geología Minera*
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

A criterio del autor de este TFI, de los modelos planteados anteriormente para la proyección de oferta de esmeraldas en Colombia, el modelo de coexistencia sería el escenario más probable a suceder a corto, mediano y largo plazo. Lo anterior, si se tiene en cuenta el ascenso progresivo de la producción a partir del año 2014, impulsado por la incursión de nuevas empresas mineras al país que han brindado gran capacidad de producción y que aumentará cuando proyectos como en Coscuez (Fura Gems Inc.), pasen a etapa de explotación. Además, el modelo de coexistencia es respaldado por el aumento en la Inversión Extranjera Directa (IED) en el sector minero y en las oportunidades dadas por parte del gobierno nacional, que ha creado un adecuado escenario para el desarrollo de proyectos esmeraldíferos en el país.

10.2 PROYECCIÓN PARA LA DEMANDA

Más del 95% de la producción de esmeraldas se exporta, por lo que el comportamiento de las exportaciones es muy cercano al comportamiento de las producciones. Lo anterior, para los tres modelos (continuidad, coexistencia, divergencia) y sumado a lo siguiente.

En el modelo de continuidad se considera:

- Tendencia competitiva en el mercado internacional producto de la alta calidad de las gemas y características únicas.

En el modelo de coexistencia se considera:

- Aumento mundial en la demanda de joyería de lujo.
- Prestigio en las esmeraldas de Colombia, dando mayor posicionamiento en el mercado exterior.

En el modelo de la divergencia:

- Producción de esmeraldas en países sin tradición en el sector como Etiopía.
- Aumento en la calidad y cantidad de producción de esmeraldas sintéticas.

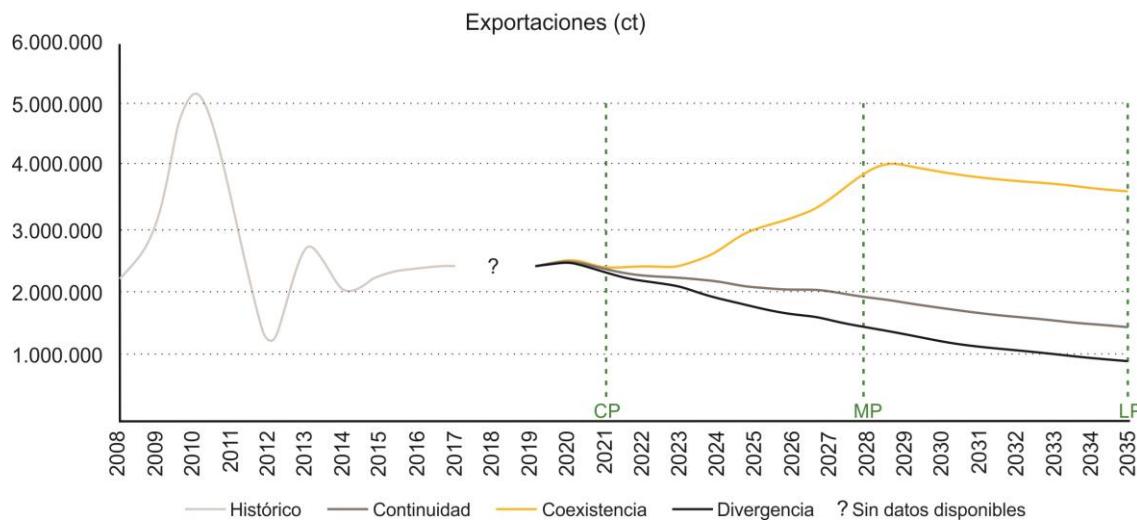


Figura 48. Proyección de demanda de esmeraldas en Colombia desde la actualidad hasta 2035, teniendo en cuenta modelo de continuidad, coexistencia y divergencia. Tomado de Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia (2018) y modificado por autor.

La proyección de demanda de esmeraldas en Colombia es muy similar a la proyección de oferta (si se tiene en cuenta que más del 95% de la producción se exporta actualmente). Si se mantiene esta relación oferta-demanda y se mejora el posicionamiento de las esmeraldas colombianas en el mercado, el escenario más probable para la proyección de demanda sería también el modelo de coexistencia.



11. CONCLUSIONES

- Las esmeraldas en Colombia constituyen un recurso de gran importancia tanto geológicamente por la singularidad en los procesos de formación, como económico.
- Las mineralizaciones de esmeraldas en los depósitos colombianos se generaron a presiones y temperaturas más bajas que las de los demás depósitos en el mundo. Sus edades de formación (Cinturón Esmeraldífero Occidental: 38 a 32 ± 2 Ma y Cinturón Esmeraldífero Oriental: 65 ± 3 Ma), son mucho más recientes comparadas con la de los yacimientos reconocidos a nivel mundial (Carnaíba en Brasil: 2 Ga). Estas dos condiciones diferenciales hacen de estos depósitos uno de los ejemplos de mineralización de esmeraldas de mayor interés mundial.
- Las inclusiones fluidas en las esmeraldas de Colombia han permitido determinar la alta salinidad de los fluidos mineralizantes (NaCl) 30% - (CaCl_2) 15% y asociar estos depósitos a procesos hidrotermales sin influencia magmática, relacionados a salmueras provenientes de evaporitas que se encontraban en la cuenca sedimentaria e interactuaron con rocas lutíticas carbonosas que liberaron Cr, V, y Be. Los valores de isótopos de azufre realizados a piritas sincrónicas con la mineralización de esmeralda que se encuentran entre $14,8\text{\textperthousand} < \delta^{34}\text{S} < 19,4\text{\textperthousand}$ refuerzan la hipótesis de que no existe relación con fuentes magmáticas.
- Para la prospección y exploración de esmeraldas en Colombia surgen como favorables áreas dentro de la subprovincia metalogénica Guavio-Muzo, en las formaciones geológicas Muzo (Hauteriviano-Barremiano) y Rosablanca (Valanginiano) para el Cinturón Esmeraldífero Occidental (CEO), y las formaciones Santa Rosa (Berriasiano) y Chivor (Berriasiano) en el Cinturón Esmeraldífero Oriental (CEOR). Además, se debe tener en cuenta rasgos estructurales con orientación NE, guías geoquímicas como las concentraciones de sodio y potasio, y geofísicas con valores bajos de resistividad.



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

- La minería en Colombia ha ido creciendo en los últimos años gracias a numerosos esfuerzos por parte del gobierno nacional, entidades y profesionales del sector; es en la actualidad un excelente escenario para la inversión y desarrollo de nuevos proyectos mineros que permitan continuar con el beneficio y progreso de la industria, entre ellos los proyectos de esmeraldas que generan regalías anuales cercanas a los \$3 millones USD y se calcula que continúen en aumento debido a la evolución del sector, que contribuye directamente al desarrollo de las comunidades de influencia y del país en general.

- Los proyectos mineros relacionados con esmeraldas tienen en Colombia un gran potencial a corto, mediano y largo plazo, debido tanto a la evolución en el entendimiento de la génesis y emplazamiento de los depósitos como al mejoramiento en las prácticas de operación, que permiten la extracción de manera segura y controlada, y la posibilidad de evaluar los recursos y reservas en el territorio con estándares internacionales.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con estudios detallados de parámetros estructurales, geoquímicos y geofísicos característicos en la mineralización de esmeraldas, para obtener más guías de prospección y exploración de estos recursos minerales en el país.
- Se recomienda realizar estudios relacionados a la medición de recursos y reservas de esmeraldas en el país, para consolidar un estándar en la estimación de recursos esmeraldíferos con ayuda de todas las entidades relacionadas al sector y de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Mineras (CCRR).
- Se recomienda continuar con los procesos de tecnificación de las minas que permiten la explotación responsable del recurso y la inclusión de profesionales en las distintas áreas, para el desarrollo de una minería con estándares internacionales.



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

AGRADECIMIENTOS

Quiero brindar los más sinceros agradecimientos a:

La Universidad de Buenos Aires por permitirme ser parte de tan reconocida alma máter.

La Dra. Liliana Castro y el Dr. Carlos Herrmann por sus enseñanzas y orientación durante el desarrollo del posgrado.

A cada uno de los docentes y compañeros de la carrera de Especialización en Geología Minera, quienes aportaron en el crecimiento de mi formación personal y profesional.

A mi esposa Paola Fernández por su apoyo incondicional.

A mi familia y amigos por estar siempre presentes.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, J., Velandia, F., Osorio, J., Lonergan, L., y Mora, H. 2007. Strike-slip deformation within the Colombian Andes. Geological Society, Vol. 272: 303- 319, London.

Agencia Nacional de Minería. 2018. Explorando oportunidades. [En línea]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/cartilla_anm_2018_pqpliego.pdf

Artesanías Colombianas. 2019. Esmeraldas Colombianas. [En línea]. Disponible en: <https://www.artesaniascolombianas.online/esmeraldas-colombianas/>

Bateman, A. 1942. Yacimientos Minerales de Rendimiento Económico. Amoros. Barcelona.

Branquet, Y., Cheillett, A., Cobbold, P., Baby, P., Laumonier, B. y Giuliani, G. 1999a. Andean transpressive tectonics at the eastern edge of the Cordillera Oriental, Colombia (Chivor-Guavio area). Georg-August University: 103-105, Göttingen.

Branquet, Y., Laumonier, B., Cheillett, A. y Giuliani, G. 1999b. Emeralds in the Eastern Cordillera of Colombia: Two tectonic settings for one mineralization. Geology Vol. 27, Nº7: 597-600, Nancy.

Branquet, Y., Giuliani, G., Cheillett, A., y Laumonier, B. 2015. Colombian emeralds and evaporites: tectono-stratigraphic significance of a regional emerald-bearing evaporitic breccia level. Proceedings 13th SGA bienal Meeting, Vol. 4: 1291- 1294, Nancy.

Cediel, F., Shaw, R. y Cáceres, C. 2003. Tectonic assembly of the Northern Andean block. In: Bartolini, C., Buffer, R., Blickwede, J. The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: hydrocarbon hábitats, basin formation and plate tectonics. American Association of Petroleum Geologists Memoir 79: 815-848.

Cediel, F. y Ojeda, G. 2011. Petroleum Geology of Colombia: Geology and hydrocarbon potencial regional geology of Colombia. Agencia Nacional de Hidrocarburos, Fondo editorial Universidad EAFIT, Vol. 9: 1-154, Medellín.



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. 2017. Avances sobre el estudio de parámetros relacionados con el origen de esmeraldas colombianas. 18p., Bogotá.

Centro de Desarrollo Tecnológico de la Esmeralda Colombiana. 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.gemlabcdtec.com/home/es>

Cheilertz, A., Féraud, G., Giuliani, G. y Rodríguez, C. 1991. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser-probe dating of the Colombian emerald deposits: Metallogenetic implications. Society for Geology applied to Mineral Deposits: 373-376, Rotterdam.

Cheilertz, A., Féraud, G., Giuliani, G. y Rodríguez, C. 1994. Time pressure-temperature constraints on the formation of colombian Emeralds: An $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe and fluid inclusion study. Economic Geology, Vol. 89: 361- 380.

Cheilertz, A., Giuliani, G., Zimmerman, J. y Ribeiro-Althoff, A. 1995. Ages, geochemical signatures and origin of Brazilian and Colombian emerald deposits: A magmatic versus sedimentary model. Mineral Deposits: 569-572, Rotterdam.

Cheilertz, A. y Giuliani, G. 1996. The genesis of Colombian emeralds: a restatement. Mineralium Deposita, Vol. 31: 359-364.

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales. 2018. Estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales -ECRR-. 84p., Bogotá.

Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards - CRIRSCO-. 2019. [En línea]. Disponible en: <http://www.crirsco.com/welcome.asp>

Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A., y Taborda, A. 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. Boletín American Association of Petroleum Geologists, Vol. 79, Nº 10: 1421-1443, Bogotá.



UBA

Universidad de Buenos Aires
Argentina *virtus robur et studium*

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Cortés, M., Angelier, J. y Colleta, B. 2005. Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region. *Tectonics*, Vol. 24, Nº 1, 27p.

Emerald Explorers Group. Sin fecha. Herramientas geológicas y geoquímicas para la exploración de esmeraldas en Colombia. 44p. [En línea]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/herramientas_geologicas_esmeraldas_g_nino.pdf

Esmeraldas Santa Rosa S.A. 2019. Galería. [En línea]. Disponible en: <https://www.esmeraldassantarosa.com/index.html>

Evans, A. 1980. An Introduction to Ore Geology. Elsevier, 231p., New York.

Federación Nacional de Esmeraldas de Colombia. 2015. Estudio de caracterización del sector esmeraldero, así como de la cadena productiva colombiana de la esmeralda y joyería. Informe trabajo de campo, 161p., Bogotá.

Fura Gems Inc. 2018. Initial Production of Emeralds and Commencement of Bulk Sampling Program at the Coscuez Emerald Mine. 8p., Toronto. [En línea]. Disponible en: http://www.furagems.com/pdf/announcements/2018/20180321_Bulk_Sampling_Commences.pdf

Garcés, H. 1995. Geología económica de los yacimientos minerales de Colombia. Ediciones Rojo, Vol. 1, 388p., Medellín.

Giuliani, G., Cheilertz, A., Dubessy, J. y Rodriguez, C. 1990 a. Chemical composition of fluid inclusión in Colombia emerald deposits. Proceedings of the Eight Quadriennal IAGOD Symposium: 159-168, Ottawa.

Giuliani, G., Cheilertz, A. y Rodriguez, C. 1990 b. Emerald deposits from Colombia: Chemical composition of fluid inclusions and origin. Proceedings of the Eight Quadriennal IAGOD Symposium: 12-18, Ottawa.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Giuliani, G., Cheillett, A. y Rodriguez, C. 1990 c. New metallogenetic data on the emerald deposits of Colombia. Proceedings of the Eight Quadriennal IAGOD Symposium: 185-186, Ottawa.

Giuliani, G., Cheillett, A., Dubessy, J. y Rodriguez, C. 1991. H_2O -NaCl-CaCl₂-bearing fluids in emeralds from the Vega San Juan mine, Gachala district, Colombia. Plinius, Nº 5: 90.

Giuliani, G., Cheillett, A., Shepperd., S. y Arboleda,C. 1993. Geochemistry and origin of emerald deposits of Colombia. Second Biennial SGA Meeting: 105-108, Granada.

Giuliani, G., Cheillett, A., Arboleda, C., Carrillo, V., Rueda, F. y Baker, J. 1995 a. An Evaporitic Origin of the Parent brines of Colombian Emeralds: Fluid inclusion and sulphur isotope evidence. European Journal of Mineralogy, Vol. 7: 151-165, Stuttgart.

Giuliani, G., Cheillett, A., Rueda, F., Féraud, G. y France-Lanord, C. 1995 b. The genesis of the Colombian emerald deposits: An unique example of beryllium mineralization developed in a black shale environment. Mineral Deposits: 943- 946, Rotterdam.

Giuliani, G., Cheillett, A., Arboleda, C., Rueda, F., Carrillo, V. y Sheppard, S.M.F. 1999. Geoquímica y origen de los depósitos de esmeraldas en Colombia. Boletín de Geología, Vol. 21, Nº 36: 7-13, Bucaramanga.

Giuliani, G., Groat, L., Marshall, D., Fallick, A. y Branquet, Y. 2019. Emerald deposits: A review and enhanced classification. Minerals, Vol. 9, Nº 2, 105p.

Gómez, E., Jordan, T., Allmendiger, R., Hegarty, K., Kelley, S. y Heizler, M. 2003. Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Geological Society of America Bulletin, Vol. 115, Nº 2: 131-147.

Hall, M. 1976. Publicado en 1993. Mineralogía y geoquímica de las vetas esmeraldíferas de Muzo, departamento de Boyacá con implicaciones en la prospección futura de esmeraldas en otras partes de Colombia. Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia, Vol. 13, 326p.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Hurlbut, C. y Klein, C., 1984. Manual de Mineralogía. Editorial Reverté S.A, Nº 4, 678p., Madrid.

Ingeominas y Mora, A. 2005. Levantamiento de información estratigráfica y estructural de los Cinturones Esmeraldíferos de la Cordillera Oriental. Ingeominas, 152p., Bogotá.

International Council on Mining and Metals. 2015. Los 10 principios del ICMM. [En línea]. Disponible en: <https://www.icmm.com/es>

Kubaczka, P. 2019. Gemas. Seminario de carrera de Especialización en Geología Minera. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Luengas, C., Prieto, D., Velásquez, L., López, J., Sepúlveda, J., Celada, C., Prieto, G. y Montaña, Y. 2017. Mapa de depósitos y ocurrencias minerales grupo I: Metales preciosos y gemas (Au, Ag, Pt, Esmeraldas, Corindón); Provincias metalogénicas. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

Mantilla, L., Silva, A., Serrano, J., Conde, J., Gómez, C., Ramírez, J., Meza, J., Pelayo, Y., Ortega, L., Plata, L. y Peña, E. 2007. Investigación petrográfica y geoquímica de las sedimentitas del Cretácico inferior (K1) y sus manifestaciones hidrotermales asociadas; planchas 169, 170, 189, 190 (Cordillera Oriental): implicaciones en la búsqueda de esmeraldas. Ingeominas, 330p., Bogotá.

Mendoza, J. 1996. Anotaciones geoquímicas para exploración de esmeraldas en la región Muzo-Coscuez con base en la relación Na/K y elementos traza. Geología Colombiana, Vol. 21: 89-98, Bogotá.

Minería Texas Colombia S.A. 2017. Reporte de sostenibilidad. 154p. [En línea]. Disponible en: <http://www.mtcol.com/>

Ministerio de Minas y Energía. 2001. Código de Minas. 40p., Bogotá.

Mulligan, R. 1968. Geology of Canadian Beryllium Deposits. Geological Survey of Canada, Nº 23, 109p., Ottawa.



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Ochoa, L. 2003. Evaluación magnetométrica, radiométrica y geoeléctrica de depósitos esmeraldíferos. *Earth Sciences Research Journal*, Vol. 7: 13-18, Bogotá.

Oppenheim, V. 1948. The Muzo emerald zone, Colombia. *Economic Geology*, Vol. 43, Nº 1: 31-38.

Pachón, C. 2014. Minería Sostenible, el reto. *Ensayo*, Universidad Militar Nueva Granada, 23p., Bogotá.

Petroscheck, W. 1965. Typical features of metallogenic provinces. *Economic Geology*, Vol. 60, Nº 8: 1620-1634.

Pignatelli, I., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Agrosí, G., Mathieu, S., Morlot, C. y Branquet, Y. 2015. Colombian trapiche emeraldas: Recent advances in understanding their formation. *Gems and Gemology*, Vol. 51, Nº 3: 222-259.

Recio, C. y Zubías, I. 2007. Two words about Emerald. En: Seminario Geoquímica de isótopos estables aplicada al estudio de yacimientos minerales. Universidad Industrial de Santander, 170p., Bucaramanga.

Romero, F., Schultz-Güttler, R. y Kawashita, K. 2000. Geoquímica del Rubidio-Estroncio y edad de las esmeraldas colombianas. *Geología Colombiana*, Vol. 25: 221-239, Bogotá.

Salinas, R., Rodríguez, C., Lozano, H., Mendoza, H. y Solano, F. 1999. Mapa metalogénico de Colombia: Memoria explicativa. Ingeominas, 143p., Bogotá.

Schwarz, D., Giuliani, G., Grundmann, G. y Glas, M. 2002. The origin of Emerald- A controversial topic. *ExtraLapis English*, Nº 2: 18-21, East Hampton.

Semana. 2017. Así es dirigir la mina de esmeraldas más importante de Colombia. [En línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/esmeraldas-historias-por-contar-/articulo/como-se-dirige-la-mina-esmeraldas-mas-importante-de-colombia/538741>



UBA

Universidad de Buenos Aires

Argentina virtus robur et studium

Especialización en Geología Minera

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Smirnov, V. 1982. Geología de yacimientos minerales. Ed. Mir, 654p., Moscú.

Terraza, R. y Montoya, D. 2011. Las esmeraldas de Colombia en su ámbito geológico. 14º Congreso latinoamericano de geología. Servicio Geológico Colombiano, 94p., Bogotá.

Terraza, R. 2019. Notas sobre el contexto tectonoestratigráfico de formación de las esmeraldas colombianas. Servicio Geológico Colombiano, Boletín Geológico Nº 45: 37-48, Bogotá.

Unidad de Planeación Minero-Energética de Colombia. 2018. Esmeraldas. Balance Nacional Minero 2012-2016. 28p., Bogotá.

United States Geological Survey. 2019. The mineral industry of Colombia, 2015. 8p. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/media/files/mineral-industry-colombia-2015-pdf>

Van der Hammen, T. 1958. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y Tectogénesis de los Andes Colombianos. Servicio Geológico Colombiano, Boletín Geológico, Vol. 6, Nº 1- 3: 60-116p, Bogotá.