



Anexo 4 – Minerales Estratégicos

Plan Nacional de Desarrollo Minero 2024 - 2035



Unidad de Planeación Minero Energética - UPME

Omar Andrés Camacho Morales
Ministro de Minas y Energía

Carlos Adrián Correa Flórez
Director General

Olga Tatiana Araque Mendoza
Subdirectora de Minería

Autores:

Cristian Fabián Mariño Miranda
Elisa Carrasco Rincón
Sergio Fernando Sánchez Delgado

ANEXO 4 – MINERALES ESTRATÉGICOS
PLAN NACIONAL DE DESARROLLO MINERO 2024 – 2035

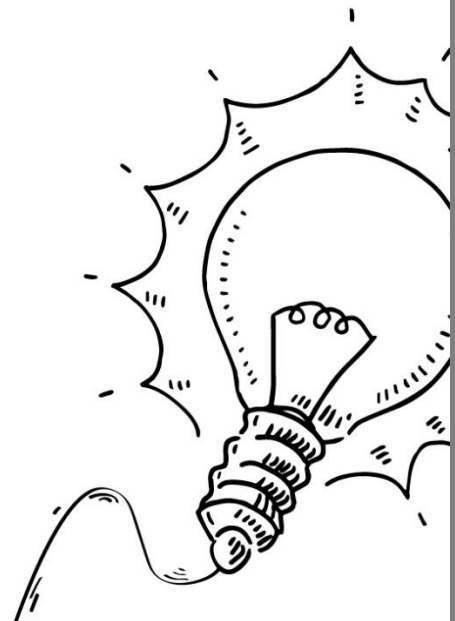


TABLA DE CONTENIDO

1	Minerales estratégicos para Colombia	5
2	Cobre (Cu)	6
2.1	Definición, potencial geológico y titulación del cobre	6
2.2	Usos, productos y procesos de beneficio del cobre	8
2.3	Producción y oferta de cobre	11
3	Níquel (Ni).....	12
3.1	Definición, potencial geológico y titulación del níquel	12
3.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para níquel.....	14
3.3	Producción y oferta de níquel	15
4	Zinc (Zn).....	16
4.1	Definición, potencial geológico y titulación del zinc.....	16
4.2	Usos, productos y procesos de beneficio del zinc.....	18
5	Metales del Grupo del Platino.....	20
5.1	Definición, potencial geológico y titulación de los metales del grupo del platino.....	20
5.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio de los metales del grupo del platino	23
5.3	Producción y oferta de metales del grupo del platino	24
6	Hierro (Fe).....	25
6.1	Definición, potencial geológico y titulación de minerales de hierro	25
6.2	Usos, productos y procesos de beneficio del hierro.....	27
6.3	Producción y oferta de hierro	28
7	Manganeso (Mn)	29
7.1	Definición, potencial geológico y titulación del manganeso	29
7.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el manganeso.....	30
8	Carbón metalúrgico	31
8.1	Definición, potencial geológico y titulación de carbón metalúrgico	31
8.2	Usos del carbón metalúrgico, coque y procesos de beneficio.....	32
8.3	Producción y oferta de carbón metalúrgico.....	34
9	Fosfatos (roca fosfórica y fosfática)	35
9.1	Definición, potencial geológico y titulación de los fosfatos.....	35
9.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para fosfatos.....	38
9.3	Producción y oferta de fosfatos	39
10	Minerales de Magnesio (Mg)	39
10.1	Definición, potencial geológico y titulación de minerales de Magnesio (Mg)	39
10.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el magnesio	42
10.3	Producción y oferta del magnesio.....	44
11	Bauxita y demás minerales de Aluminio	44
11.1	Definición, potencial geológico y titulación de la bauxita y demás minerales de aluminio.....	44
11.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio de bauxita	47

11.3	Producción y oferta de bauxita.....	48
12	Oro (Au).....	48
12.1	Definición, potencial geológico y titulación del oro	48
12.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el oro.....	52
12.3	Producción y oferta de oro	55
13	Esmeraldas	56
13.1	Definición, potencial geológico y titulación de esmeraldas.....	56
13.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio de las esmeraldas	58
13.3	Producción y oferta de esmeraldas	59
14	Materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas	60
14.1	Definición, potencial geológico y titulación de materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas.....	60
14.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio	61
14.3	Producción y oferta de materiales de construcción	63
15	Arenas silíceas, silicio (Si)	63
15.1	Definición, potencial geológico y titulación de arenas silíceas, silicio (Si).....	63
15.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio de arenas silíceas.....	66
15.3	Producción y oferta de arenas silíceas	68
16	Calizas	68
16.1	Definición, potencial geológico y titulación para calizas.....	68
16.2	Usos, productos y procesos de beneficio para obtención de cal, carbonato de calcio y clinker.....	69
16.3	Producción, oferta y demanda de calizas	71
17	Yeso	72
17.1	Definición, potencial geológico y titulación para el yeso.....	72
17.2	Usos, productos y procesos de beneficio del yeso	73
17.3	Producción y oferta de yeso	74
18	Cromo (Cr)	75
18.1	Definición, potencial geológico y titulación del cromo	75
18.2	Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el cromo.....	78
19	Referencias	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación de proyectos y prospección del cobre en Colombia (izquierda) y zonas prospectivas para depósitos de cobre en Colombia (derecha)	7
Figura 2.	Titulación para el cobre	8
Figura 3.	El cobre, sus procesos de beneficio y usos	9
Figura 4.	Procesos de extracción, procesamiento y manufactura del cobre	10
Figura 5.	Producción de Minerales de cobre y sus concentrados	11
Figura 6.	Depósitos, ocurrencias, mineralizaciones y zonas prospectivas de níquel en Colombia	13
Figura 7.	Titulación para el níquel	13
Figura 8.	Proceso de producción del ferroníquel en la mina Cerro Matoso, Colombia	15
Figura 9.	Volúmenes de producción de níquel asociado al pago de regalías	16
Figura 10.	Mapa de concentración de zinc en sedimentos	17
Figura 11.	Titulación para el zinc	18
Figura 12.	Proceso de beneficio del zinc	20
Figura 13.	Ocurrencias y depósitos de platino en Colombia	22
Figura 14.	Titulación para el grupo del platino	23
Figura 15.	Volúmenes de producción de níquel asociado al pago de regalías	25
Figura 16.	Depósitos y zonas prospectivas de hierro en Colombia	26
Figura 17.	Titulación para minerales de hierro y sus concentrados	26
Figura 18.	Proceso de beneficio de minerales de hierro hasta obtener <i>pellets</i>	27
Figura 19.	Volúmenes de explotación de hierro asociado al pago de regalías	28
Figura 20.	Titulación para el manganeso	30
Figura 21.	Recursos y reservas de carbón metalúrgico	32
Figura 22.	Titulación para el carbón metalúrgico	32
Figura 23.	Producción de carbón metalúrgico y coque para comercialización	33
Figura 24.	Producción de carbón metalúrgico	35
Figura 25.	Mapa de localización de zonas con potencial y ocurrencias de fosfatos	37
Figura 26.	Titulación para la roca fosfática	38
Figura 27.	Producción de roca fosfórica	39
Figura 28.	Depósitos, ocurrencias y zonas prospectivas para magnesio en Colombia	41
Figura 29.	Titulación para la magnesita	42
Figura 30.	Proceso de beneficio del magnesio	43
Figura 31.	Producción de magnesita y otros minerales de magnesio	44
Figura 32.	Depósitos, ocurrencias y zonas prospectivas para aluminio en Colombia	45
Figura 33.	Titulación para la bauxita	46
Figura 34.	Volúmenes de producción de bauxita asociado al pago de regalías	48
Figura 35.	Mapa con zonas potenciales para oro	50
Figura 36.	Mapa de concentración de oro en sedimentos	51
Figura 37.	Titulación para el oro	52
Figura 38.	Diagrama de procesos general de beneficio de oro en planta	53

Figura 39.	Diagrama de proceso de beneficio sugerido para la zona minera de Andes (Antioquia)	55
Figura 40.	Volúmenes de producción de oro asociado al pago de regalías	56
Figura 41.	Localización geográfica de los cinturones esmeraldíferos de la Cordillera Oriental de Colombia	57
Figura 42.	Titulación para la esmeralda	57
Figura 43.	Proceso de beneficio de la esmeralda	59
Figura 44.	Producción de esmeraldas sin tallar	59
Figura 45.	Titulación para materiales de construcción	61
Figura 46.	Proceso de beneficio general de los materiales de construcción	62
Figura 47.	Producción de arenas, gravas y cantos rodados, caolín y arcillas industriales	63
Figura 48.	Priorización de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas	65
Figura 49.	Titulación para las arenas silíceas	65
Figura 50.	Proceso de beneficio general de las arenas silíceas	67
Figura 51.	Volumen de explotación de arenas silíceas asociado al pago de regalías	68
Figura 52.	Titulación para la caliza	69
Figura 53.	Procesos de beneficio de la caliza para elaboración de cal, carbonato de calcio y clinker	71
Figura 54.	Volúmenes de explotación de calizas asociado al pago de regalías	72
Figura 55.	Titulación para el yeso	73
Figura 56.	Diagrama de flujo para producción de cemento, con base en caliza y yeso	74
Figura 57.	Volúmenes de explotación de yeso asociado al pago de regalías	75
Figura 58.	Sistema de fallas Cauca-Romeral con ofiolitas asociadas	76
Figura 59.	Concentración de cromo en sedimentos	77
Figura 60.	Titulación para el cromo	78
Figura 61.	Proceso de beneficio de minerales de Cromo	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Principales minerales de cobre y características	6
Tabla 2.	Principales minerales de níquel y sus características	12
Tabla 3.	Principales minerales de zinc y sus características	16
Tabla 4.	Principales minerales de platino, rutenio e iridio y sus características	21
Tabla 5.	Principales minerales de manganeso y sus características	29
Tabla 6.	Principales minerales de fósforo y sus características	36
Tabla 7.	Principales minerales de magnesio y sus características	40
Tabla 8.	Principales minerales de aluminio y sus características	45
Tabla 9.	Denominación de las principales aleaciones y minerales de oro	49
Tabla 10.	Clasificación de arenas, limos y arcillas según tamaño de grano y aplicación principal	60

1 Minerales estratégicos para Colombia

Según el documento de “Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia” un mineral estratégico es:

aquel que puede garantizar soberanía en el abastecimiento de la demanda interna actual o futura, asociada a los desarrollos industriales requeridos para soportar una transición energética gradual hacia fuentes de generación de energías limpias no convencionales y para el desarrollo de la infraestructura requerida para garantizar la industrialización de la economía y un sector minero productivo, competitivo y con la implementación de buenas prácticas técnicas, sociales y ambientales; de igual forma, lo son aquellos minerales necesarios para brindar seguridad alimentaria a los habitantes del territorio nacional, mayor disponibilidad y acceso mediante precios razonables, permitiendo reducciones en los costos de los fertilizantes y abonos agrícolas, y con ello el abaratamiento de los alimentos. Finalmente, resultan estratégicos los minerales priorizados para promover esquemas asociativos entre mineros tradicionales, ancestrales o en proceso de formalización, que permitan un aprovechamiento racional de los recursos minerales de propiedad del Estado y contribuyan a su formalización colectiva (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Teniendo esto en cuenta y en respuesta a las directrices de política pública del Gobierno nacional para el sector minero encontradas en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia Potencia Mundial de la Vida”, la Agencia Nacional de Minería actualizó el listado de minerales estratégicos para el país mediante la Resolución No. 1006 del 30 de noviembre de 2023 (Agencia Nacional de Minería, 2023), en la cual se designaron 17 grupos de minerales como son:

- Cobre (Cu) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Níquel (Ni) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Zinc (Zn) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Metales del Grupo del Platino [Platino (Pt), Paladio (Pd), Rutenio (Ru), Rodio (Rh), Osmio (Os) e Iridio (Ir)] y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Hierro (Fe) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Manganeso (Mn) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Carbón metalúrgico.
- Fosfatos [fosforita o roca fosfórica ($P_2O_5 > 20\%$) y roca fosfática ($P_2O_5 < 20\%$) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Minerales de Magnesio (Mg) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Bauxita y demás minerales de Aluminio, y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Oro (Au) y sus minerales asociados o concentrados.
- Esmeraldas y sus minerales asociados.
- Materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas.
- Arenas silíceas, Silicio (Si) y sus minerales asociados, derivados o concentrados.

- Caliza y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Yeso y sus minerales asociados, derivados o concentrados.
- Cromo y sus minerales asociados, derivados o concentrados.

Con estos 17 minerales o grupos de minerales identificados es necesario tener un conocimiento inicial de los mismos, por lo que a continuación se realizará un contexto general de cada uno de estos.

2 Cobre (Cu)

2.1 Definición, potencial geológico y titulación del cobre

El cobre es un metal rojizo, dúctil y maleable, conocido por ser uno de los mejores conductores eléctricos junto con la plata y el oro. Debido a estas propiedades, el cobre es ampliamente utilizado en la fabricación de cables y componentes eléctricos y electrónicos, además de formar parte de aleaciones con excelentes propiedades mecánicas como el bronce y el latón. En la naturaleza, el cobre puede encontrarse libre, como óxidos y frecuentemente como sulfuros, siendo un elemento calcófilo (British Geological Survey, 2007). Las principales menas de cobre en el país incluyen la calcopirita, calcosina y bornita (Servicio Geológico Colombiano, 2023), pero existen variedad de minerales, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales minerales de cobre y características

Nombre del mineral	Fórmula química	Contenido máximo de Cu (wt%)
Cobre nativo	Cu	100%
Calcosina	Cu ₂ S	79,9%
Cuprita	Cu ₂ O	88,8%
Covelina	CuS	66,4%
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63,3%
Malaquita	Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂	57,5%
Azurita	2CuCO ₃ -Cu(OH) ₂	55,3%
Antlerita	Cu ₃ SO ₄ (OH) ₄	53,7%
Enargita	Cu ₃ AsS ₄	49%
Crisocola	CuSiO ₃ -2H ₂ O	36,2%
Calcopirita	CuFeS ₂	34,6%

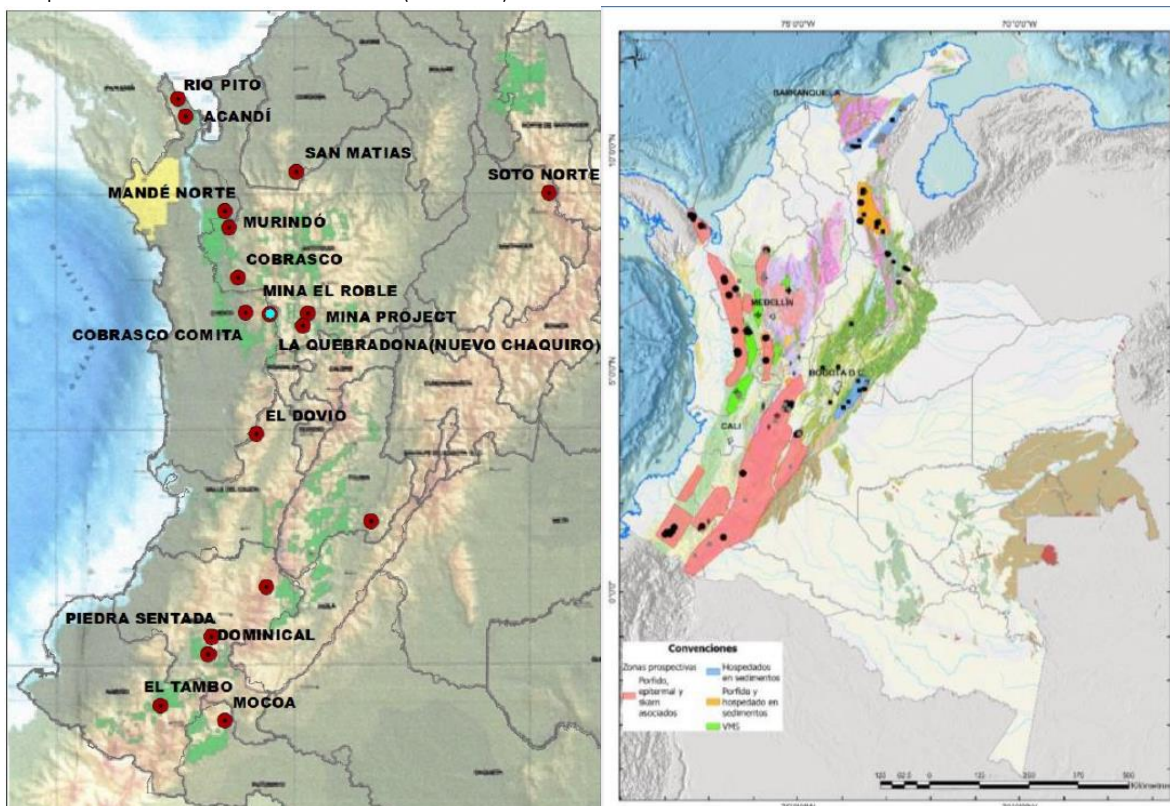
Fuente: modificado de British Geological Survey (2007)

Colombia cuenta con un notable potencial geológico para la explotación de cobre, gracias a su diversidad de formaciones geológicas con manifestaciones de este mineral que destacan la riqueza de su subsuelo. Se han identificado posibles pórfidos de este mineral en regiones como San Matías (Córdoba), Nuevo Chaquiro (Cauca Medio) y Mocoa (Putumayo). Además, el país alberga mineralizaciones epitermales en varias áreas geológicas como Soto Norte (Santander), y skarn de cobre y oro en lugares como Mina Vieja en Tolima. Los depósitos vulcanogénicos de sulfuros

masivos (VMS) en El Roble (Chocó), y los depósitos de óxidos de hierro con cobre y oro (IOCG) en El Alacrán (Córdoba) evidencian aún más la diversidad geológica que permite este tipo de ocurrencias y/o depósitos en el país, tal como se aprecia en la Figura 1 (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Este contexto geológico no solo es diverso, sino también estratégico para el desarrollo económico de Colombia, impulsado por la demanda global, especialmente en el de la transición energética en un momento en que el cobre se vuelve cada vez más esencial en el camino hacia las energías limpias y la expansión de infraestructuras eléctricas. La presencia de cobre en Colombia, en diferentes tipos de depósitos y regiones, subraya la importancia del país en el panorama minero global y su capacidad para contribuir de manera significativa a las industrias tecnológicas y energéticas (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Figura 1. Ubicación de proyectos y prospección del cobre en Colombia (izquierda) y zonas prospectivas para depósitos de cobre en Colombia (derecha)

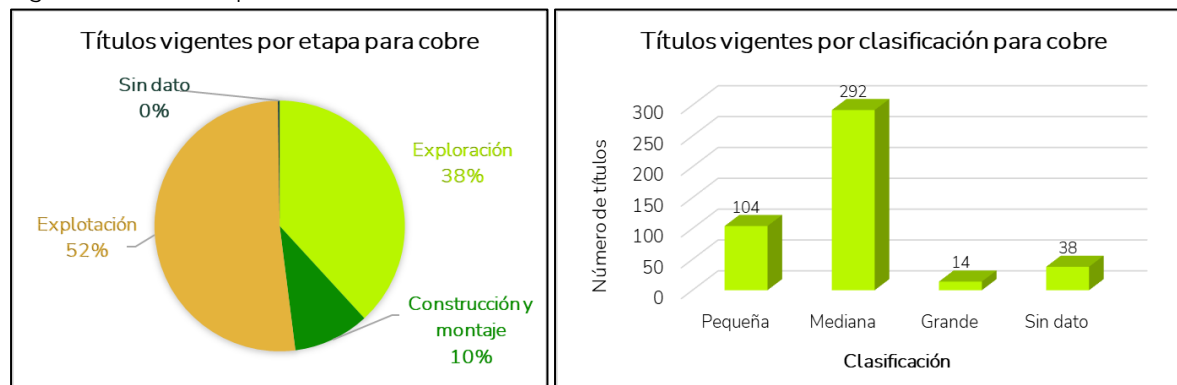


Fuente: izquierda (Subdirección de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, 2021); derecha: (Servicio Geológico Colombiano, 2022)

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, con datos actualizados al 31 de octubre de 2024, existen 448 títulos vigentes en Colombia que incluyen al cobre y sus concentrados como mineral principal, abarcando un total de 571.586 hectáreas. De estos títulos, 232 (52%) se encuentran en la etapa de explotación, 44 (10%) en la etapa de construcción y montaje, y 171 (38%) en la fase de exploración, como se ilustra en la Figura 2. La

mayoría de estos títulos se distribuyen en la mediana minería, representando el 65%, seguida de pequeña minería con 23%; mientras que 32 de los 38 títulos “sin dato” en su clasificación se encuentran en estado “terminado” o “en proceso de liquidación”.

Figura 2. Titulación para el cobre



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

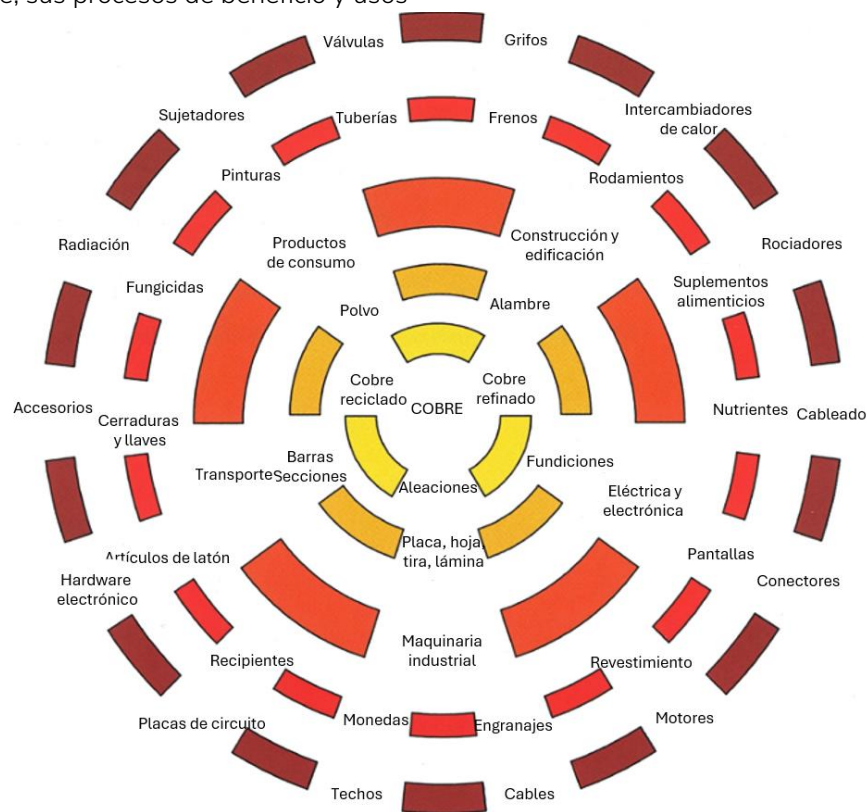
2.2 Usos, productos y procesos de beneficio del cobre

El cobre es un metal altamente versátil que encuentra aplicaciones en una amplia variedad de industrias debido a sus propiedades únicas, como su alta conductividad eléctrica y térmica, maleabilidad, ductilidad, resistencia a la corrosión y capacidad bactericida (Callister & Rethwisch, 2018). En la industria de transmisión y distribución de energía eléctrica, el cobre es fundamental para cables y componentes en redes eléctricas, motores, y transformadores, debido a su capacidad superior para conducir electricidad (International Copper Association, 2023). Además, en la industria eléctrica y electrónica, se utiliza en la fabricación de cables y alambres eléctricos, así como en componentes electrónicos como circuitos impresos, donde su excelente conductividad y eficiencia en la transmisión de electricidad son cruciales (Hunt & Ryans, 2019). En el sector de la construcción, el cobre es utilizado en sistemas de plomería, techos, fachadas, y cableado, donde su durabilidad y resistencia a la corrosión son altamente valoradas, y en sistemas de calefacción y refrigeración (Copper Development Association, 2023). Además, en la industria del transporte, este mineral es esencial en los sistemas eléctricos de automóviles, trenes y aviones, así como en radiadores y frenos, siendo particularmente significativo en los vehículos eléctricos, que requieren grandes cantidades de cobre para baterías y motores eléctricos.

El cobre también juega un papel importante en la fabricación de monedas y en la industria energética, donde se utiliza en generadores, transformadores, y en la construcción de paneles solares y sistemas de energía eólica, gracias a su capacidad para transferir energía de manera eficiente (International Copper Association, 2023). En el ámbito médico, se utiliza en superficies de hospitales y dispositivos médicos por sus propiedades antimicrobianas que ayudan a reducir la propagación de infecciones (Callister & Rethwisch, 2018). Además, en la tecnología de la información, el cobre sigue siendo crucial en cables de telecomunicaciones y en la producción de microchips y semiconductores, donde su capacidad para minimizar la pérdida de señal es esencial.

(Copper Development Association, 2023). Finalmente, en la agricultura, el cobre se utiliza en fungicidas y es un micronutriente esencial para el crecimiento de plantas y la producción animal (Hunt & Ryans, 2019). También se encuentra en una amplia variedad de bienes de consumo, como electrodomésticos y sistemas de calefacción y refrigeración, donde su excelente conductividad térmica es indispensable para la disipación de calor. Algunos de estos elementos y otros se pueden observar en la Figura 3

Figura 3. El cobre, sus procesos de beneficio y usos



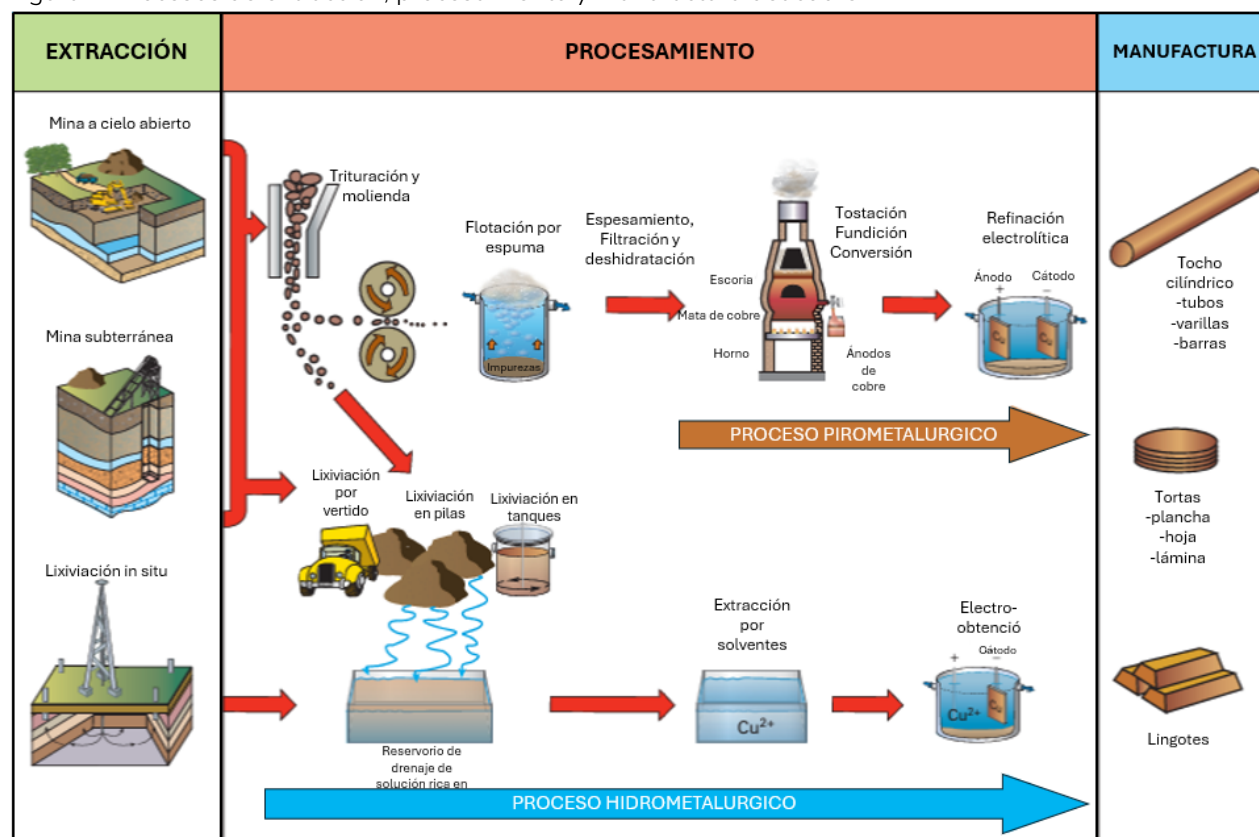
Fuente: tomado y modificado de (Michel, 2013)

2.2.1 Proceso de beneficio del cobre

El proceso de beneficio del cobre es complejo e involucra varias etapas clave, comenzando con la extracción del mineral, que puede realizarse en minas a cielo abierto o subterráneas. Una vez extraído, el mineral se tritura y muele para reducirlo a partículas finas, facilitando su separación de otros materiales. La **flotación por espuma** es uno de los métodos más comunes para concentrar, donde se utilizan productos químicos y aire para hacer flotar las partículas de cobre, separándolas de la ganga. Alternativamente, la **concentración gravitacional** puede ser utilizada en casos específicos donde las diferencias de densidad entre los minerales son significativas. Para minerales de baja ley o difíciles de tratar, se emplean métodos hidrometalúrgicos como la **lixiviación en pilas**, donde una solución ácida disuelve el cobre, o la **biolixiviación**, que utiliza bacterias para oxidar y disolver el mineral (Crundwell, Moats, Ramachandran, Robinson, & Davenport, 2011) (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2022).

El concentrado obtenido es luego fundido en procesos pirometalúrgicos para producir cobre blister, con un contenido aproximado del 98% de cobre, que es posteriormente refinado mediante **electro-refinación** para alcanzar una pureza superior al 99%. Otros métodos, como la **cementación**, son utilizados en menor medida para recuperar cobre de soluciones lixiviadas. Estos procesos son complementados según la naturaleza del mineral y las condiciones económicas, garantizando una extracción y refinación efectiva del cobre (Habashi, 2017) (Sole & Cole, 2018). La Figura 4 muestra este proceso de manera resumida.

Figura 4. Procesos de extracción, procesamiento y manufactura del cobre



Fuente. Tomado y modificado de British geological Survey, (2007)

Para el uso más común del cobre en aplicaciones eléctricas y electrónicas, el mineral debe pasar por varios procesos para obtener cobre refinado de alta pureza. Según Jara et al. (2024), los métodos principales de procesamiento son la vía pirometalúrgica y la vía hidrometalúrgica. La vía pirometalúrgica, utilizada principalmente para minerales sulfurados de cobre, incluye etapas como el secado del concentrado para reducir la humedad, la fusión a altas temperaturas en hornos especializados (como el horno de reverbero o el horno de flash), y la conversión para eliminar impurezas como el hierro y el azufre, lo que produce cobre blister con una pureza del 95-98.5%. Posteriormente, este cobre blister se somete a una etapa de refinación para obtener cobre anódico con una pureza del 99.5%, que finalmente pasa por un proceso de electro-refinación para alcanzar

una pureza de 99.99%, adecuada para usos eléctricos y electrónicos (Jara, Recabarren, Urzúa, Dufey, & Sucre, 2024).

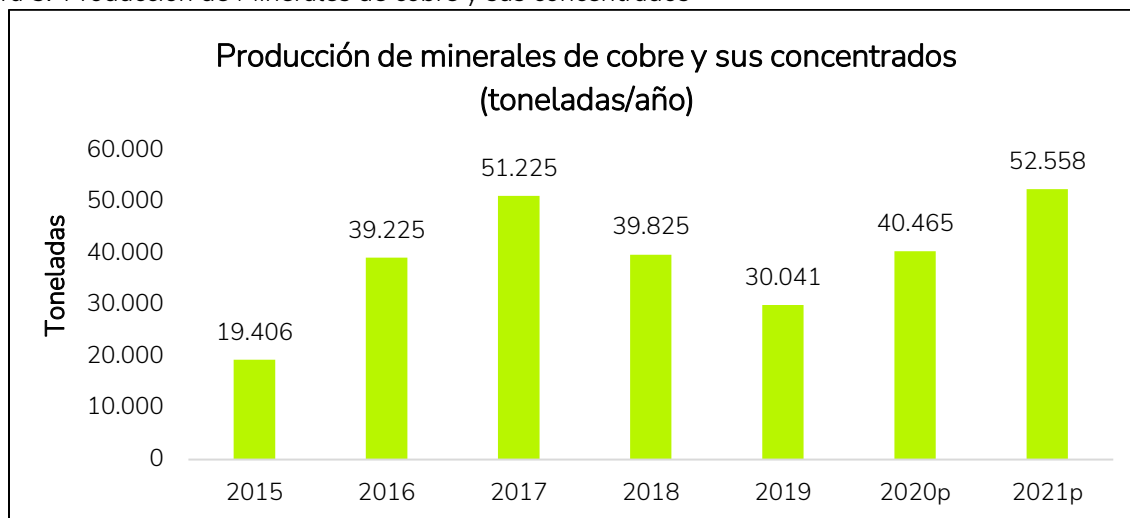
Por otro lado, la vía hidrometalúrgica, más común para los minerales oxidados de cobre y en desarrollo para los concentrados sulfurados, incluye la lixiviación del mineral triturado en soluciones químicas como el ácido sulfúrico, la extracción por solvente para purificar el cobre disuelto, y la electro-obtención, donde el cobre purificado se deposita en cátodos mediante electrólisis para producir cobre de alta pureza del 99.99% (Jara, Recabarren, Urzúa, Dufey, & Sucre, 2024). Ambos métodos están diseñados para producir cobre de alta pureza, esencial para aplicaciones eléctricas y electrónicas que requieren alta conductividad y baja resistencia eléctrica.

En Colombia, la mina El Roble utiliza un proceso de extracción de cobre mediante el método de flotación para concentrar los minerales sulfurados. Este proceso incluye la trituración y molienda del mineral extraído, seguido por un tratamiento en la planta concentradora que utiliza procesos de flotación para separar el mineral de los desechos. La producción se concentra en generar concentrados de cobre, que luego se exportan para su refinación en otros países, ya que en Colombia no se cuenta actualmente con capacidad de fundición o refinación de cobre en su territorio (Jara, Recabarren, Urzúa, Dufey, & Sucre, 2024).

2.3 Producción y oferta de cobre

Entre 2015 y 2021, la producción de cobre ha estado en promedio por debajo de las 39 mil toneladas por año (ver Figura 5), con el departamento de Chocó liderando la producción nacional, seguido por Antioquia. A pesar de existir algunos depósitos en La Guajira, César, Caquetá y Santander su producción es marginal. La totalidad del mineral explotado se destina a la exportación, principalmente hacia China (61,3%), España (21,2%) y México (5,48%) que son los principales países consumidores del cobre colombiano (UPME, 2024).

Figura 5. Producción de Minerales de cobre y sus concentrados



Fuente: elaboración propia UPME 2024, con base en cifras de la Cuenta Satélite Minera del DANE

3 Níquel (Ni)

3.1 Definición, potencial geológico y titulación del níquel

El níquel es un metal de transición vital para diversas industrias modernas, conocido por su color blanco plateado y su alta resistencia a la corrosión. Es ferromagnético a temperatura ambiente y se destaca por su capacidad para formar aleaciones fuertes y duraderas. Su resistencia a la oxidación lo convierte en un componente esencial en la fabricación de acero inoxidable y otras aleaciones especializadas (U.S. Geological Survey, 2023).

Este metal se encuentra principalmente en sulfuros, como la pentlandita, y lateritas niquelíferas. Las lateritas se forman a través de la meteorización intensa de rocas ultramáficas en climas tropicales, lo que permite la concentración de níquel en el perfil laterítico. Este proceso natural hace que las formaciones de lateritas sean económicamente viables para la extracción sostenible del níquel (British Geological Survey, 2022). Algunos de los principales minerales considerados mena de níquel se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales minerales de níquel y sus características

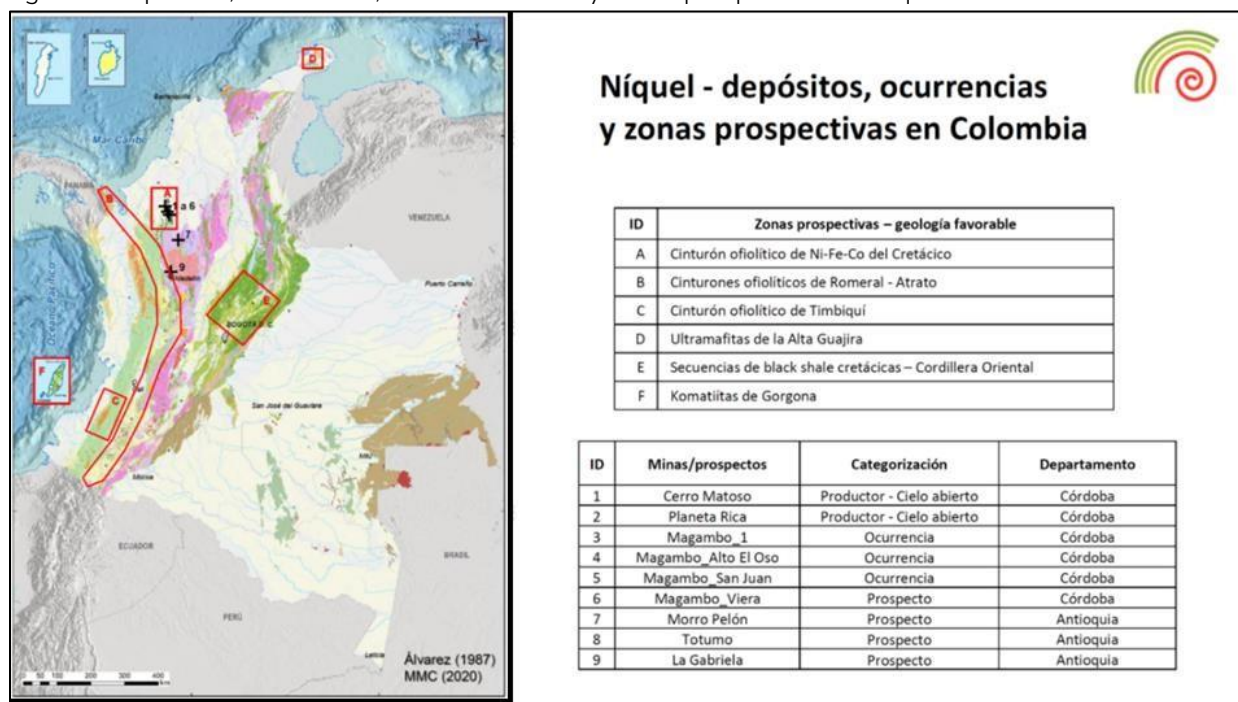
Nombre del mineral	Fórmula Química	Contenido máximo de Ni (wt%)
Pentlandita	$(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$	35%
Garnierita	$(\text{Ni}, \text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	20-30%
Millerita	NiS	64.70%
Violarita	FeNi_2S_4	33%

Fuente: tomado y modificado de: U.S. Geological Survey (2023) y British Geological Survey (2023)

En Colombia, el níquel es un recurso con depósitos significativos en la región de Cerro Matoso, en el departamento de Córdoba. Este yacimiento se ha beneficiado de la meteorización de rocas ultramáficas bajo condiciones tropicales, lo que permitió la concentración de níquel en niveles explotables. Desde la década de 1980, Cerro Matoso ha sido una fuente constante de producción de ferroníquel, contribuyendo a la economía nacional.

Además de Cerro Matoso, otras regiones de Colombia, como Antioquia y la Cordillera Occidental, presentan potencial geológico para la exploración y explotación de níquel (ver Figura 6). Aunque estos prospectos han sido menos explorados, representan una oportunidad significativa para expandir la producción del metal en el país. Estudios del Servicio Geológico Colombiano subrayan la importancia de continuar explorando estas áreas para evaluar su potencial y apoyar el desarrollo de nuevos proyectos mineros (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023); (British Geological Survey, 2022).

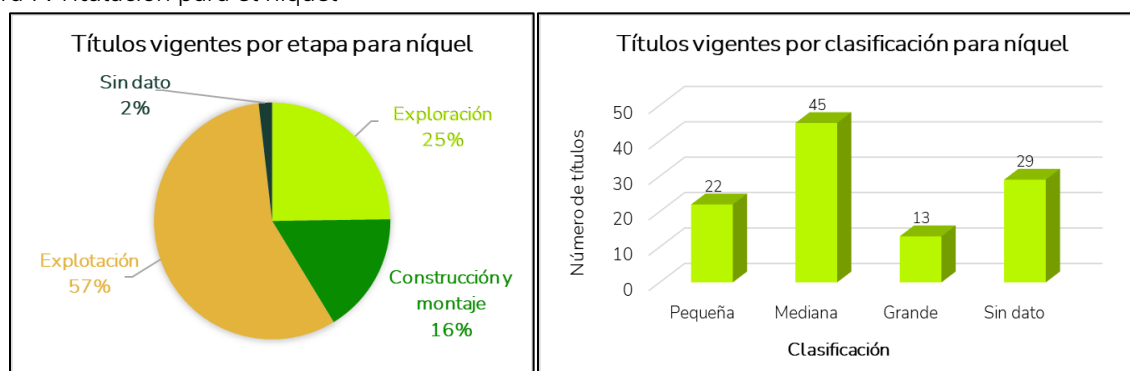
Figura 6. Depósitos, ocurrencias, mineralizaciones y zonas prospectivas de níquel en Colombia



Fuente: (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023)

La titulación minera para el níquel y sus concentrados en Colombia cubre una extensión aproximada de 220.224 hectáreas con 109 títulos según Anna Minería, a la fecha de visualización del 31 de octubre de 2024. De estos títulos el 57% están en la fase de explotación, un 16% de los títulos está en la etapa de construcción y montaje y el 25% se dedica a la exploración (Ver Figura 7). Además, de los 109 títulos 45 (41,3%) corresponden a mediana minería y 22 (20,2%) a pequeña minería. Los 29 títulos que no presentan dato por clasificación se encuentran en estado “título terminado o en proceso de liquidación”.

Figura 7. Titulación para el níquel



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

3.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para níquel

El níquel es un metal esencial en la fabricación de acero inoxidable, utilizado en aproximadamente el 65% de esta producción global. Este tipo de acero es altamente valorado en la construcción, fabricación de electrodomésticos, industria alimentaria y producción de utensilios médicos debido a su durabilidad y resistencia a la corrosión. Cuando se alea con cromo y otros metales, el níquel mejora significativamente la resistencia del acero, haciéndolo ideal para entornos agresivos como plantas químicas, instalaciones de tratamiento de agua y entornos marinos (International Nickel Study Group, 2023).

Además de su papel en el acero inoxidable, el níquel es crucial en la fabricación de baterías recargables, especialmente en las de iones de litio y níquel-hidruro metálico. Estas baterías son fundamentales para la industria de vehículos eléctricos, que está creciendo rápidamente debido a la transición global hacia energías más limpias. También se utilizan en dispositivos electrónicos portátiles, herramientas eléctricas y sistemas de almacenamiento de energía para energías renovables (U.S. Geological Survey, 2023).

El níquel tiene otras aplicaciones importantes, como en la fabricación de monedas, catalizadores para procesos químicos y en galvanoplastia, donde proporciona recubrimientos resistentes a la corrosión. (British Geological Survey, 2022). Entre los productos derivados del níquel se encuentran diversas aleaciones como Inconel y Monel, que son altamente resistentes a la oxidación y corrosión a temperaturas elevadas. Estas aleaciones se utilizan en turbinas de gas, motores de aviones, industria aeroespacial y reactores nucleares, donde se requieren materiales que ofrezcan un rendimiento excepcional en condiciones extremas (Crundwell, Moats, Ramachandran, Robinson, & Davenport, 2011).

Además, el níquel se utiliza para producir sulfato de níquel, un compuesto esencial en la galvanoplastia y como precursor en la fabricación de baterías recargables. Este sulfato es crucial en la cadena de suministro de baterías, ya que se usa para recubrir cátodos y mejorar la capacidad y durabilidad de las baterías de iones de litio (Jara, Recabarren, Urzúa, Dufey, & Sucre, 2024). Otro derivado importante es el ferroníquel, una aleación de níquel y hierro producida mediante la fundición de minerales lateríticos. El ferroníquel es fundamental en la producción de acero inoxidable, facilitando la incorporación de níquel durante la fundición del acero. En Colombia, instalaciones como Cerro Matoso son líderes en la producción de ferroníquel a partir de lateritas.

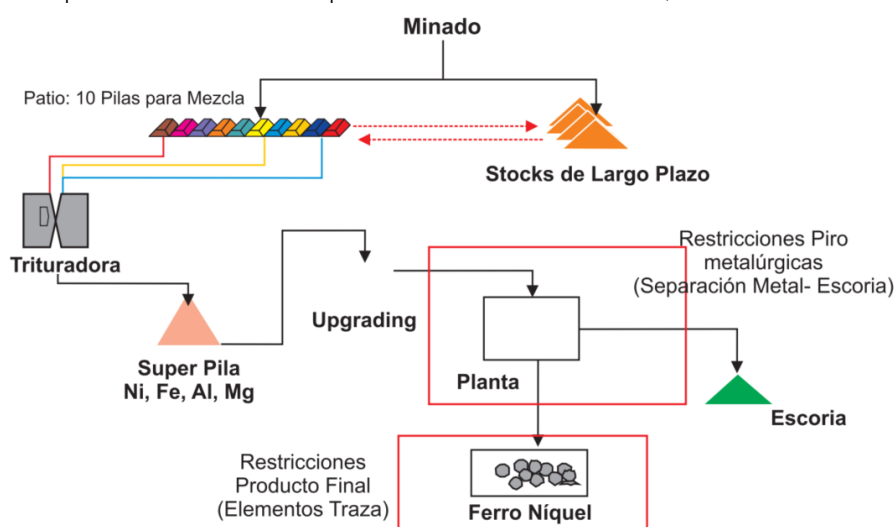
El ciclo de producción de níquel en Colombia sigue una serie de etapas claramente definidas, que permiten extraer, transformar y comercializar este recurso de manera eficiente. El proceso comienza con la exploración o identificación de áreas con potencial mineral a través de estudios geológicos y topográficos detallados. Una vez que se determina la viabilidad del proyecto, el siguiente paso es la extracción. En Colombia, la minería de níquel se realiza principalmente a cielo abierto. Las lateritas niquelíferas, que contienen bajas concentraciones de níquel, se extraen y almacenan en pilas de acuerdo con su composición mineral. Posteriormente, la mena se transporta a plantas de procesamiento donde se somete a una trituración y homogenización, garantizando

que el material extraído mantenga una concentración uniforme de níquel (Unidad de Planeación Minero Energética, 2009).

El proceso de transformación o beneficio se realiza en plantas especializadas, donde la mena se funde para producir ferroníquel. En Colombia, este proceso incluye una tostación reductora, que permite separar el níquel del resto de los componentes minerales. El resultado es un ferroníquel de alta pureza que se utiliza principalmente para la fabricación de acero inoxidable (ver Figura 8). Este proceso es esencial para asegurar que el níquel extraído sea adecuado para su uso industrial y comercial (Unidad de Planeación Minero Energética, 2009).

Un aspecto importante de la producción de níquel en Colombia es la gestión de la escoria, un subproducto del proceso de fundición. En las instalaciones de Cerro Matoso, la escoria que contiene níquel residual es reprocesada para recuperar este metal, lo que contribuye a una mayor eficiencia en la utilización de los recursos disponibles. Este enfoque apunta hacia la optimización de los residuos generados durante la producción (Unidad de Planeación Minero Energética, 2009).

Figura 8. Proceso de producción del ferroníquel en la mina Cerro Matoso, Colombia



Fuente: tomado y modificado de Unidad de Planeación Minero Energética (2009)

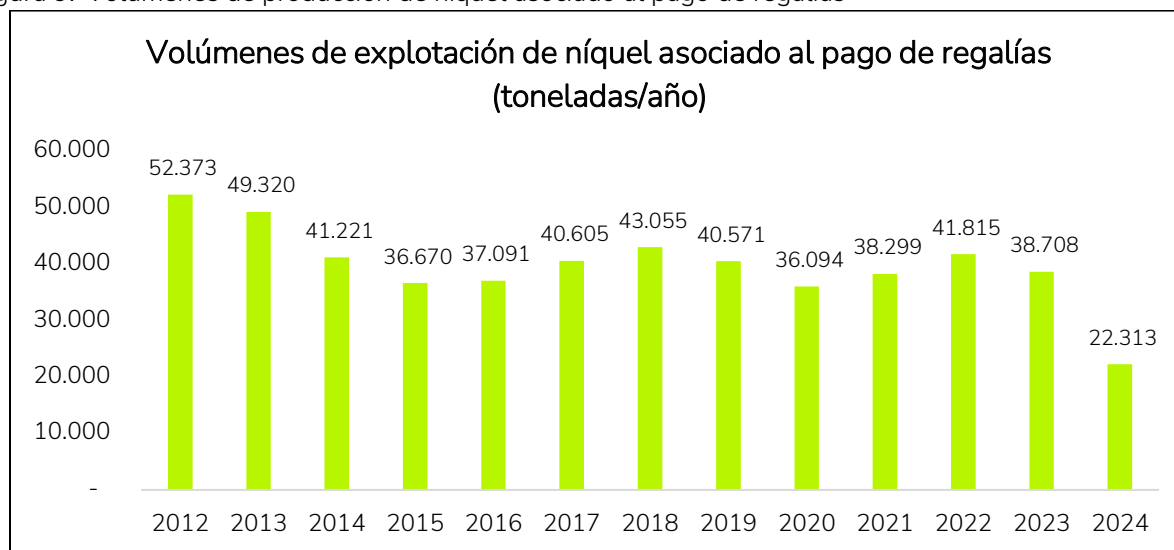
3.3 Producción y oferta de níquel

Entre 2012 y 2024, la producción de níquel ha estado en promedio por el orden de las 39,8 mil toneladas por año (ver Figura 9). El departamento de Córdoba, con los municipios de Montelibano, Planeta Rica, Puerto Libertador y San José de Uré, concentra la totalidad de la producción nacional del níquel colombiano. La totalidad del mineral explotado se destina a la exportación, siendo China, Italia y Estados Unidos los principales países consumidores del níquel colombiano (UPME, 2024).

En este contexto, Colombia se ha posicionado como un importante productor de níquel en América Latina, responsable de una fracción significativa de la producción mundial de este metal (Unidad

de Planeación Minero Energética, 2009). La producción de níquel en Colombia no solo representa un aporte económico, sino que también subraya la importancia de implementar procesos que maximicen el uso de los recursos y gestionen adecuadamente los subproductos generados, en línea con los principios de sostenibilidad.

Figura 9. Volúmenes de producción de níquel asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

4 Zinc (Zn)

4.1 Definición, potencial geológico y titulación del zinc

El zinc es un metal de color blanco azulado, conocido por su resistencia a la corrosión y su capacidad para formar aleaciones como el latón (aleación de zinc y cobre) y el bronce. Aunque es menos dúctil que otros metales, el zinc se vuelve maleable a temperaturas superiores a 100°C. Se encuentra principalmente en minerales como la esfalerita (ZnS), que es la mena de zinc más común y se halla en depósitos hidrotermales junto con otros sulfuros como la galena y la pirita (U.S. Geological Survey, 2023). Otros minerales importantes que contienen zinc incluyen la smithsonita (ZnCO_3) que se forma por la alteración de la esfalerita en zonas oxidantes (American Mineralogist, 2022), y la hemimorfita ($\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que se presenta en formas cristalinas en las zonas de oxidación de los depósitos de zinc (Mindat.org, 2024). Otros minerales menos comunes se presentan en la Tabla 3.

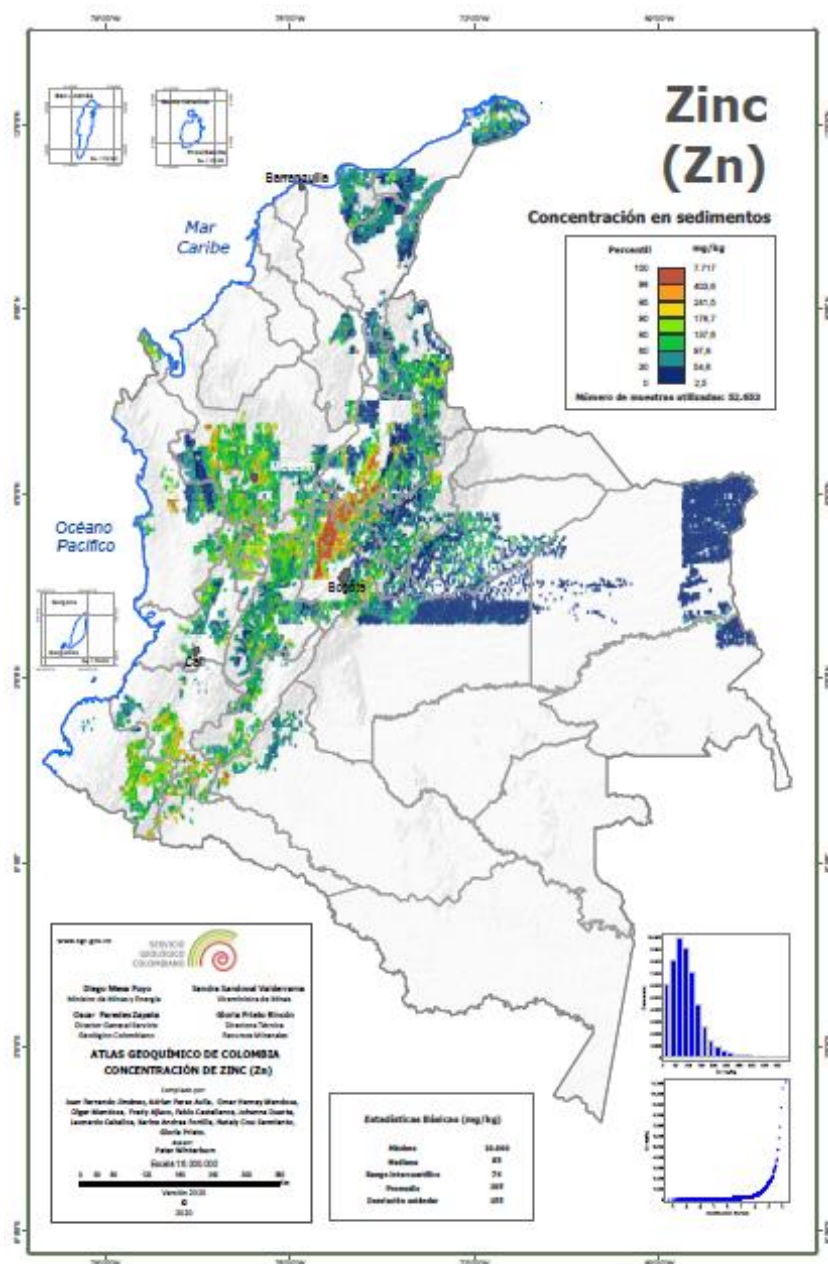
Tabla 3. Principales minerales de zinc y sus características

Nombre del mineral	Fórmula química	Contenido máximo de Zn (wt%)
Esfalerita	ZnS	67%
Smithsonita	ZnCO_3	52%
Hemimorfita	$\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	54%

Nombre del mineral	Fórmula química	Contenido máximo de Zn (wt%)
Zincita	ZnO	80,3%
Franklinita	$ZnFe_2O_4$	21%
Willemite	Zn_2SiO_4	58%
Calamina	$Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$	52%
Esperita	$Zn_3(AsO_4)_2$	45%

Fuente: tomado y modificado de (U.S. Geological Survey, 2023)

Figura 10. Mapa de concentración de zinc en sedimentos

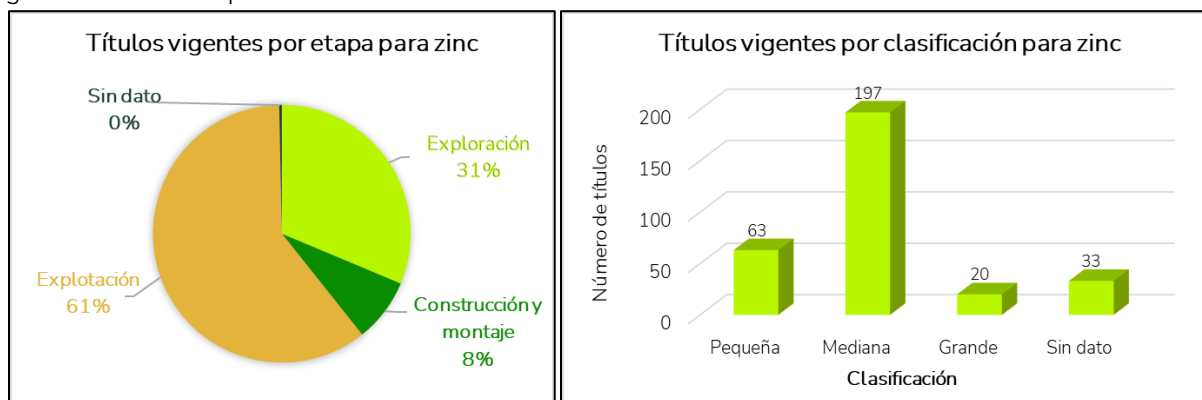


Fuente: (Jiménez, Castellanos, & Mendoza, 2020)

La exploración de zinc en Colombia aún está en etapas iniciales, por lo que no se han descubierto depósitos explotables significativos, solo ocurrencias relativamente pequeñas o presencia de minerales de interés, como la esfalerita, asociada a otros minerales de mayor potencial o interés económico como el oro o el cobre. Según el Mapa Metalogénico de Colombia, existen ocurrencias de Plomo – Zinc (galena – esfalerita) hospedadas en rocas sedimentarias cretácicas de la Cordillera Oriental y otras mineralizaciones en depósitos volcanogénicos de cobre y oro que presentan asociaciones con esfalerita, entre otros minerales (López-Isaza, y otros, 2018) (Sepúlveda Ospina, y otros, 2022). En la Figura 10 se observa el mapa de concentración de zinc en sedimentos.

La titulación minera en Colombia para el zinc abarca un total de 498.642 ha distribuidas en 313 títulos vigentes, según datos del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, con revisión al 31 de octubre de 2024. De estos, 189 títulos correspondientes al 64% se encuentran en etapa de explotación, 8% en la fase de construcción y montaje y un 31% de los títulos está en la etapa de exploración. La clasificación de 197 de estos títulos (63%) es de mediana minería, seguidos por 63 de pequeña minería (20%) y 20 títulos de gran minería (ver Figura 11). Dentro de los títulos sin dato, la mayoría se encuentran en estado de “título terminado o en proceso de liquidación”. Para este mineral en particular, ninguno de los títulos presenta el zinc y sus concentrados como único mineral solicitado, por lo que los minerales explotados actualmente pueden ser otros asociados o que se hayan incluido en la solicitud del título.

Figura 11. Titulación para el zinc



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

4.2 Usos, productos y procesos de beneficio del zinc

El zinc es un metal con aplicaciones industriales y comerciales debido a su resistencia a la corrosión, su capacidad para formar aleaciones y su importancia para la salud humana. Su principal uso es en la galvanización de otros metales, como el acero, para protegerlos contra la corrosión (Royal Society of Chemistry, 2024). Este proceso consiste en recubrir el hierro o acero con una capa de zinc, lo que representa aproximadamente el 50% del consumo mundial de zinc. Los productos resultantes incluyen estructuras de acero galvanizado, como puentes, torres de

transmisión, barandillas, paneles para techos y fachadas, vehículos y componentes de construcción (International Zinc Association, 2023).

Además de su uso en la galvanización, el zinc es fundamental en la producción de aleaciones como el latón (una mezcla de zinc y cobre) y aleaciones de fundición a presión como el Zamak, que se utilizan en componentes automotrices, cerraduras, herrajes, instrumentos musicales y accesorios de fontanería (Callister & Rethwisch, 2018). En la industria de la construcción, el zinc se emplea en cubiertas de techos, canaletas, bajantes y elementos decorativos debido a su durabilidad y resistencia a la intemperie, con productos como paneles para techos y canales de drenaje. En el sector energético, se utiliza en baterías zinc-carbono y zinc-aire, comunes en dispositivos electrónicos debido a su alta densidad energética y bajo costo. Estas baterías se encuentran en productos como relojes, audífonos y otros dispositivos electrónicos pequeños (Moss & Whitmore, 2018).

En la industria química, el óxido de zinc es un aditivo importante en productos industriales y de consumo, incluidos caucho, cerámica, lubricantes, pinturas y productos farmacéuticos. Este compuesto es valorado por sus propiedades fungicidas y como pigmento blanco (Schwarz, 2019). Asimismo, el zinc es un micronutriente esencial en la agricultura, utilizado en fertilizantes para mejorar la calidad del suelo y en suplementos dietéticos para prevenir deficiencias en humanos y animales, lo que es crucial para mantener la salud del ganado y la productividad de los cultivos (Agencia Nacional de Minería, 2023; Royal Society of Chemistry, 2024).

4.2.1 Proceso de beneficio del zinc

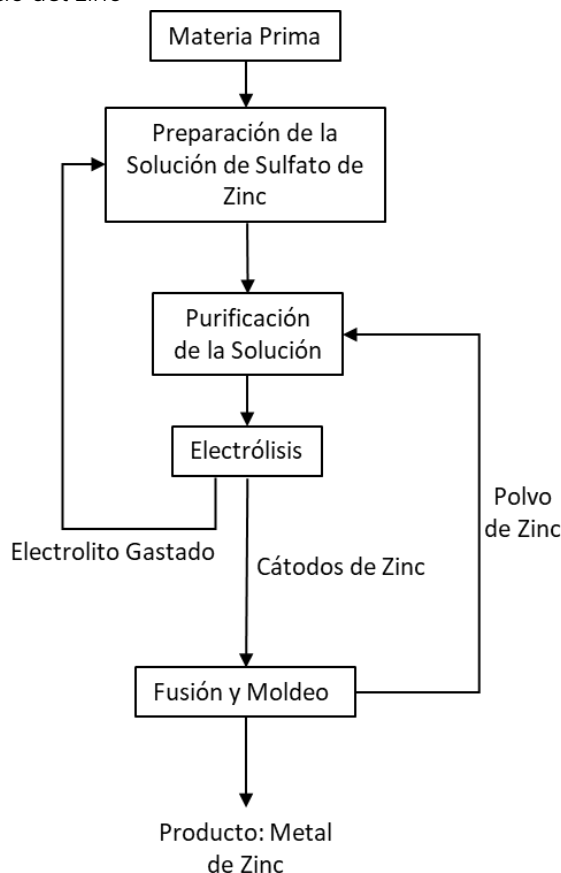
El proceso de beneficio del zinc implica varias etapas que permiten extraer y refinar el mineral de zinc, generalmente en forma de esfalerita (ZnS), hasta obtener zinc metálico puro. La primera etapa del proceso es la concentración del mineral, que consiste en triturar y moler el mineral de zinc para liberar el zinc de la ganga (material no deseado). Posteriormente, el mineral triturado se somete a un proceso de flotación, en el que se utilizan reactivos químicos y aire para separar los minerales de zinc de otros componentes, produciendo así un concentrado de zinc con una alta concentración del metal (Boldt & Queneau, 1967).

Una vez obtenido el concentrado, se procede a la tostación, un proceso en el que el sulfuro de zinc (ZnS) se oxida en un horno, convirtiéndose en óxido de zinc (ZnO) y liberando dióxido de azufre (SO_2). Este subproducto puede ser capturado y utilizado en la producción de ácido sulfúrico, un recurso valioso en muchas industrias. Tras la tostación, el óxido de zinc resultante se somete a lixiviación en una solución de ácido sulfúrico, formando sulfato de zinc. La solución se purifica luego para eliminar impurezas como hierro, cobre y cadmio mediante precipitación selectiva, lo que mejora la calidad del zinc extraído (Crundwell, Moats, Ramachandran, Robinson, & Davenport, 2011).

La etapa final del proceso de beneficio del zinc es la electrólisis, donde la solución de sulfato de zinc purificada se somete a una corriente eléctrica que provoca la deposición de zinc metálico en

los cátodos de aluminio. Este zinc depositado se recupera y se funde en lingotes de alta pureza para aplicaciones industriales (Habashi, 2017) (ver Figura 12). En algunos casos, se puede utilizar un enfoque pirometalúrgico alternativo, donde el concentrado de óxido de zinc se reduce en un horno utilizando carbono como agente reductor para obtener zinc metálico, que luego se refina para eliminar cualquier impureza residual (Boldt & Queneau, 1967).

Figura 12. Proceso de beneficio del zinc



Fuente: tomado y modificado de Crundwell et al. (2011)

5 Metales del Grupo del Platino

5.1 Definición, potencial geológico y titulación de los metales del grupo del platino

Los Metales del Grupo del Platino (PGM), que incluyen el platino (Pt), paladio (Pd), rutenio (Ru), rodio (Rh), osmio (Os) e iridio (Ir), son elementos de transición que comparten características físicas y químicas similares. Estos metales son extremadamente raros y valiosos debido a sus propiedades únicas, como su alta resistencia a la corrosión, puntos de fusión elevados y capacidades catalíticas. Estas propiedades hacen que los PGM sean indispensables en diversas aplicaciones industriales, como la fabricación de catalizadores automotrices, la refinación de

petróleo, la producción de dispositivos electrónicos y médicos, así como en la industria joyera (U.S. Geological Survey, 2023) (Encyclopedia MDPI, 2023).

Geológicamente, los PGM se encuentran principalmente en depósitos de sulfuros magmáticos asociados a rocas ígneas máficas y ultramáficas. A nivel global, los depósitos más ricos de PGM se localizan en regiones como el Complejo Ígneo Bushveld en Sudáfrica y Norilsk-Talnakh en Rusia, los cuales son responsables de una parte significativa de la producción mundial de platino y paladio. En Norteamérica, complejos como Stillwater en EE.UU. y Sudbury en Canadá también son fuentes importantes, aunque en menor escala (Zientek, Loferski, Parks, Schulte, & Seal, 2017) (U.S. Geological Survey, 2023). En estos depósitos, los PGM se encuentran en minerales específicos, y para obtener metales de alta pureza, se emplean procesos avanzados de refinación. Algunos de los minerales representativos de este grupo se encuentran en la Tabla 4.

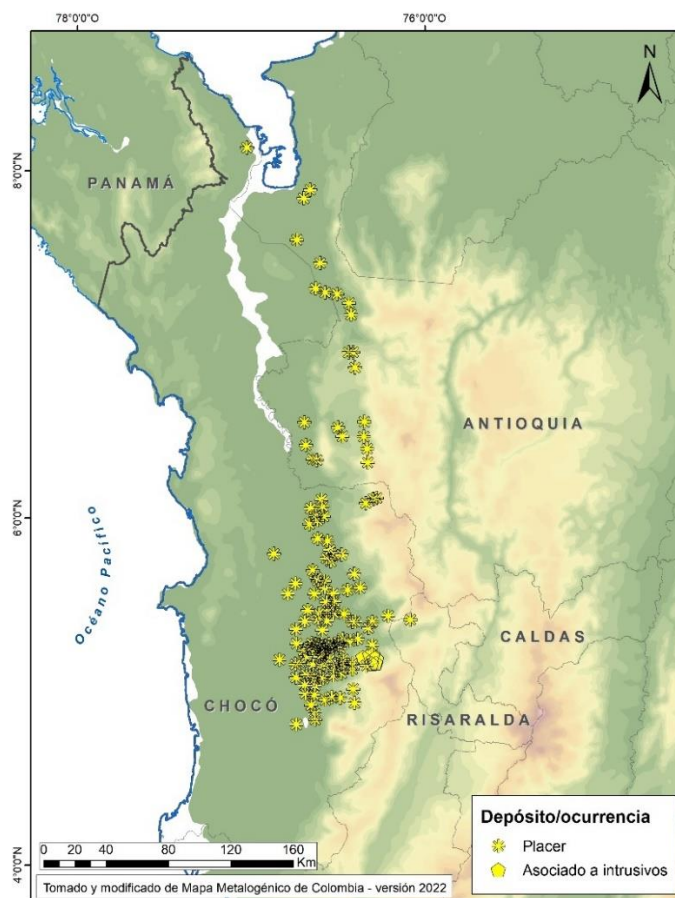
Tabla 4. Principales minerales de platino, rutenio e iridio y sus características

Mineral	Fórmula Química	Contenido Máximo de PGM (%wt)	Descripción
Sperrylita	PtAs ₂	57% (Pt)	Principal mineral de platino se encuentra comúnmente en depósitos magmáticos y es la principal fuente de platino.
Cooperita	(Pt,Pd,Ni)S	80% (Pt)	Un sulfuro de platino, que contiene pequeñas cantidades de paladio y níquel, encontrado principalmente en el Complejo Bushveld.
Laurita	RuS ₂	60% (Ru)	Mineral de rutenio, común en depósitos de sulfuros magmáticos y conocido por su dureza y alta resistencia química.
Braggita	(Pt,Pd)S	65% (Pt)	Un mineral sulfuroso que contiene platino y paladio, encontrado en depósitos magmáticos como el de Sudbury, Ontario.
Iridosmina	(Ir,Os)	70% (Ir)	Aleación natural de iridio y osmio, es extremadamente densa y resistente, utilizada en aplicaciones industriales de alta resistencia.

Fuente: tomado y modificado de: Zientek et al., 2017; U.S. Geological Survey, 2023 y Encyclopedia MDPI, 2023.

En Colombia, los PGM se encuentran predominantemente en depósitos aluviales y en complejos ultramáficos con zonación concéntrica. Según el Mapa Metalogénico de Colombia, los depósitos más significativos de platino (Pt) y oro (Au) aluvial se localizan en las cuencas de los ríos Atrato y San Juan, junto con sus tributarios orientales, como los ríos Iró, Condoto, Tatamá, Andágueda, Neguá, y Bebaramá, en el departamento del Chocó (ver Figura 13). Estos depósitos han sido fundamentales para la producción histórica de platino en el país, especialmente a través de la minería artesanal y de pequeña escala, donde el platino se extrae como subproducto de la minería de oro (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Figura 13. Ocurrencias y depósitos de platino en Colombia



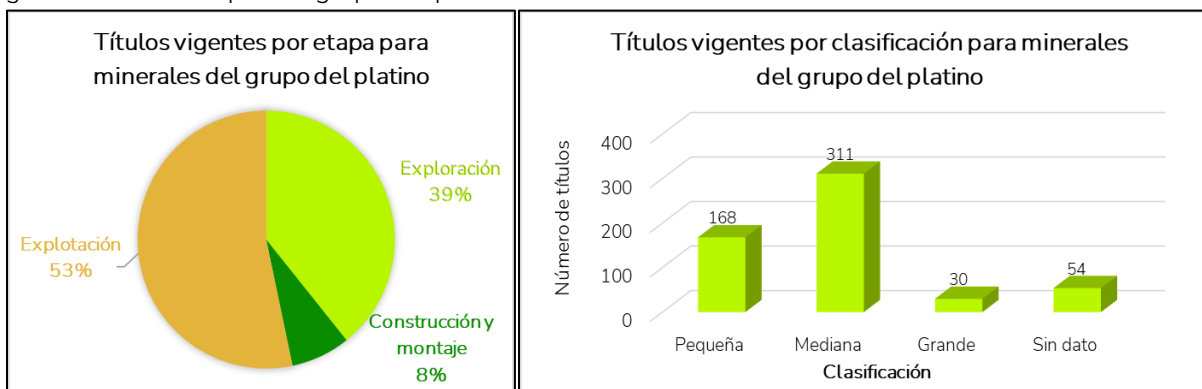
Fuente: elaboración propia con base en (Sepúlveda Ospina, y otros, 2022)

Además de los depósitos aluviales, Colombia cuenta con depósitos de aleaciones de platino-hierro (Pt-Fe) e iridio-osmio (Ir-Os) en intrusiones ultramáficas con zonación concéntrica, similares a los complejos geológicos tipo Urales-Alaska. Un ejemplo es el Complejo Ultramáfico Zonado del Alto Condoto (CUZAC), también en Chocó (López-Isaza, y otros, 2018). El potencial geológico de Colombia para los PGM es significativo, pues estos minerales están asociados a intrusiones máficas y ultramáficas, similares a las estructuras geológicas que contienen grandes depósitos de estos metales en otras partes del mundo.

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, con revisión al 31 de octubre de 2024, en Colombia existen 563 títulos vigentes que incluyen el platino como mineral principal. Estos títulos cubren una extensión total de 892.492 hectáreas distribuidas en varias regiones del país. Del total de títulos, el 53% se encuentra en etapa de explotación, un 8% está en la fase de construcción y montaje y el 39% de los títulos se encuentra en etapa de exploración. La distribución de estos títulos se concentra mayormente en la mediana minería, con un 55% de los títulos, seguida de la pequeña minería con 30% de los títulos y la gran minería con 5% (ver Figura 14).

La explotación de platino en Colombia ha sido tradicionalmente liderada por la minería aluvial, especialmente en la región del Chocó, aunque el potencial para el desarrollo de depósitos primarios sigue siendo un área de interés para futuros desarrollos mineros en el país. Al 12 de noviembre de 2024, se encontraban registrados en RUCOM 1086 mineros/as de subsistencia en el departamento de Chocó y 5121 mineros/as de subsistencia para todo el país con metales preciosos como sus minerales de extracción.

Figura 14. Titulación para el grupo del platino



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

5.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio de los metales del grupo del platino

Los PGM son elementos versátiles con aplicaciones en una amplia variedad de industrias. Uno de sus usos más importantes es en la fabricación de catalizadores automotrices, que representan la mayor parte de la demanda global. Estos catalizadores son esenciales para reducir las emisiones de gases contaminantes en los vehículos, ya que son capaces de convertir los gases tóxicos de escape de los automóviles en sustancias menos dañinas como dióxido de carbono y vapor de agua, lo que ha impulsado la demanda de estos metales, especialmente de platino, paladio y rodio (International Platinum Group Metals Association, 2023).

Además de su uso en la industria automotriz, los PGM son cruciales en la industria petroquímica, donde se emplean como catalizadores en la refinación de petróleo y la producción de combustibles de alto octanaje. El platino, en particular, se utiliza en la fabricación de dispositivos electrónicos debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión, siendo esencial en la producción de discos duros, contactos eléctricos y componentes para circuitos integrados. En el campo de la medicina, el platino se utiliza en tratamientos contra el cáncer, como en los medicamentos quimioterapéuticos basados en platino, y en la fabricación de implantes médicos, incluyendo marcapasos y stents, debido a su biocompatibilidad y resistencia al desgaste (U.S. Geological Survey, 2023) (Zientek, Loferski, Parks, Schulte, & Seal, 2017) (Mendoza, Cruz, Pérez, Castellanos, & Jiménez, 2020).

Otro derivado importante es el platino usado en la joyería, apreciado por su color blanco, durabilidad y resistencia a la oxidación (Encyclopedia MDPI, 2023). En la industria electrónica, los PGM se utilizan en la producción de componentes avanzados como capacitores cerámicos, circuitos híbridos, y discos duros, donde la durabilidad y la conductividad son esenciales. Además, el iridio, debido a su alta resistencia al calor, se utiliza en aplicaciones industriales especializadas, como en los contactos de bujías de motores de alto rendimiento y en crucibles para la producción de cristales sintéticos (Zientek, Loferski, Parks, Schulte, & Seal, 2017).

El proceso de beneficio de los PGM es complejo y se lleva a cabo a través de varias etapas que permiten extraer y refinar estos metales a partir de sus minerales asociados. Inicialmente, el mineral extraído se tritura y se muele para liberar los PGM de la ganga, seguida de un proceso de flotación que separa los metales valiosos de otros minerales menos deseados. En esta etapa, se emplean reactivos químicos que permiten la adhesión de los PGM a burbujas de aire, elevándolos a la superficie de las celdas de flotación, donde se recogen como concentrados (Schlesinger, King, Sole, & Davenport, 2022).

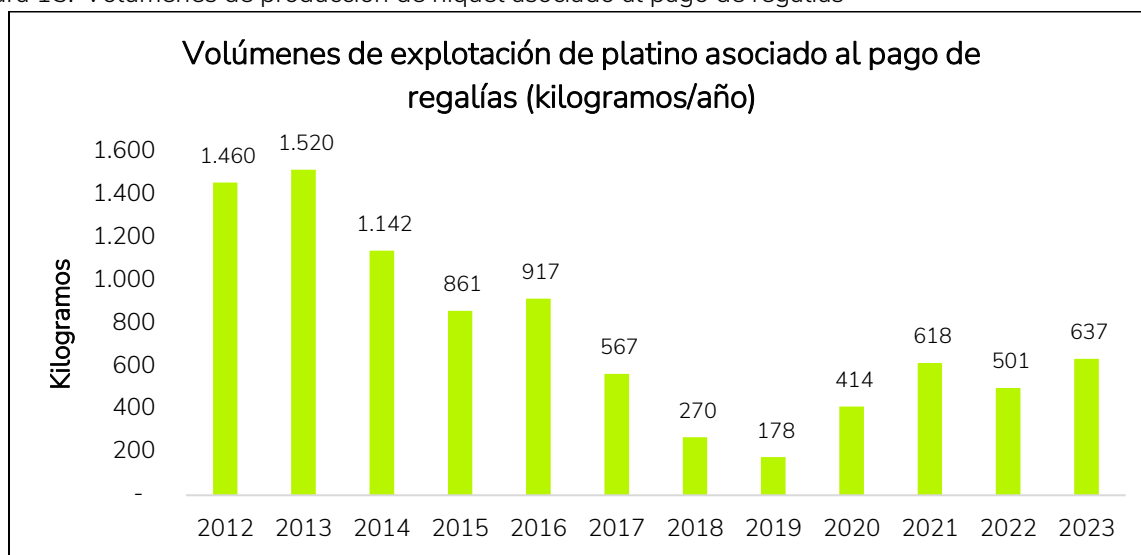
Después de la flotación, los concentrados de PGM se someten a procesos pirometalúrgicos, que incluyen la fundición y el refinado. Durante la fundición, los concentrados se calientan a altas temperaturas en presencia de un agente reductor, lo que provoca la separación de los PGM del material no deseado. El producto de la fundición, una masa de metal fundido llamada mate, contiene los PGM junto con otros metales como cobre y níquel. Este mate se somete a un proceso de refinación, que puede incluir técnicas hidrometalúrgicas, como la lixiviación, donde los PGM se disuelven en ácidos y luego se recuperan a través de la electrólisis o la precipitación química (Crundwell, Moats, Ramachandran, Robinson, & Davenport, 2011).

En casos donde los PGM se encuentran en concentraciones muy bajas, como en minerales de sulfuros de níquel, se emplean procesos adicionales de lixiviación a presión y extracción con solventes para aumentar la recuperación de estos metales. El resultado final de estos procesos es la producción de PGM de alta pureza, listos para ser utilizados en sus diversas aplicaciones industriales y comerciales (U.S. Geological Survey, 2023).

5.3 Producción y oferta de metales del grupo del platino

Entre 2015 y 2023 la producción de platino ha estado en promedio alrededor de los 757 kilogramos por año (ver Figura 15). El departamento de Chocó concentra la mayoría de la producción nacional del mineral, con otros departamentos como Córdoba, Antioquia, Cauca, Bolívar, Guainía, Nariño y Valle del Cauca con producción en muy menor porcentaje. La totalidad del mineral explotado se destina a la exportación, en particular, Estados Unidos es el principal país consumidor del platino colombiano con un 87,2% (UPME, 2024).

Figura 15. Volúmenes de producción de níquel asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

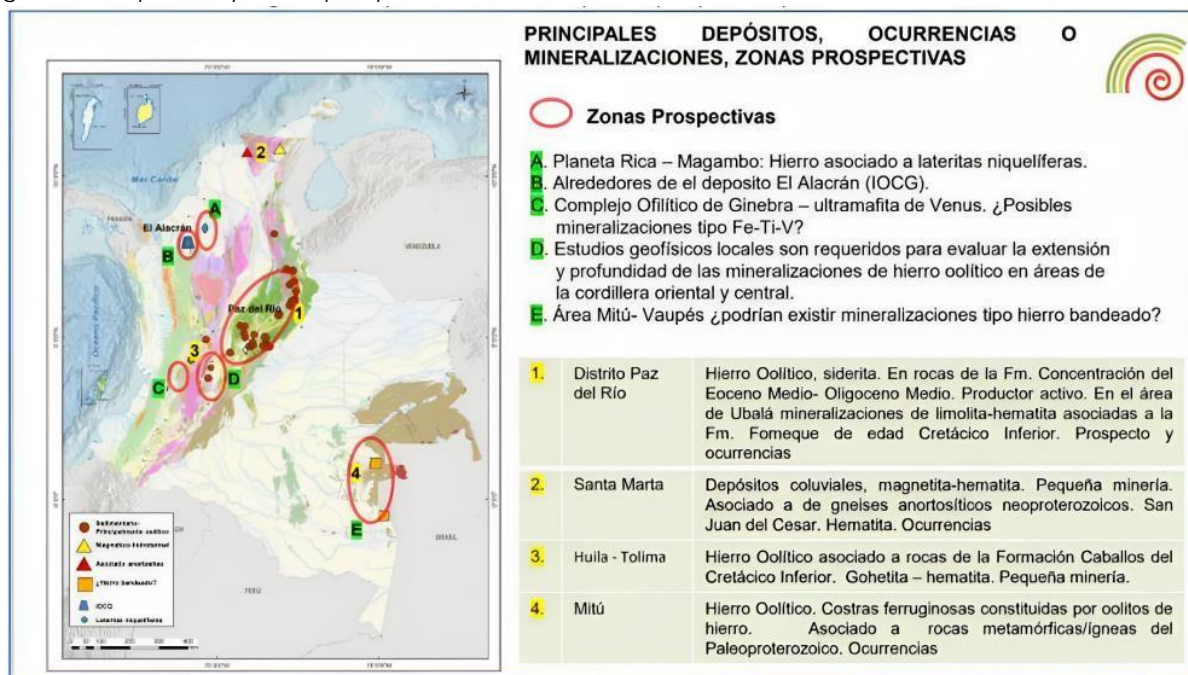
6 Hierro (Fe)

6.1 Definición, potencial geológico y titulación de minerales de hierro

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre y el más usado, principalmente en la producción de acero. Se encuentra formando parte de aproximadamente 300 minerales como componente esencial entre los que se destacan óxidos (magnetita y hematita), hidróxidos (goethita), carbonatos (siderita), sulfuros (pirita y marcasita, pirrotina) y silicatos (Ulloa Melo, 2019). Los minerales con porcentaje superior al 15% en contenido de hierro se consideran viables para explotación de este elemento, y se encuentran en depósitos ígneos, sedimentarios y metamórficos; sin embargo, los principales depósitos de hierro son de origen sedimentario, los cuales constituyen cerca del 85 a 90% del hierro explotado.

En Colombia se conocen prospectos y yacimientos de hierro sedimentarios en capas de hierro intercalados con otros tipos litológicos sedimentarios como los de Paz de Río (Boyacá), Sabanalarga (Casanare), Cúcuta (Norte de Santander) y Mitú (Vaupés); formaciones de hierro bandeado en la Amazonia colombiana y placeres de playa marina en estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (ver Figura 16). Por otra parte, se han reportado manifestaciones con influencia de actividad ígnea asociados principalmente al Batolito de Ibagué, la Formación Chipaque, y otras unidades geológicas localizadas en los departamentos de Tolima, Norte de Santander, Cundinamarca y Magdalena, entre otros, o en cercanías a la Sierra Nevada de Santa Marta. También se cuenta con ocurrencias de posibles depósitos lateríticos en la cordillera occidental en Córdoba (Cerromatoso), Valle del Cauca (Dagua), Antioquia y Meta (Ulloa Melo, 2019). En la Figura 16 se observa la localización de manifestaciones y posibles depósitos en el país.

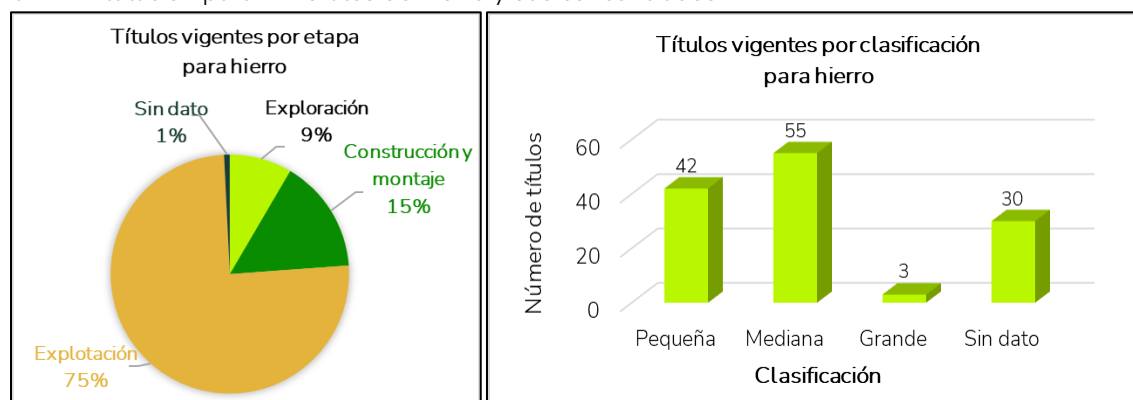
Figura 16. Depósitos y zonas prospectivas de hierro en Colombia



Fuente: (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023)

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 130 títulos vigentes que contienen mineral de hierro, correspondientes a 118.997 hectáreas. El 75% de los títulos están en etapa de explotación, 15 % en etapa de construcción y montaje y 9% en exploración como se ve en la Figura 17. Se distribuye mayormente en pequeña y mediana minería con 32% y 42% respectivamente y la mayoría de los títulos que no presentan dato en la base de información se encuentran con el estado de título “terminado o en proceso de liquidación”.

Figura 17. Titulación para minerales de hierro y sus concentrados



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

En Colombia la producción de hierro se ha dado principalmente en Boyacá, Cundinamarca y Córdoba. Las mayores operaciones son las que desarrolla Acerías Paz del Río pues su planta

siderúrgica es alimentada por dos minas ubicadas en los municipios de Ubalá (Cundinamarca) y Paz del Río (Boyacá).

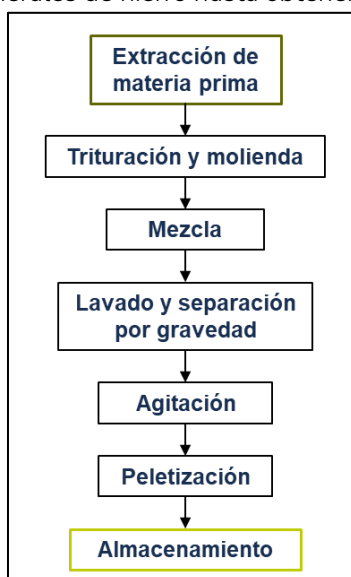
6.2 Usos, productos y procesos de beneficio del hierro

El principal uso de minerales de hierro es en aleaciones, principalmente en la industria siderúrgica para fabricación de acero, lo que representa aproximadamente el 98% de uso de este material. Los productos obtenidos en las siderúrgicas y las diferentes aleaciones tienen innumerables usos como la industria de la infraestructura, fabricación de herramientas, piezas para la industria del transporte, piezas en la industria electrónica, etc. El acero se alea comúnmente con otros elementos para darle mejores propiedades como resistencia, dureza, anti-corrosividad, etc., por ejemplo, zinc, titanio, níquel, aluminio, manganeso, etc. (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023). El 2% restante de mineral de hierro es usado en varias aplicaciones como polvo de hierro, autopartes, catalizadores, hierro radiactivo para medicina, hierro azul en pinturas, tintas, cosméticos y plásticos (Government of Canada, 2024).

El proceso de beneficio para minerales de hierro, según Ulloa Melo (2019) se presenta a continuación (ver Figura 18):

- I. Extracción del mineral: según el tipo de depósito se realiza a cielo abierto o subterránea.
- II. Trituración y molienda: se busca dar un tamaño apropiado para cargar en los hornos.
- III. Mezcla: se busca homogenizar tamaño y composición química.
- IV. Lavado y separación por gravedad: se provechan la gravedad y el tamaño del mineral para separarlo de cuarzo y arcillas.
- V. Agitación: se usan lavadoras especializadas que buscan remover sílice fina y dejar un producto residual rico en hierro. Este paso se puede complementar con flotación
- VI. Peletización: aglomeración del mineral de hierro formando pequeñas bolas.

Figura 18. Proceso de beneficio de minerales de hierro hasta obtener *pellets*



Fuente: elaboración propia con base en Ulloa Melo (2019) y 911 Metallurgist

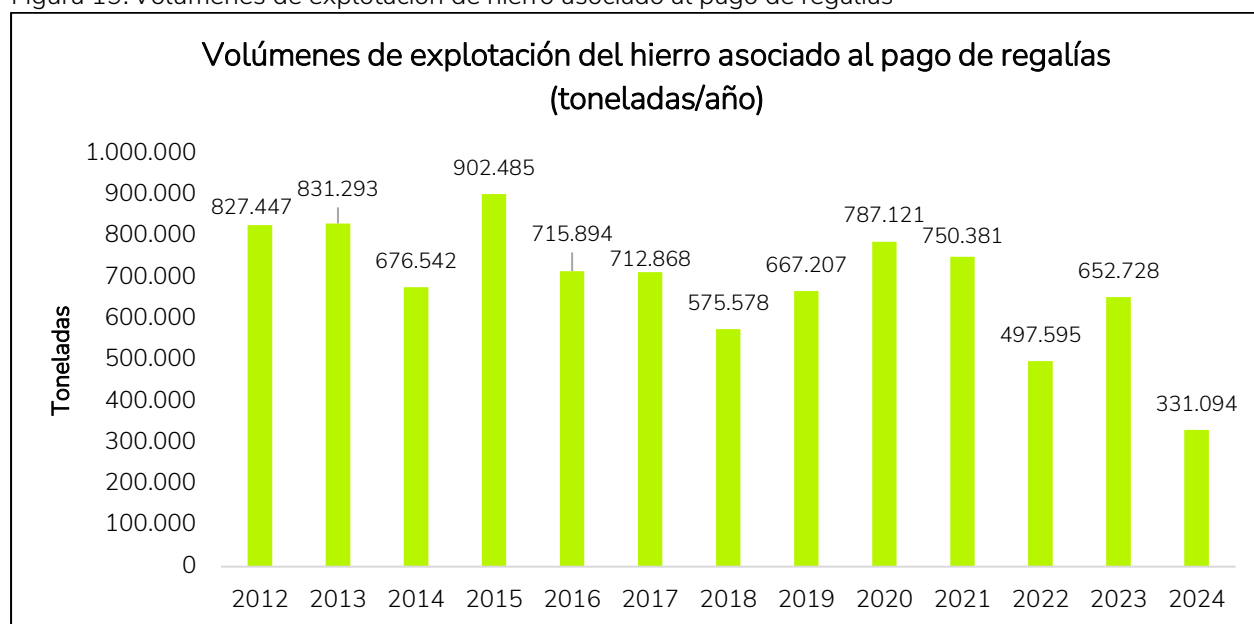
Según el tipo de depósito se pueden realizar otras acciones como separación magnética, procesos de flotación o actividades complementarias a la flotación. Igualmente, la comercialización de los productos depende de las necesidades del comprador. Una vez obtenido el mineral de hierro en forma de *pellets* se mezcla con caliza y coque para la generación de aceros en procesos siderúrgicos.

Respecto al hierro se considera importante destacar que es reciclable tantas veces sea necesario sin perder sus propiedades ni calidad, por lo que la chatarra de hierro y acero puede ser reutilizada en procesos de generación de aceros. Sin embargo, se debe tener en cuenta en manejos ambientales apropiados, ya que concentraciones superiores a 200 mg/l en el agua son tóxicas para los humanos y sus concentraciones y disponibilidad en los suelos puede afectar el crecimiento de algunas plantas (Ulloa Melo, 2019).

6.3 Producción y oferta de hierro

Entre 2015 y 2023 la producción de hierro ha estado en promedio en el orden de las 700 mil toneladas por año (ver Figura 19). Los departamentos del centro del país concentran la mayoría de la producción nacional del mineral, Boyacá lidera con el 54% del total, seguido de Cundinamarca con el 46%. La mayor parte del mineral explotado se destina a la producción de acero nacional liderado por Acerías Paz del Río. Por su parte, durante el mismo período de tiempo las exportaciones de hierro han sido marginales y solo en 2023 alcanzaron las 48 toneladas (UPME, 2024).

Figura 19. Volúmenes de explotación de hierro asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

7 Manganese (Mn)

7.1 Definición, potencial geológico y titulación del manganese

El manganeso (Mn) es un metal de transición, esencial en la industria moderna. Se encuentra en el grupo 7 de la tabla periódica y presenta varios estados de oxidación, siendo el más relevante en la naturaleza el Mn^{2+} . Los minerales de manganeso más importantes son principalmente óxidos e hidróxidos como la pirolusita (MnO_2), manganita ($MnO(OH)$), y rodocrosita ($MnCO_3$), como se observa en la Tabla 5, los cuales tienen aplicaciones en la producción de acero, baterías y en la industria química (Mendoza O. H., Ceballos, Pérez, & Jiménez, 2020) (U.S. Geological Survey, 2023). Aproximadamente el 90% del manganeso extraído se destina a la producción de acero, donde se utiliza para eliminar impurezas de azufre y oxígeno, además de mejorar la dureza del material.

Los principales depósitos de manganeso a nivel global están asociados a rocas sedimentarias, donde se acumula por precipitación en ambientes marinos, y luego es enriquecido por procesos diagenéticos y metamórficos. El distrito del Kalahari en Sudáfrica alberga alrededor del 70% de los recursos mundiales de manganeso (Geology Science, 2023), (U.S. Geological Survey, 2023). En Colombia, los sectores con mayor favorabilidad geológica para albergar mineralizaciones de manganeso asociadas a rocas sedimentarias son las cordilleras Occidental y Central. Aunque deben ser considerados algunos sectores en la Cordillera Oriental (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Tabla 5. Principales minerales de manganeso y sus características

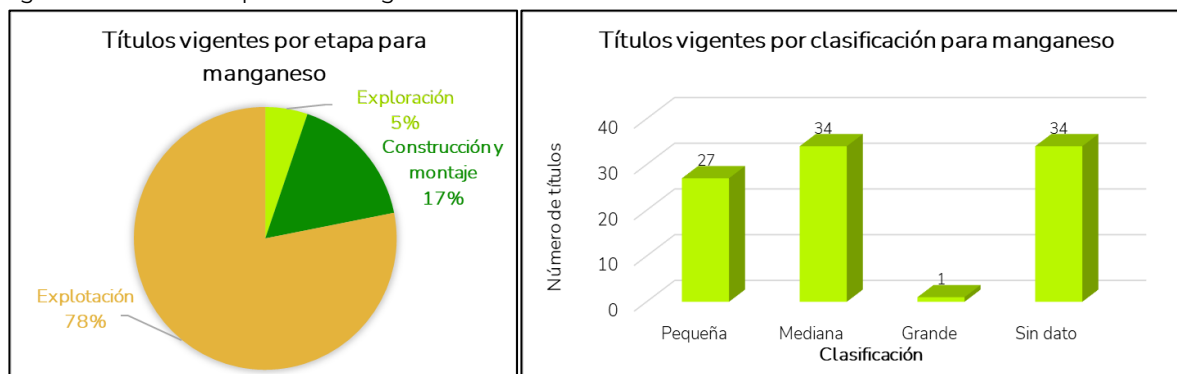
Mineral	Fórmula Química	Contenido máximo de Mn (%wt)	Descripción
Pirolusita	MnO_2	63%	Principal mineral de manganeso, asociado a depósitos sedimentarios.
Rodocrosita	$MnCO_3$	47%	Mineral hidrotermal, frecuentemente asociado con depósitos de plomo-zinc.
Manganita	$MnO(OH)$	62%	Mineral hidrotermal presente en ambientes de baja temperatura.
Braunita	$Mn^{2+}Mn^{3+}_6[O_8][SiO_4]$	50%	Óxido de manganeso presente en ambientes metamórficos.

Fuente: tomado y modificado de U.S. Geological Survey, 2023

Los prospectos en el país están reportados en depósitos volcanogénicos y estratoligados (López-Isaza, y otros, 2018). Según el Mapa Metalogénico de Colombia, versión 2022, se encuentran depósitos de óxidos e hidróxidos de Mn, Fe y en menor proporción sulfuros metálicos, vulcanogénicos estratoligados asociados con rocas metasedimentarias y rocas volcano-sedimentarias y volcánicas máficas cretácicas, así como con esquistos cuarzo-sericíticos triásicos (Sepúlveda Ospina, y otros, 2022).

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, existen 96 títulos mineros vigentes para la explotación, abarcando un total de 71.226 hectáreas. De estos, el 78% se encuentra en la etapa de explotación, el 17% en construcción y montaje, y el 5% en fase de exploración (ver Figura 20). La mediana y pequeña minería predominan, representando el 35,4% y el 28,1% de los títulos, respectivamente; mientras que 35,4% de los títulos no presentan dato para clasificación, en su mayoría debido a que se encuentran en estado de “título terminado o en proceso de liquidación”.

Figura 20. Titulación para el manganeso



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

7.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el manganeso

El manganeso es un metal fundamental para diversas industrias, siendo su aplicación más destacada en la producción de acero. Aproximadamente el 90% del manganeso extraído se emplea en la fabricación de este material, donde actúa como agente desoxidante y desulfurante, eliminando impurezas como el oxígeno y el azufre del hierro. Esta función mejora significativamente las propiedades mecánicas del acero, incrementando su resistencia y durabilidad. Los derivados para producción de acero incluyen el ferromanganeso, una aleación de hierro y manganeso, y el silicomanganeso, una aleación que, además de hierro y manganeso, contiene silicio, lo que otorga mayor ductilidad al acero. Ambos productos son esenciales para la fabricación de aceros de alta calidad (U.S. Geological Survey, 2023).

Además de su rol en la industria siderúrgica, es esencial en la producción de baterías de ion-litio, especialmente en los cátodos utilizados en baterías recargables, como las que se encuentran en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos. El auge de la electromovilidad y las energías renovables ha impulsado considerablemente la demanda de este mineral. Además, el dióxido de manganeso (MnO_2) se emplea ampliamente en la producción de pilas y baterías secas, así como en la purificación del agua. Por su parte, el sulfato de manganeso se utiliza en la agricultura como fertilizante, proporcionando este mineral como micronutriente esencial para mejorar el rendimiento de los cultivos (U.S. Geological Survey, 2023) (Geology Science, 2023).

En Colombia, se sigue un proceso de beneficio relativamente estandarizado, aunque la producción ha sido limitada en los últimos años. El proceso de beneficio del manganeso comienza con la extracción, que se realiza predominantemente a cielo abierto. Una vez extraído, el mineral bruto es sometido a procesos de trituración y molienda para reducir su tamaño y facilitar su posterior procesamiento (Servicio Geológico Colombiano, 2020). Luego, el mineral triturado pasa por un proceso de concentración gravimétrica, donde los concentradores gravimétricos permiten separar el manganeso de otros materiales, como el hierro. Este método de concentración es fundamental para reducir los costos operacionales, ya que permite obtener un mineral más concentrado antes de iniciar su purificación (Servicio Geológico Colombiano, 2020).

En las siguientes etapas, se somete a una lixiviación ácida para eliminar el hierro y otros elementos no deseados, lo que permite obtener un concentrado de mayor pureza. Posteriormente, se utiliza sulfuro de sodio (Na_2S) en el proceso de purificación para remover otros metales residuales, como cobre, níquel y zinc. Finalmente, el manganeso metálico se produce mediante un proceso de electrólisis, donde el dióxido de manganeso se deposita en el ánodo y el manganeso metálico se recolecta en el cátodo. Este método es esencial para obtener manganeso de alta pureza, que luego se utiliza en la industria siderúrgica y en la fabricación de baterías.

8 Carbón metalúrgico

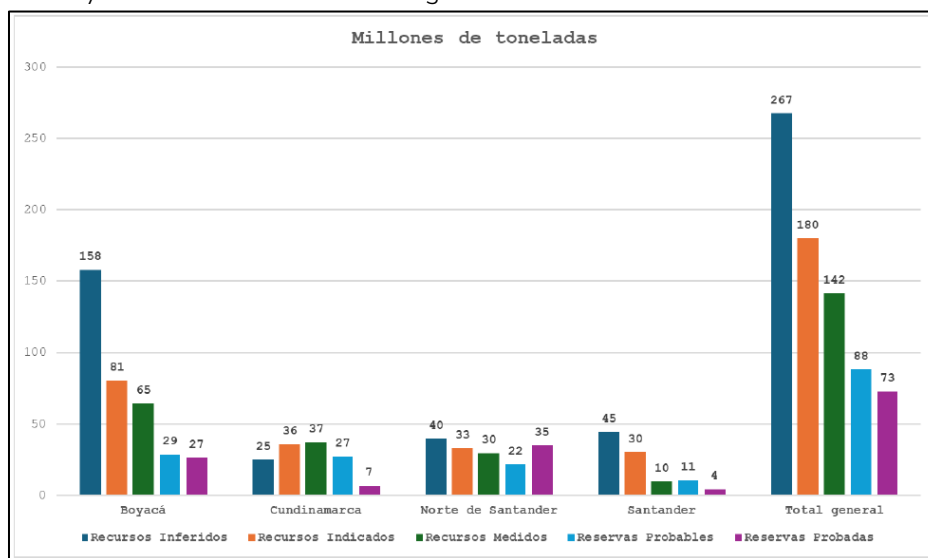
8.1 Definición, potencial geológico y titulación de carbón metalúrgico

El carbón es una roca sedimentaria, combustible, de color negro, que contiene más del 50% en peso y más del 70% en volumen de material carbonoso, incluida la humedad inherente; formado a partir de la compactación y endurecimiento de restos vegetales alterados de diversas formas, es decir, generado por los cambios de presión y temperatura. Las diferencias en los tipos de materiales vegetales (tipo), en el grado de metamorfismo (rango) y en el rango de impurezas (grado) son características del carbón y se utilizan en la clasificación (U.S. Bureau of Mines, 1996)

Particularmente el carbón metalúrgico tiene mayor poder calorífico, menor contenido de humedad, mayor contenido de carbono y carácter aglomerante, lo que permite su coquización (Rincón M., y otros, 2011). Esto implica que, cuando se somete a altas temperaturas en ausencia de aire, sufre una serie de reacciones químicas obteniéndose un sólido conocido como **coque**, el cual es esencial en la industria siderúrgica como fuente de combustible y agente reductor (Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento, 2024).

El mayor potencial de carbón metalúrgico se encuentra en los departamentos de Boyacá (45%), Cundinamarca (26%), Norte de Santander (24%) y Santander (5%), el cual corresponde al 11% del potencial del carbón total en el país (Rincón M., y otros, 2011). Según la Agencia Nacional de Minería, a febrero de 2024, 73 titulares mineros reportaron recursos y reservas de carbón metalúrgico, tal como se muestra en la Figura 21.

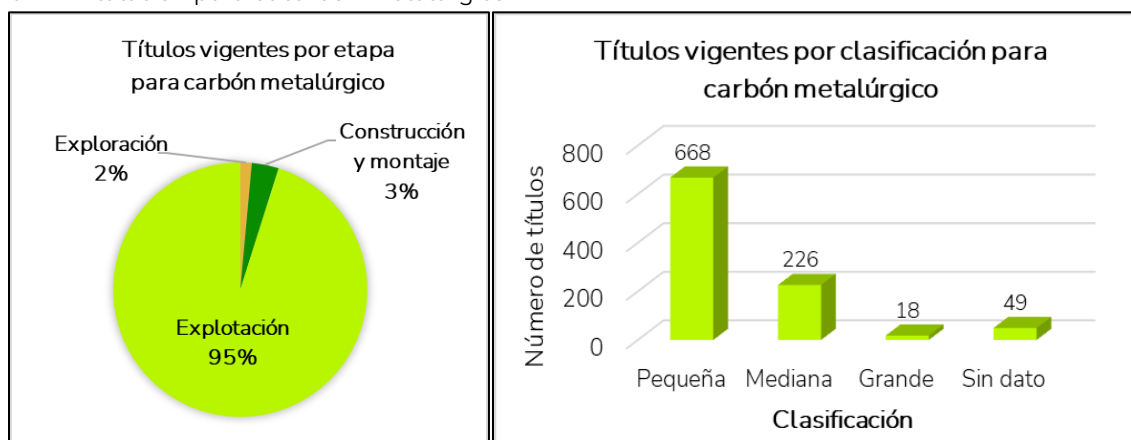
Figura 21. Recursos y reservas de carbón metalúrgico



Fuente: tomado de ANM, 2024 (Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento, 2024)

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 961 títulos vigentes que contienen carbón metalúrgico como mineral, correspondientes a 499.054 hectáreas. 914 de los títulos (95%) están en etapa de explotación, 3% en etapa de construcción y montaje y 2% en exploración como se ve en la Figura 22. Se distribuye mayormente en pequeña y mediana minería con 70% (668) y 24% (226) respectivamente y la mayoría de los títulos que no presentan dato en la base de información se encuentran con el estado de título “terminado o en proceso de liquidación”.

Figura 22. Titulación para el carbón metalúrgico



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

8.2 Usos del carbón metalúrgico, coque y procesos de beneficio

El carbón metalúrgico se usa principalmente para su transformación en coque, ya que este material es primordial en la industria del acero. El coque también se utiliza en la industria de la fundición de

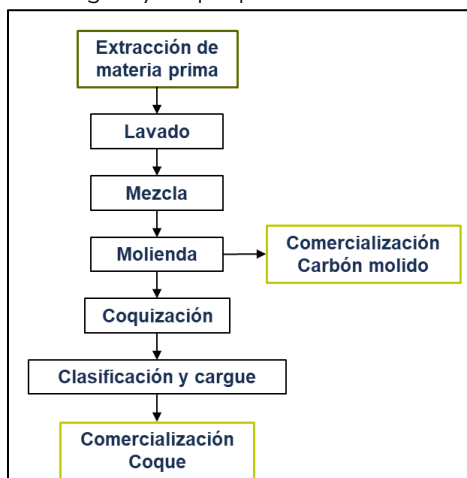
metales no ferrosos o para la preparación de carburo de calcio, disulfuro de carbono, fósforo y otros elementos (Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento, 2024). La coquización consiste en un proceso de pirólisis al carbón metalúrgico, el cual pretende eliminar la materia volátil, convirtiéndolo en un material fuerte y poroso. Normalmente, de 1 tonelada de carbón se producen 0,65 –0,73 toneladas de coque y de 5 a 10% de residuos (UPME, EY & JTBOYD, 2018).

Dentro de otros usos o aplicaciones del carbón se encuentran las aleaciones de carbono, la fibra de carbono, los filtros para agua y aire, la producción de grafeno, entre otros. Actualmente hay desarrollos tecnológicos en los que se analiza su capacidad y uso en la elaboración de electrodos para baterías de iones de litio y supercapacitadores, en la conductividad térmica y en nanotubos de carbón. También se analiza la posibilidad de extraer elementos de tierras raras del carbón (UPME, EY & JTBOYD, 2018).

El proceso de producción del coque metalúrgico considera (C.I. Milpa S.A, 2023):

- I. Explotación: el carbón metalúrgico en Colombia se extrae principalmente de manera subterránea
- II. Lavado: el material extraído de la mina se lava para retirar los materiales inertes y dejar solo el carbón.
- III. Mezcla: de acuerdo con la calidad de coque requerido se realiza la mezcla con diferentes carbones coquizables.
- IV. Molienda: se realizan procesos de molienda, de donde el material puede venderse así o pasar a la coquización.
- V. Coquización: proceso a través del cual, al someter el carbón a altas temperaturas sufre un proceso de destilación, ablandamiento y re - solidificación convirtiéndose en coque.
- VI. Clasificación y cargue: el coque es separado por tamaños por medio de cribas y una vez clasificado se carga para transporte al cliente.
- VII. Comercialización: se exporta por medio de operación portuaria o se vende al interior del país según el destino final del material (ver Figura 23).

Figura 23. Producción de carbón metalúrgico y coque para comercialización



Fuente, elaboración propia con base en información de Milpa S.A.

En entrevista con Miguel Parra, fundador de la empresa C.I. Milpa S.A. se identificaron algunas dificultades en temas de comercialización del coque, especialmente por los costos de transporte y las debilidades en la malla vial del país. Milpa S.A. junto con otras empresas mineras de carbón y coquizadores realizaron un estudio para analizar la posibilidad de enviar la carga por tren hasta Santa Marta. Sin embargo, el tipo de trocha que maneja actualmente el tren, la dificultad para transportar el coque debido a los múltiples traslados del material (donde podría verse afectado su tamaño y/o calidad), el tipo de ruta con el que se cuenta actualmente y las dificultades de financiación para compra de predios, ampliación y complemento de las rutas, son solo algunas de las grandes dificultades para abordar esta posibilidad.

Otra gran dificultad que maneja esta industria son los costos energéticos, ya que en los hornos de coquización se requieren temperaturas mayores a 1300°C. En este sentido, cada empresa desarrolla medios que permitan disminuir esos costos o, en algunos casos, están implementando fuentes no convencionales de energía para proveer parte de la necesidad energética tanto en las minas como en las plantas de lavado y hornos de coquización.

Vale la pena identificar las dificultades ambientales que puedan presentarse, ya que algunos municipios donde actualmente se desarrolla minería para extracción de carbón coquizable se encuentran en zona de páramo o de preservación ambiental, por lo que existe la posibilidad de que se prohíban las labores mineras. Sin embargo, de acuerdo con lo establecido en la Ley 1930 de 2018, el Ministerio de Minas y Energía debe diseñar programas de sustitución y reconversión de pequeños mineros tradicionales (Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento, 2024).

8.3 Producción y oferta de carbón metalúrgico¹

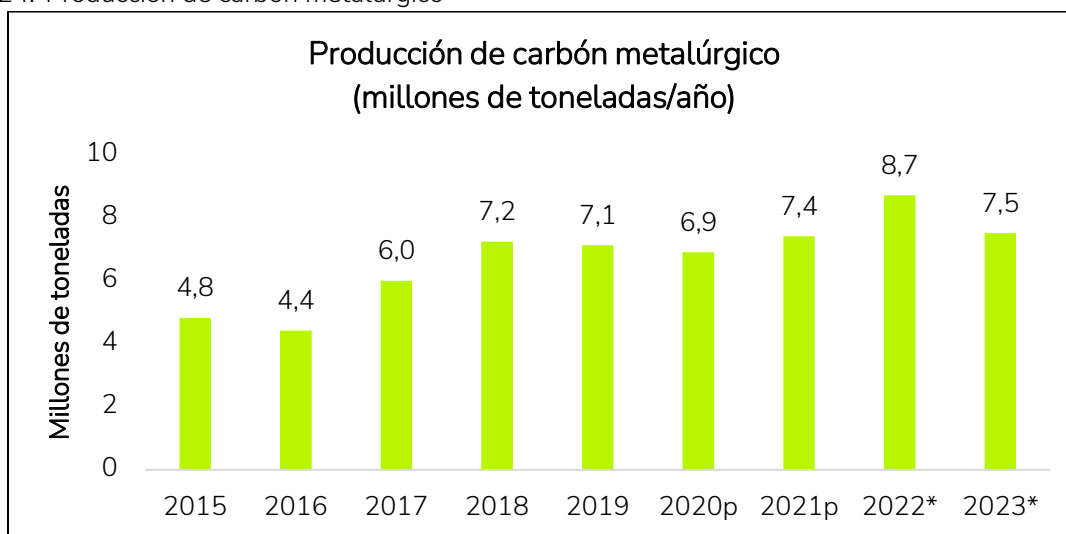
Entre 2015 y 2023, la producción de carbón metalúrgico ha estado en promedio en el orden de los 6,7 millones de toneladas por año (ver Figura 24). Los departamentos del centro - oriente del país concentran la mayoría de la producción nacional del mineral, ya que, como se ha mencionado previamente Boyacá –Cundinamarca, Santander y Norte de Santander poseen la mayoría de yacimientos productivos en la actualidad

La mayor parte del mineral explotado se destina al consumo interno (84%) para la elaboración de coque, el principal uso de este mineral es la producción coque para la industria siderúrgica. En este sentido, Colombia se ha consolidado como uno de los principales exportadores de coque a nivel mundial y ocupa el tercer lugar después de China y Polonia. El restante de producción (16%) se

¹ Dado que la información disponible en la Agencia Nacional de Minería sobre volúmenes de explotación de carbón en el país no permite tener datos desagregados para carbón metalúrgico, la serie entre 2015 y 2023 se construye a partir de la información de producción de la cuenta satélite (2015 – 2021) y para los años 2022 y 2023 se utiliza la información estimada por la ANM, la cual supone que para producir 1 tonelada de coque se requiere aproximadamente 1,5 toneladas de carbón metalúrgico.

exporta en su mayoría a países como Brasil, China, Polonia + Reino Unido y Turquía (Wood Mackenzie, 2024).

Figura 24. Producción de carbón metalúrgico



Fuente, Elaboración propia con base en información de la cuenta satélite del DANE y ANM.

*Información estimada por parte de la ANM a partir de la producción del coque.

9 Fosfatos (roca fosfórica y fosfática)

9.1 Definición, potencial geológico y titulación de los fosfatos

La roca fosfórica es un recurso mineral clave para la producción de fertilizantes debido a su alto contenido de fósforo, un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas. Este mineral, compuesto principalmente por apatito, se encuentra en depósitos distribuidos en diversas regiones del mundo, siendo Marruecos, China y Estados Unidos los países con las mayores reservas de roca fosfórica a nivel global (El Bamiki, y otros, 2021). En Colombia, los depósitos de roca fosfórica de mayor importancia se localizan en la Cordillera Oriental, donde el contenido de P_2O_5 varía entre el 20% y el 30%, lo que hace que estos depósitos sean viables para su aprovechamiento (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

Los depósitos de fosfatos tienen dos orígenes principales: sedimentarios e ígneos. Los depósitos sedimentarios, que representan el 90% de la producción mundial, se forman en ambientes marinos someros a lo largo de márgenes continentales, siendo Marruecos y China las principales regiones con grandes reservas. Los depósitos ígneos, aunque menos comunes, son valiosos por su pureza y menor contenido de contaminantes, como el cadmio, lo que los hace atractivos para usos industriales. Se encuentran en regiones como Rusia y Brasil, y pueden estar asociados a la extracción de tierras raras y uranio (El Bamiki, y otros, 2021). En la Tabla 6 se presentan los principales minerales de fósforo y sus características comunes.

Tabla 6. Principales minerales de fósforo y sus características

Mineral	Fórmula química	Contenido máximo de P_2O_5 (%wt)	Contenido de Fósforo (%wt)	Descripción
Apatita	$Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	41	17,9	Es el principal mineral que contiene fósforo, presente en depósitos sedimentarios y metamórficos.
Fluorapatita	$Ca_5(PO_4)_3F$	41,2	18,0	Variedad de apatita rica en flúor, común en depósitos de fosfatos y de gran importancia industrial.
Clorapatita	$Ca_5(PO_4)_3Cl$	40,5	17,7	Apatita rica en cloro, menos frecuente pero presente en algunos depósitos fosfatados.
Monacita	$(Ce,La,Nd,Th)PO_4$	29,5	12,9	Mineral que contiene tierras raras y fósforo, se encuentra en depósitos de fosfatos asociados a elementos radiactivos.
Xenotima	YPO_4	28,4	12,4	Un fosfato de itrio que contiene fósforo, asociado con tierras raras en yacimientos fosfatados.

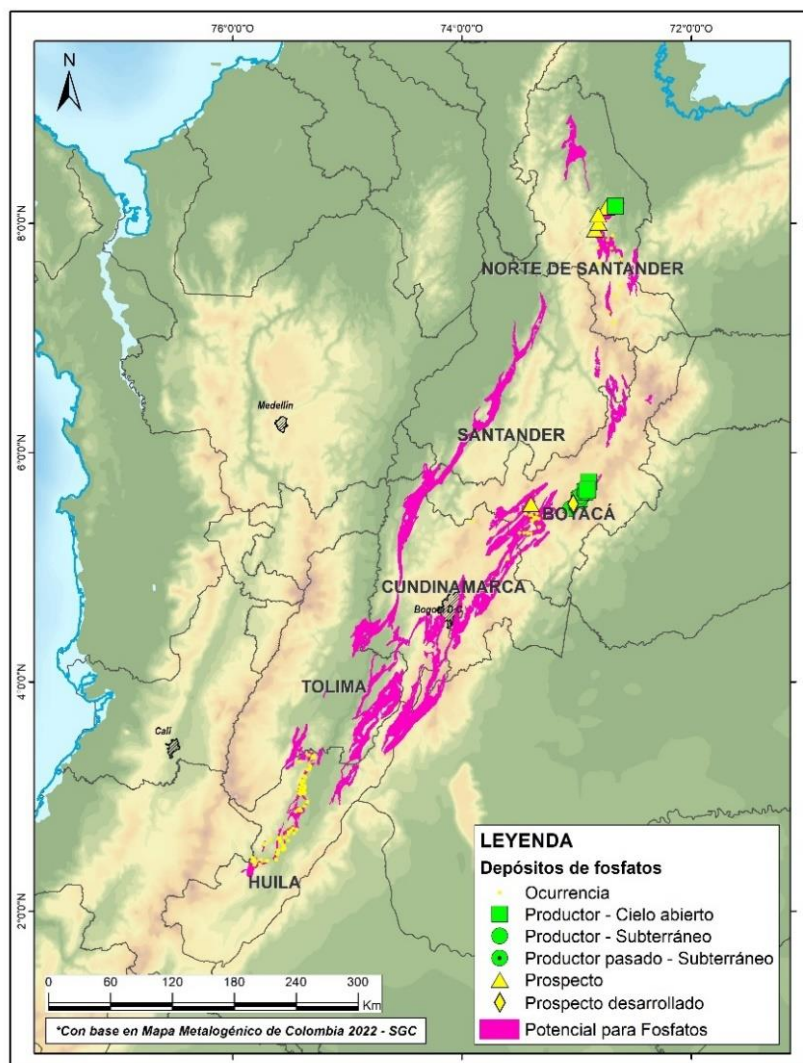
Fuente: tomado y modificado de (Reimann & Caritat, 1998), (Greenwood & Earnshaw, 1997)

En Colombia existe un considerable potencial geológico, con yacimientos y ocurrencias de roca fosfórica y fosfática en los departamentos de Boyacá, Huila, Tolima y Norte de Santander. Las mayores concentraciones de ocurrencias y depósitos de roca fosfórica se encuentran asociados a rocas sedimentarias cretácicas de la Cordillera Oriental (e.g., formaciones Lidita Superior, Arenisca Dura y La Renta en los departamentos de Boyacá y Santander) y el Valle Superior del Magdalena (e.g., Grupo Oliní y Formación Yaguará en los departamentos de Tolima y Huila) (Sepúlveda Ospina, y otros, 2022).

El Servicio Geológico Colombiano ha identificado varias zonas con alto potencial geológico para el aprovechamiento de roca fosfórica o fosfática. En municipios como Aipe, Palermo, Yaguará (Huila), Ataco (Tolima), Tunja o Ramiriquí (Boyacá) se han identificado nuevas áreas con viabilidad para la explotación de fosfatos, incrementando las expectativas sobre el desarrollo económico de estos recursos para cubrir la demanda interna y la posibilidad de exportaciones (Martin, y otros, 2020) (Terraza, Martin, Martínez, Rojas, & Rojas, 2019). En la Figura 25 se aprecian las zonas de alto potencial para fosfatos en el país.

En los últimos años, la Agencia Nacional de Minería (ANM) ha impulsado la titulación de estos recursos mediante estudios geológicos y licitaciones mineras, garantizando que la explotación de los fosfatos se realice de manera eficiente y sostenible. Este enfoque asegura el desarrollo de proyectos mineros que puedan contribuir a la seguridad alimentaria y al crecimiento económico del país (ANM, 2023).

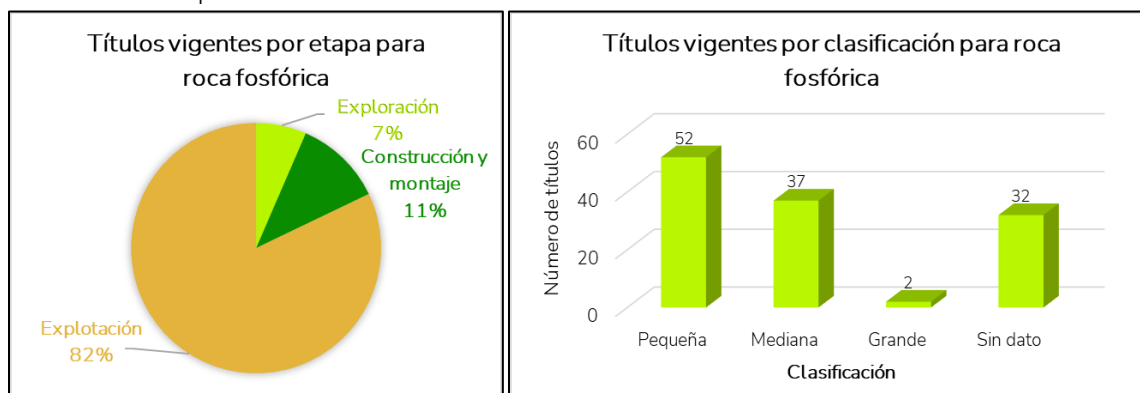
Figura 25. Mapa de localización de zonas con potencial y ocurrencias de fosfatos



Fuente: elaboración propia con base en el Mapa Metalogénico de Colombia, versión 2022 (Sepúlveda Ospina, y otros, 2022)

Según los datos del Sistema Integral de Gestión Minera Anna Minería, con fecha de consulta 31 de octubre de 2024, existen 123 títulos vigentes que incluyen fosfatos y sus minerales asociados como mineral principal, abarcando un área de aproximadamente 75.889 hectáreas. De estos títulos, el 82% están en etapa de explotación, el 11% en construcción y montaje, y el 7% en exploración. Estos títulos se distribuyen principalmente entre la pequeña y mediana minería, representando el 42,3% y el 30,1% de la distribución total, respectivamente (ver Figura 26). Además, aquellos títulos que no presentan dato de clasificación se encuentran en estado “título terminado o en proceso de liquidación”.

Figura 26. Titulación para la roca fosfática



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

9.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para fosfatos

La roca fosfórica se utiliza principalmente en la elaboración de fertilizantes, pues representa uno de los tres macronutrientes que necesitan las plantas, junto con el nitrógeno y el potasio. También se puede utilizar como suplemento nutritivo en la alimentación animal y en muy menor proporción en otras aplicaciones industriales y alimentarias. La producción de fertilizantes fosfatados representa más del 90% de uso de este mineral (CRU Consulting & Unidad de Planeación Minero Energética, 2018).

La roca fosfórica extraída en Colombia pasa por un proceso de beneficio diseñado para optimizar su uso, especialmente en la industria de los fertilizantes. El proceso comienza con la trituración y molienda, donde las rocas extraídas de las minas son reducidas a partículas más pequeñas. Este paso facilita la separación de los componentes deseados de las impurezas y un tamaño de partícula adecuado para los procesos de concentración que siguen. Posteriormente, se realiza la flotación, un proceso fisicoquímico que utiliza reactivos para separar los minerales fosfatados de las impurezas. Durante este proceso, las partículas de fósforo se adhieren a burbujas de aire generadas en una celda de flotación, lo que permite que floten, separándose de las partículas no deseadas, que se hunden. Este método es altamente efectivo para concentrar el fósforo, eliminando materiales como arcillas, sílice y otros minerales de ganga, comúnmente presentes en los depósitos fosfáticos sedimentarios (El Bamiki, y otros, 2021).

En algunas instalaciones, se realiza un proceso adicional clave conocido como acidulación, donde la roca fosfórica es tratada con ácido sulfúrico para producir ácido fosfórico. Este ácido es un insumo esencial en la producción de fertilizantes solubles en agua, como el fosfato monoamónico (MAP) y el fosfato diamónico (DAP). La acidulación transforma el fósforo de la roca en una forma que las plantas pueden absorber fácilmente, lo que mejora la eficiencia de los fertilizantes en el sector agrícola (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

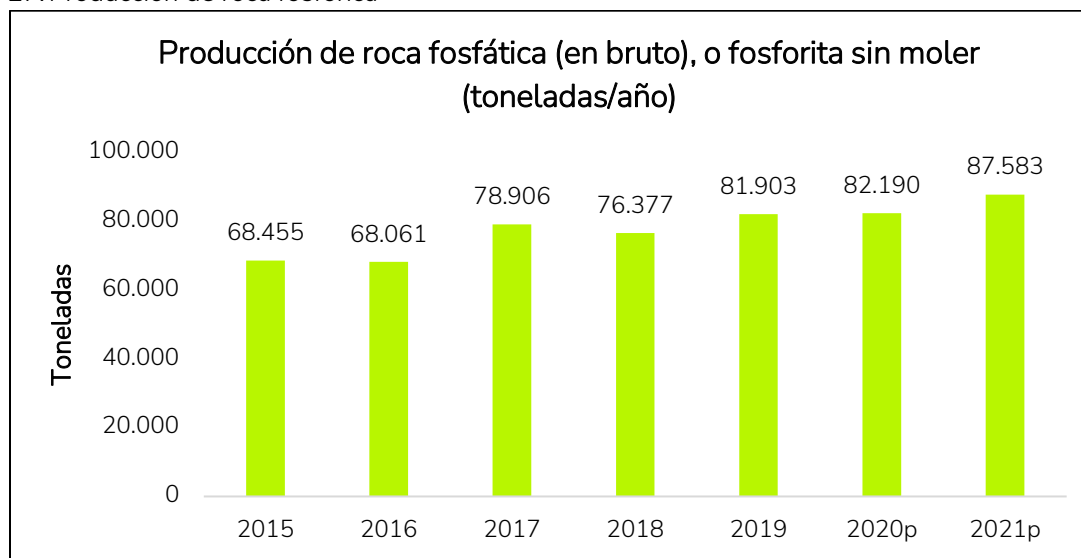
Tras estos procesos, la roca fosfórica beneficiada se somete a secado para eliminar la humedad residual, asegurando que el producto esté listo para su almacenamiento y transporte, además de

garantizar su estabilidad química. El producto final puede comercializarse en diversas formas, como roca triturada, concentrado de fósforo o productos derivados, como el ácido fosfórico y fertilizantes granulados (Servicio Geológico Colombiano, 2016). En Colombia, los procesos de beneficio se han adaptado para optimizar el aprovechamiento de los depósitos fosfáticos ubicados en Boyacá, Huila y Norte de Santander. Esta optimización ha permitido que la industria local no solo cubra las demandas del mercado interno, sino que también explore oportunidades de exportación de productos derivados de alto valor agregado, como fertilizantes solubles y ácido fosfórico (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

9.3 Producción y oferta de fosfatos

Entre 2015 y 2021, la producción de roca fosfórica y/o fosfática ha estado en promedio en el orden de las 77 mil toneladas por año (ver Figura 27), con tres departamentos que concentran la mayoría de la producción nacional del mineral: Boyacá Huila y Norte de Santander. La mayor parte del mineral explotado se destina a la producción de fertilizantes nacionales. Por su parte, durante el mismo período de tiempo las exportaciones de roca fosfórica han sido marginales y en promedio han estado alrededor de las 476 toneladas (UPME, 2024)

Figura 27. Producción de roca fosfórica



Fuente: elaboración propia con base en cifras de la Cuenta Satélite Minera del DANE

10 Minerales de Magnesio (Mg)

10.1 Definición, potencial geológico y titulación de minerales de Magnesio (Mg)

El magnesio (Mg) es un metal alcalinotérreo, ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales debido a su bajo peso, resistencia mecánica y capacidad para formar aleaciones con otros metales como el aluminio y el zinc. En la naturaleza, el magnesio se encuentra en más de 60 minerales, aunque solo algunos de ellos son de interés comercial. Estos se encuentran en

diferentes contextos geológicos como rocas sedimentarias, metamórficas y ultramáficas (U.S. Geological Survey, 2023).

Además de los minerales primarios de magnesio, como la magnesita y la dolomita, otros minerales asociados, como el olivino y la enstatita, lo que incrementa el potencial geológico del país para su explotación. A continuación, se presenta la Tabla 7 que resume los principales minerales de magnesio, sus fórmulas químicas, contenido de magnesio y sus aplicaciones comerciales más comunes.

Tabla 7. Principales minerales de magnesio y sus características

Mineral	Fórmula Química	Contenido máximo de Mg (%wt)	Descripción
Magnesita	$MgCO_3$	47,6%	Principal fuente de magnesio, utilizada para la producción de óxido de magnesio (MgO) y en la industria de refractarios
Dolomita	$CaMg(CO_3)_2$	22%	Mineral sedimentario utilizado en la industria de la construcción, especialmente en la producción de cemento
Brucita	$Mg(OH)_2$	41,7%	Se encuentra en depósitos hidrotermales, es una fuente importante de magnesio para procesos de neutralización
Olivino	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	48,5%	Mineral común en rocas máficas y ultramáficas, utilizado en refractarios y como fuente de magnesio en la industria de aleaciones
Serpentina	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	43%	Formado por la alteración de olivino y piroxenos, empleado en la producción de fibras aislantes y materiales de construcción

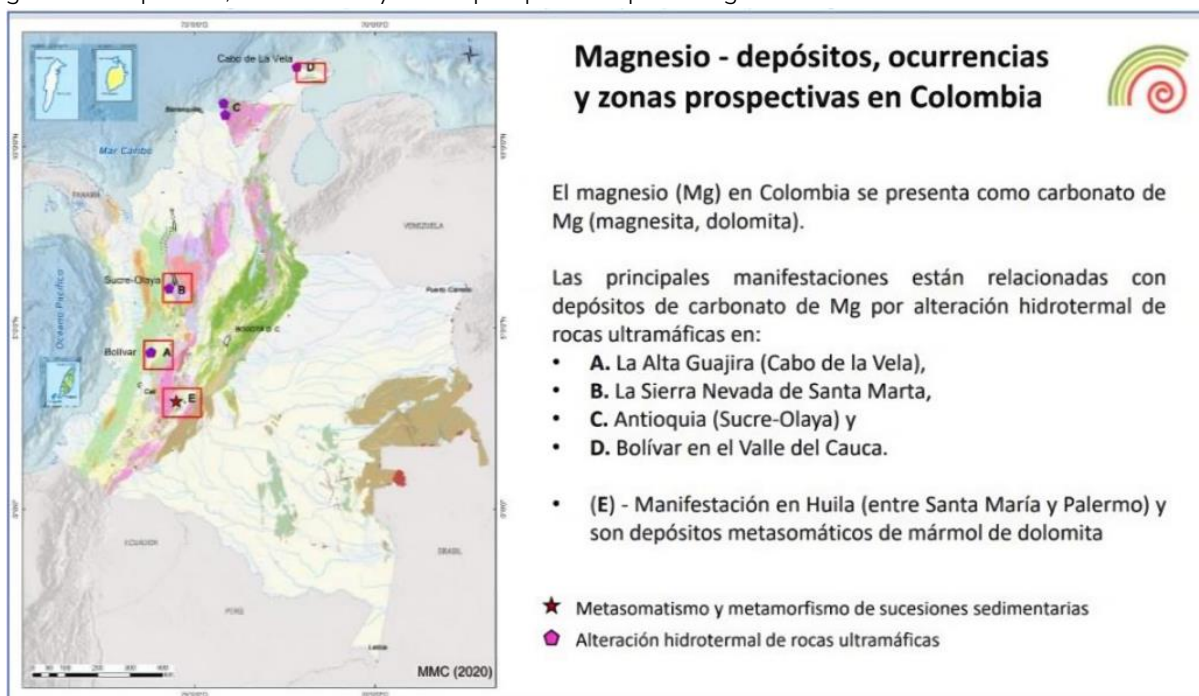
Fuente: tomado y modificado de (U.S. Geological Survey, 2023) (Nature Communications, 2022)

Colombia tiene un gran potencial geológico para la explotación de minerales de magnesio, principalmente en las Cordilleras Central y Occidental, así como en la Sierra Nevada de Santa Marta. Estas áreas geográficas son ricas en rocas máficas y ultramáficas, las cuales contienen elevadas concentraciones de óxido de magnesio (MgO). Según el Atlas Geoquímico de Colombia, se han identificado concentraciones de hasta 20,77% de MgO, con una mediana de 0.88% en los sedimentos analizados, destacando regiones como el Batolito Antioqueño y otras formaciones del Jurásico y Cretácico que presentan un gran potencial para la explotación (Mendoza O. G., Ceballos, Pérez, Castellanos, & Rincón, Magnesio (MgO), 2020). En algunas áreas del Batolito de Ibagué y en las formaciones volcánicas de Tolima, las concentraciones alcanzan hasta 8.75% de MgO, lo que confirma el valor geológico del magnesio en estos territorios.

Por otro lado, la presencia significativa de magnesio en formaciones volcánicas y plutónicas, con altos valores de óxido de magnesio en sectores como Risaralda y Quindío, donde las serpentinitas y las rocas ultramáficas serpentinizadas presentan concentraciones que superan el 12% de MgO.

Esto refuerza el hecho de que el país tiene un potencial importante para el desarrollo de una industria minera orientada hacia la producción de magnesio (Universidad Nacional de Colombia, 2017). En la Figura 28 se observa la localización de depósitos, ocurrencias y zonas prospectivas para magnesio en el país.

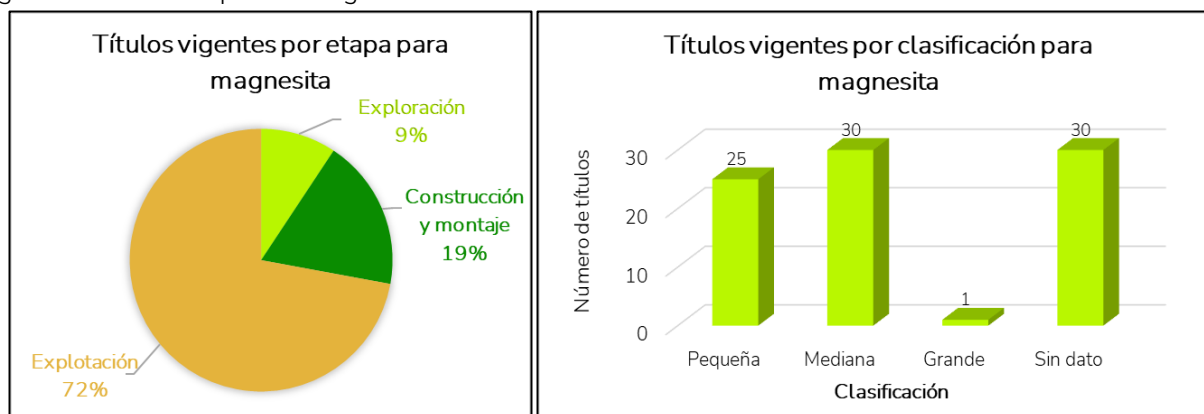
Figura 28. Depósitos, ocurrencias y zonas prospectivas para magnesio en Colombia



Fuente: (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023)

En cuanto a la titulación de los minerales de magnesio en Colombia, los datos del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, al 31 de octubre de 2024, indican que existen 86 títulos vigentes relacionados con la explotación de magnesita, cubriendo un total de 68.849 hectáreas. De estos títulos, el 72% están en etapa de explotación, el 19% en etapa de construcción y montaje, y el 9% en etapa de exploración. La mayor parte de la explotación de magnesio en Colombia está vinculada a la pequeña y mediana minería, con el 29% de los títulos concentrados en pequeña minería, el 35% en mediana minería y solo el 1% como gran minería (ver Figura 29). El 35% restante no presentan dato, y en su mayoría se trata de títulos que se encuentran en estado “título terminado o en proceso de liquidación”

Figura 29. Titulación para la magnesita



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

10.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el magnesio

El magnesio (Mg) es un metal fundamental en múltiples industrias debido a su combinación única de propiedades como su bajo peso, alta resistencia y capacidad para formar aleaciones. Estas características hacen que el magnesio sea ampliamente utilizado en sectores como la automoción, la aeronáutica, la biomedicina y la industria química. Además, el magnesio tiene aplicaciones estratégicas en la producción de productos derivados y en procesos industriales que son cruciales para el desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en energías renovables y fabricación de materiales avanzados.

En la industria automotriz y aeroespacial, el magnesio es valorado principalmente por su capacidad para reducir el peso de los componentes estructurales, lo que mejora la eficiencia del combustible y la maniobrabilidad de los vehículos y aeronaves. Las aleaciones de magnesio se emplean en la fabricación de componentes como cajas de cambios, volantes, columnas de dirección y carcasas de motores, donde la reducción de peso puede marcar una gran diferencia en términos de desempeño energético. Además, las aleaciones de magnesio también son importantes en la fabricación de dispositivos electrónicos portátiles, como carcasas de teléfonos móviles y ordenadores portátiles, debido a su ligereza y durabilidad (Tan & Ramakrishna, 2021).

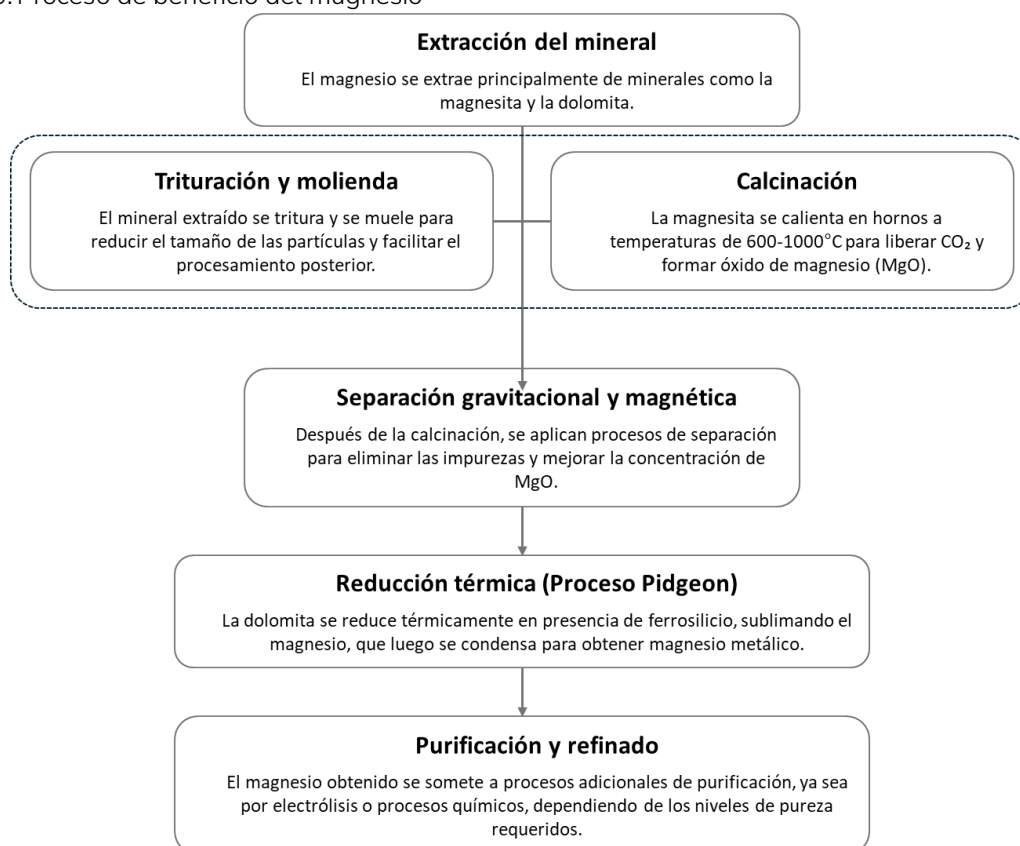
En el ámbito de la biomedicina, el magnesio está ganando terreno como material para implantes bioabsorbibles, utilizados en la regeneración ósea y en dispositivos médicos temporales. Su capacidad para biodegradarse de forma segura dentro del cuerpo lo convierte en una opción prometedora para mejorar la compatibilidad de los implantes y reducir los riesgos a largo plazo (Tan & Ramakrishna, 2021).

El magnesio también tiene aplicaciones clave en la industria química. Uno de los derivados más importantes es el óxido de magnesio, que se utiliza como material refractario en la producción de acero y cemento, así como en el tratamiento de aguas y la neutralización de ácidos. Su resistencia al calor y la corrosión lo convierte en un material indispensable en industrias que operan a altas temperaturas, como las siderúrgicas y las plantas de cemento (U.S. Geological Survey, 2023).

En cuanto a los procesos de beneficio del magnesio, existen varias técnicas que permiten extraer y purificar el mineral para sus diferentes aplicaciones industriales. El proceso de calcinación es una de las etapas más importantes en el tratamiento de la magnesita (MgCO_3), donde se calienta a temperaturas de 600 a 1000°C para eliminar el CO_2 y producir óxido de magnesio. Este óxido puede luego purificarse mediante métodos como la separación gravitacional y la separación magnética, que se utilizan para separar el MgO de los minerales de ganga, como el talco y la calcita (Frangiskos & Kontopoulos, 1976).

Otro método importante es el proceso Pidgeon, el cual es ampliamente utilizado en la producción de magnesio metálico. Este proceso consiste en la reducción térmica de dolomita en presencia de ferrosilicio, donde el magnesio se sublima y luego se condensa para obtener magnesio metálico de alta pureza. Este método es especialmente popular en China, que es el mayor productor mundial de magnesio (Metalcess, 2023). El magnesio también se extrae a través de métodos químicos. En estos casos, se utilizan ácidos o sales amónicas para disolver selectivamente el magnesio de su mineral fuente, y luego se recupera mediante precipitación o cristalización. Este método es útil cuando se requiere magnesio de alta pureza para aplicaciones en la industria de alta tecnología (Metalcess, 2023). Estos procesos se pueden apreciar en la Figura 30.

Figura 30. Proceso de beneficio del magnesio

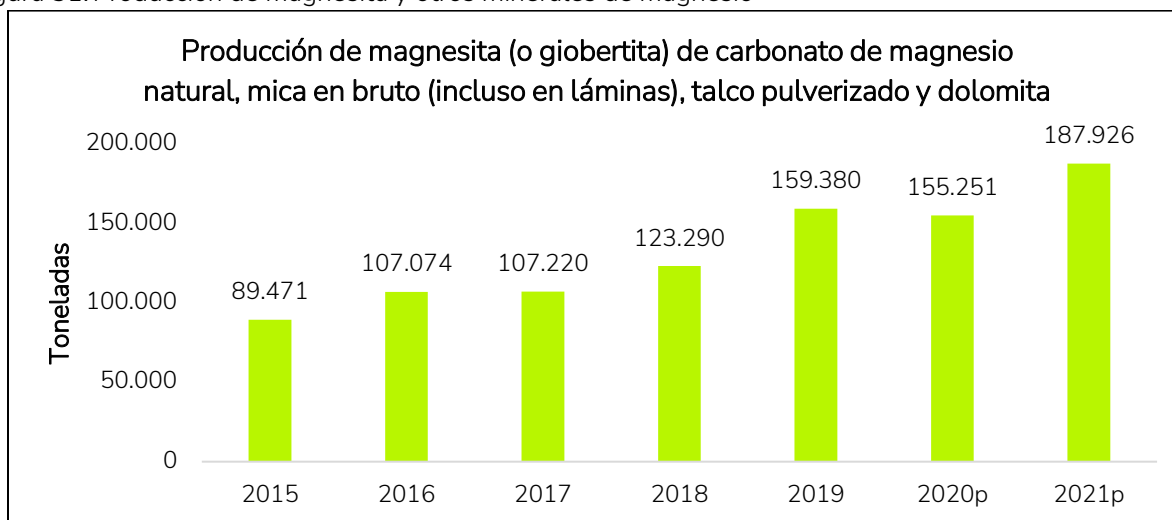


Fuente: elaboración propia con base en Metalcess (2023)

10.3 Producción y oferta del magnesio

Entre 2015 y 2021, la producción de magnesio, que incluye magnesita, carbonato de magnesio, dolomita, talco pulverizado y mica en bruto, estuvo en promedio en el orden de las 132 mil toneladas por año (ver Figura 31). La mayor parte del mineral explotado se destina al consumo interno.

Figura 31. Producción de magnesita y otros minerales de magnesio



Fuente: elaboración propia con base en cifras de la Cuenta Satélite Minera del DANE

11 Bauxita y demás minerales de Aluminio

11.1 Definición, potencial geológico y titulación de la bauxita y demás minerales de aluminio

La bauxita es una roca sedimentaria rica en hidróxidos de aluminio, compuesta principalmente por los minerales gibbsita, bohemita y diásporo. Estos minerales pertenecen al grupo de los hidróxidos de aluminio y se forman a través de procesos de meteorización intensa en climas tropicales y subtropicales. Algunos de estos se describen en la Tabla 8. Durante la meteorización, componentes solubles como la sílice son lixiviados, lo que deja una concentración residual de óxidos e hidróxidos de aluminio. Los depósitos se clasifican en dos tipos principales: lateríticos, que se desarrollan por la meteorización *in situ* de rocas madre en climas cálidos y húmedos; y kársticos, que se forman por la disolución de rocas carbonatadas en ambientes más templados (U.S. Geological Survey, 2023).

La gibbsita es el mineral predominante en los depósitos de bauxita formados en condiciones húmedas, mientras que la bohemita y el diásporo son más comunes en depósitos más antiguos o en condiciones más secas. Estos minerales son fundamentales en la producción de alúmina (Al_2O_3), que es el insumo esencial para la obtención de aluminio. La bauxita, como principal fuente de estos minerales, es crucial para la industria del aluminio, que depende de procesos como la

conversión de la alúmina en aluminio metálico, utilizado en una amplia gama de aplicaciones industriales (Schulte & Foley, 2013).

Tabla 8. Principales minerales de aluminio y sus características

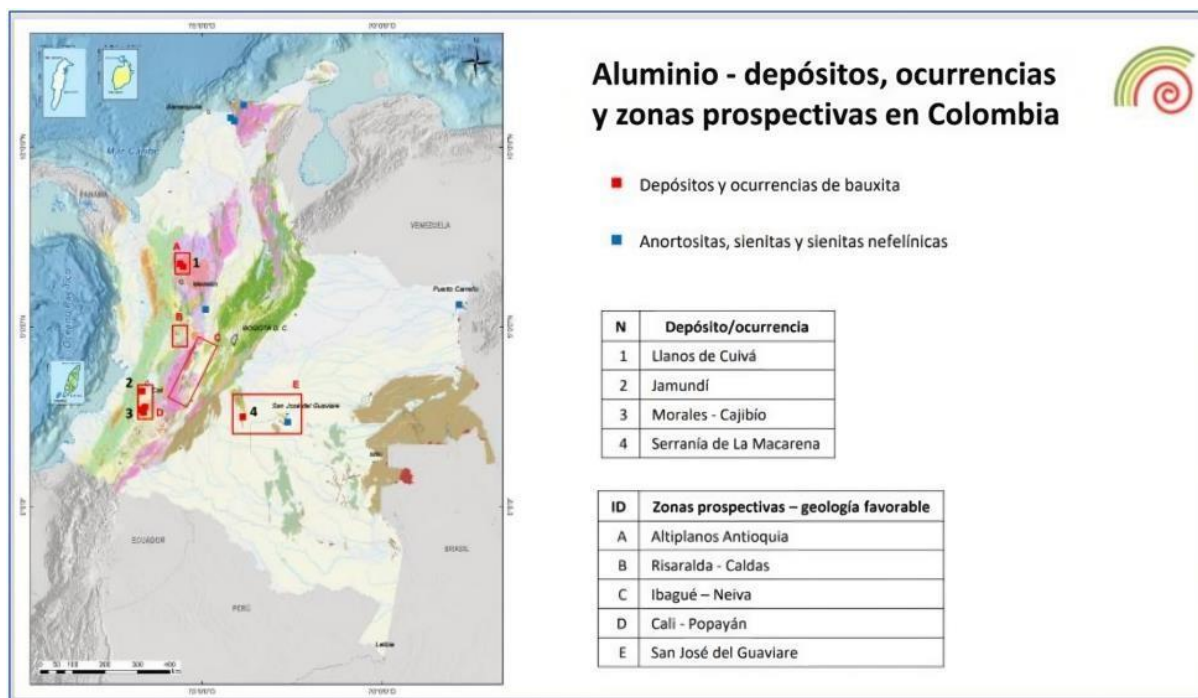
Mineral	Fórmula química	Contenido máximo de Al (%wt)	Descripción
Gibbsita	$Al(OH)_3$	34,6	Mineral principal de la bauxita, formado en ambientes tropicales. Es una fuente directa de alúmina.
Bohemita	$AlO(OH)$	52,7	Mineral de bauxita presente en zonas tropicales, es una fase intermedia de alúmina, más estable que la gibbsita.
Diásporo	$AlO(OH)$	52,7	Similar a la bohemita, se encuentra en depósitos de bauxita más antiguos o en zonas montañosas.
Corindón	Al_2O_3	52,9	Mineral muy duro, utilizado en abrasivos y aplicaciones industrial.
Espinela	$MgAl_2O_4$	28,2	Mineral refractario y resistente a altas temperaturas, usado en la industria de cerámicas y abrasivos.

Fuente: tomado y modificado de (U.S. Geological Survey, 2023) y (Schulte & Foley, 2013)

A nivel global, las mayores reservas de bauxita están en Guinea, Australia y Brasil, que juntas concentran más del 60% de las reservas conocidas. En América, Brasil lidera la producción con importantes reservas en la Amazonía, mientras que Jamaica y Surinam también poseen depósitos significativos. Estos países cuentan con una sólida infraestructura para el procesamiento de bauxita y la producción de aluminio, siendo actores clave en el mercado global (Schulte & Foley, 2013).

En Colombia, los depósitos son más limitados, y están localizados principalmente en los departamentos de Valle del Cauca (Jamundí) y Cauca (Morales-Cajibío), tal como se observa en la Figura 32. Estos depósitos son el resultado de la meteorización de rocas volcánicas, pero no han sido aprovechados de manera intensiva debido a la falta de infraestructura para el procesamiento del aluminio en el país (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

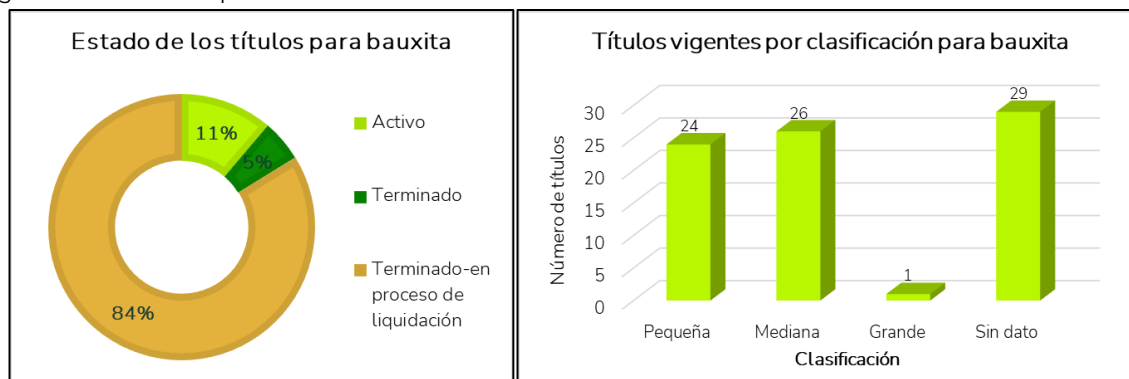
Figura 32. Depósitos, ocurrencias y zonas prospectivas para aluminio en Colombia



Fuente: (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023)

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 80 títulos vigentes para el aprovechamiento de bauxita, abarcando un área de aproximadamente 62.070 hectáreas. De estos títulos, el 74% se encuentran en etapa de explotación, el 17% en fase de construcción y montaje, mientras que el 9% restante está en la etapa de exploración. Por su parte, la mayoría se clasifican como pequeña o mediana minería, con 30% y 33% de los títulos respectivamente, mientras que para gran minería solamente se tiene 1% (ver Figura 33). Aunque estos títulos se encuentran en estas etapas y clasificación, al revisar su estado la mayoría se encuentran con título terminado o en proceso de liquidación (ver Figura 33), con tan solo 9 títulos activos localizados en los departamentos de Valle del Cauca (5), Cundinamarca (3) y Antioquia (1).

Figura 33. Titulación para la bauxita



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

11.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio de bauxita

La bauxita es el recurso principal para la obtención de aluminio, un metal clave en diversas industrias debido a su ligereza, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica y térmica. Los usos del aluminio son amplios y abarcan sectores fundamentales como la construcción, el transporte, la industria eléctrica, el embalaje y la electrónica. En la industria de la construcción, el aluminio se utiliza en la fabricación de estructuras, marcos de ventanas, puertas y fachadas, debido a su durabilidad y bajo mantenimiento. Estas propiedades lo convierten en un material preferido para aplicaciones arquitectónicas que requieren ligereza y resistencia (UPME, EY & JTBOYD, 2018). En el sector del transporte, el aluminio es esencial para la fabricación de automóviles, aviones, trenes y barcos, ya que su bajo peso permite una mayor eficiencia energética y la reducción de emisiones de CO₂. Esto resulta en menores costos operativos para las empresas automotrices y aeroespaciales (Schulte & Foley, 2013).

Otro sector clave donde el aluminio juega un papel fundamental es la industria eléctrica, donde se utiliza para la fabricación de cables de transmisión de energía. Aunque el cobre tiene una conductividad eléctrica superior, el aluminio es preferido en muchas aplicaciones de transmisión de larga distancia debido a su menor peso y costo, lo que permite la instalación de cables más largos sin comprometer la estabilidad estructural. Además, en la industria de envases y embalajes, el aluminio se utiliza ampliamente para fabricar latas de bebidas y contenedores de alimentos debido a su capacidad para proteger los productos de la luz, el aire y la humedad, lo que garantiza su conservación por más tiempo (Schulte & Foley, 2013) (Mendoza O. G., Ceballos, Pérez, Castellanos, & Mendoza, Aluminio (Al₂O₃), 2020)

Los minerales principales de la bauxita, como la gibbsita, bohemita y diásporo, son esenciales en la producción de alúmina (Al₂O₃) a través del proceso Bayer. En este proceso, la bauxita es triturada y sometida a lixiviación con sosa cáustica (NaOH) a alta temperatura y presión, lo que permite disolver el óxido de aluminio y separar los residuos insolubles conocidos como barro rojo, compuestos por óxidos de hierro y otras impurezas. Una vez precipitada, la alúmina pura se seca y almacena para su posterior procesamiento. Este proceso genera subproductos valiosos, como el galio y el escandio, que tienen aplicaciones tecnológicas avanzadas en dispositivos electrónicos y semiconductores (Schulte & Foley, 2013) (Mendoza O. G., Ceballos, Pérez, Castellanos, & Mendoza, Aluminio (Al₂O₃), 2020).

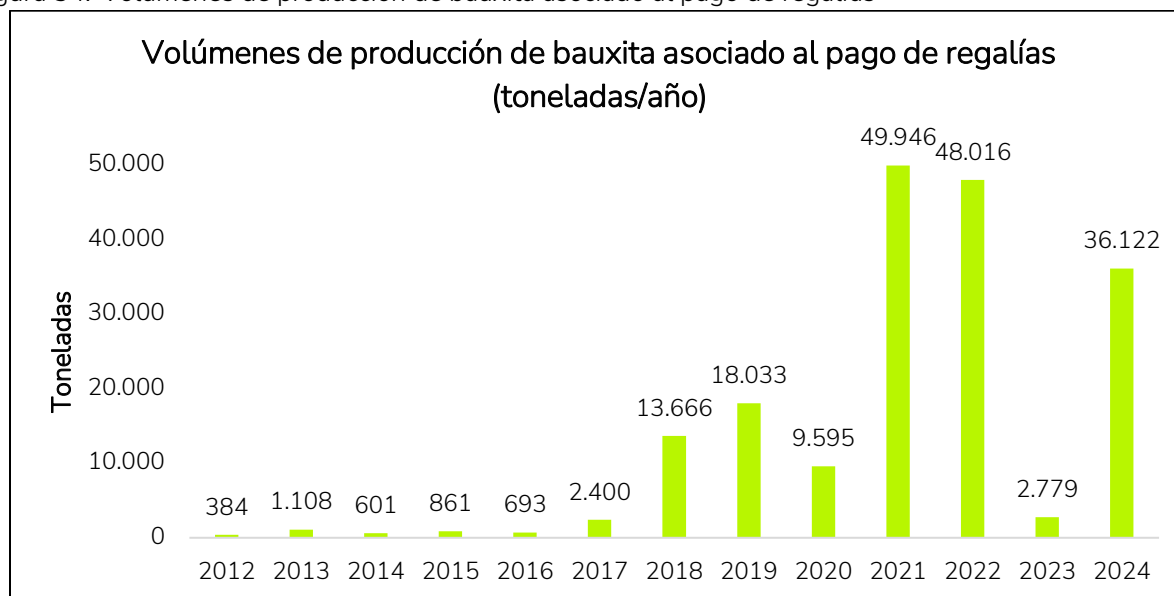
Posteriormente, la alúmina se convierte en aluminio metálico mediante el proceso Hall-Héroult, que disuelve la alúmina en criolita fundida y, mediante electrólisis, el aluminio se deposita en el cátodo en forma líquida y es recolectado para su uso en productos metálicos (U.S. Geological Survey, 2023). Además de su uso en la producción de aluminio, la alúmina tiene aplicaciones importantes en la fabricación de cerámicas, abrasivos y productos refractarios debido a su alta dureza y estabilidad térmica, haciéndola valiosa para diversas industrias de alta tecnología (Schulte & Foley, 2013).

El proceso de beneficio de la bauxita incluye etapas de trituración y molienda, donde el mineral se reduce a partículas más pequeñas para facilitar la separación de impurezas mediante flotación. En esta etapa, se eliminan impurezas como la sílice o el hierro, mejorando la calidad del mineral antes de su refinado. El manejo adecuado del barro rojo, que es el residuo generado en el proceso Bayer, es crucial para mitigar su impacto ambiental, lo que requiere tecnologías específicas de manejo y mitigación (UPME, EY & JTBOYD, 2018)

11.3 Producción y oferta de bauxita

Entre 2012 y 2024, la producción de bauxita ha estado en promedio en el orden de las 14 mil toneladas por año (ver Figura 34). Valle del Cauca concentra la producción nacional del mineral, con cerca del 100% de la bauxita colombiana y si bien existen algunos aportes a la producción nacional en Cauca, estos han sido marginales. La mayor parte del mineral explotado se destina al consumo interno, principalmente para la elaboración de aluminio y cemento. A pesar de la presencia de estos depósitos, el país depende en gran medida de las importaciones de aluminio, especialmente de Brasil y Venezuela, para suplir su demanda interna (Agencia Nacional de Minería, 2023).

Figura 34. Volúmenes de producción de bauxita asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

12 Oro (Au)

12.1 Definición, potencial geológico y titulación del oro

El oro, es un metal de transición valorado desde la antigüedad por su brillo distintivo, maleabilidad y resistencia a la corrosión. En la actualidad, su alta conductividad y estabilidad química lo hacen

esencial en diversas industrias, incluidas la electrónica, la medicina, la tecnología avanzada y la investigación aeroespacial (World Gold Council, 2021). En la naturaleza, el oro se presenta tanto en estado nativo como en aleaciones con elementos como plata y cobre, además de formar compuestos en sulfosales, telurios y seleniuros (Arias & López, 2019). En la se aprecian algunos de los minerales de oro

Tabla 9. Denominación de las principales aleaciones y minerales de oro

Grupo	Mineral	Composición química	Contenido Au (%wt)
Elemento nativo o aleaciones	Oro nativo	Au	>75%
	Electrum	Au, Ag	45 – 75%
	Auricupride	Cu ₃ Au	50 – 56%
	Tetraauricupride	AuCu	70 – 76%
	Yuanjiangite	AuSn	62,4%
	Hunchunite	Au ₂ Pb	62,6%
Sulfuro	Uytenbogardita	Ag ₃ AuS ₂	27 – 35%
Telururo	Calaverita	AuTe ₂	39 – 44%
	Krenerita	(Au, Ag)Te ₂	30 – 44%
	Petzita	Ag ₃ AuTe ₂	19 – 25,2%
	Muthmanita	(Au, Ag)Te	23 – 35%
	Montbrayita	Au ₂ Te ₃	38 – 44%
	Silvanita	(Au, Ag) ₂ Te ₄	24 – 30%
Sulfosal	Maldonita	Au ₂ Bi	63 – 68%
	Auroestibita	AuSb ₂	43 – 51%

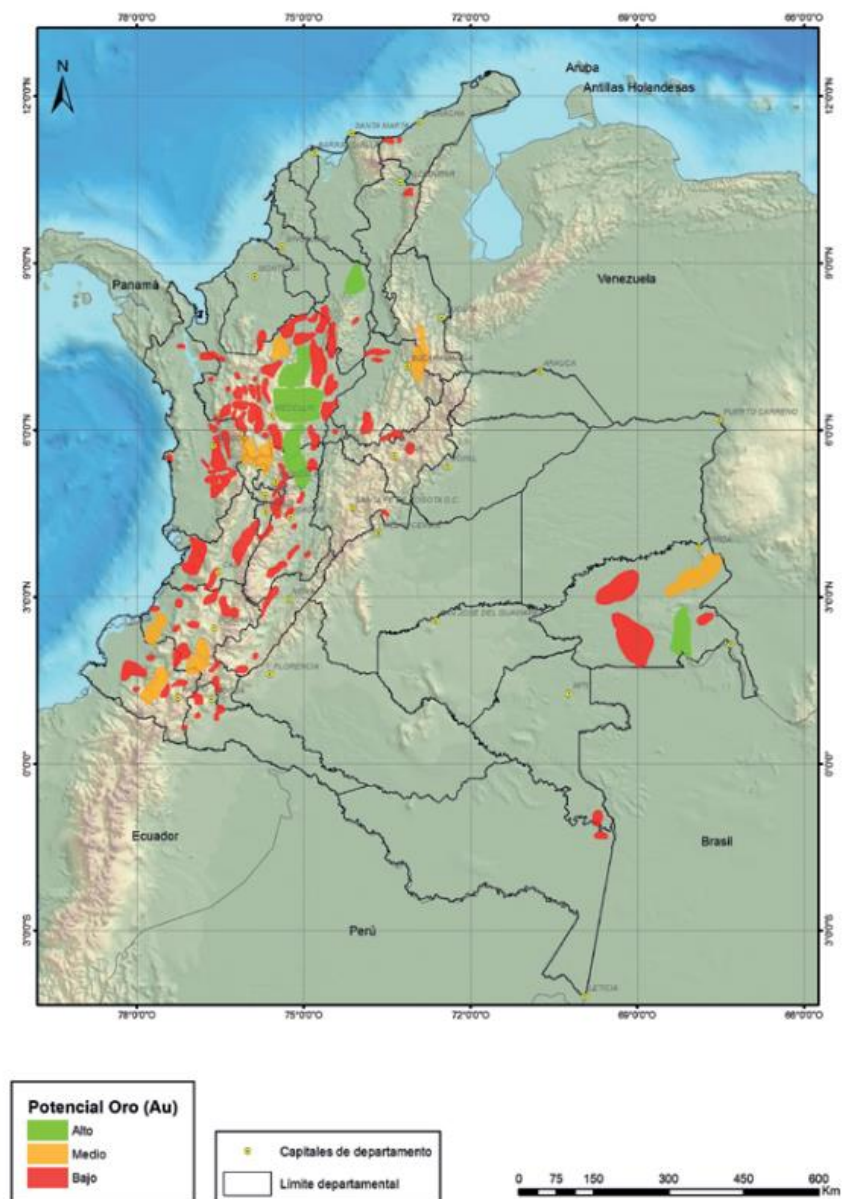
Fuente: tomado y modificado de (Arias & López, 2019) y (Zhou, Jago, & Martin, 2004)

El potencial geológico de Colombia en términos de depósitos auríferos es diverso debido a su ubicación geográfica en el cinturón andino, una región tectónicamente activa que facilita la acumulación de oro en distintas formaciones geológicas. El Mapa Metalogénico de Colombia identifica tres provincias clave con alto potencial aurífero: la Oriental, Central y Occidental Andina, cada una con características geológicas específicas que influyen en la concentración de minerales. Estas provincias abarcan desde la Cordillera Oriental hasta las formaciones volcánicas de la Cordillera Occidental, proporcionando condiciones geológicas diversas que incluyen zonas de subducción, arcos volcánicos y áreas de intrusión magmática, ideales para la formación de depósitos pórfidos, epitermales y orogénicos (López-Isaza, y otros, 2018).

Dentro de las provincias metalogénicas, destacan los cinturones auríferos en regiones como Antioquia y Tolima, donde la combinación de eventos magmáticos e hidrotermales ha dado lugar a yacimientos ricos en oro. Por ejemplo, el Batolito Antioqueño y el Batolito de Ibagué contienen depósitos importantes, no solo en vetas y stockworks de oro, sino también en placeres aluviales, especialmente en zonas como el Bajo Cauca y el Valle Medio del río Magdalena, donde el oro se concentra en los sedimentos fluviales. Estos depósitos aluviales resultan de la erosión de fuentes primarias y la posterior deposición en ríos y arroyos, ofreciendo un recurso significativo para la minería artesanal y de pequeña escala (Arias & López, 2019). En la Figura 35 se presenta el mapa

con zonas potenciales para oro, donde se pueden evidenciar las zonas del país que han presentado ocurrencias, prospectos o depósitos.

Figura 35. Mapa con zonas potenciales para oro

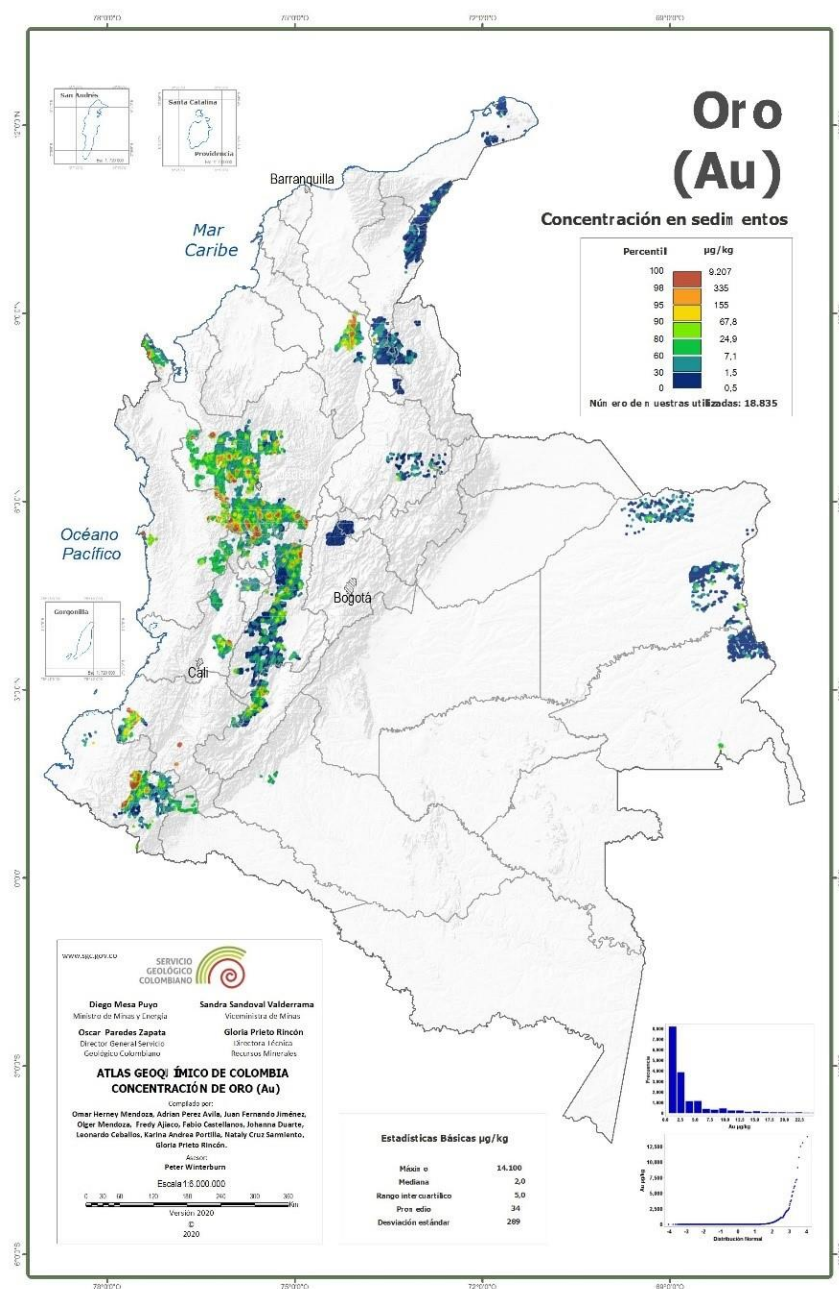


Fuente: Arias y López (2019).

La riqueza aurífera en los sedimentos colombianos es también notable, con concentraciones que varían ampliamente a lo largo del país. De acuerdo con el Atlas Geoquímico de Colombia, las mayores concentraciones de oro en sedimentos se encuentran en Antioquia, Cauca, y Chocó, regiones donde los valores alcanzan hasta 335 $\mu\text{g/kg}$ (ver Figura 36). Estos depósitos secundarios son importantes no solo por su accesibilidad, sino porque representan una fuente sostenible de oro en ambientes de explotación menos intensivos. Estas formaciones están principalmente localizadas en cuencas fluviales donde la sedimentación acumula el oro en terrazas y lechos de

ríos, haciendo posible su extracción mediante métodos de bajo impacto ambiental, aunque con desafíos asociados a la regulación y protección de los ecosistemas acuáticos (Mendoza, Portilla, Pérez, & Castellanos, 2020).

Figura 36. Mapa de concentración de oro en sedimentos

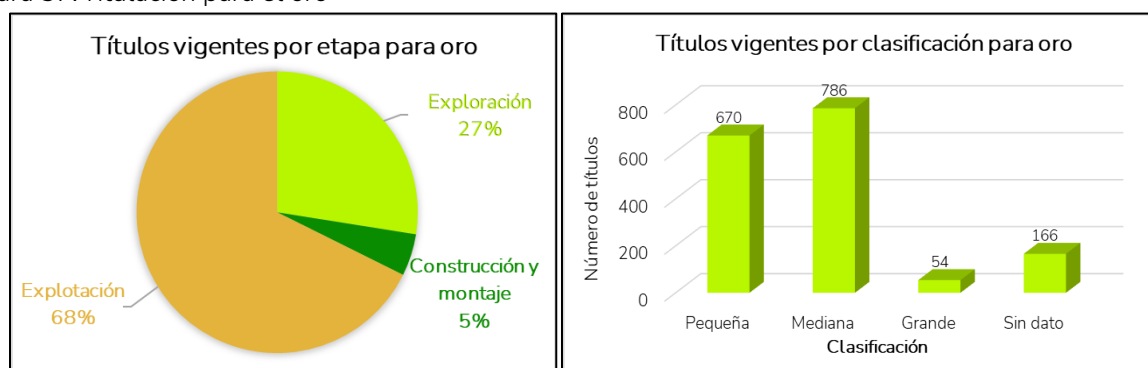


Fuente: Atlas Geoquímico de Colombia (Mendoza, Portilla, Pérez, & Castellanos, 2020)

La titulación minera de oro en Colombia comprende 1676 títulos vigentes, que cubren un total de 1'763.706 hectáreas, según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna

Minería, actualizado al 31 de octubre de 2024. De estos títulos, 1134 (68%) se encuentran en etapa de explotación, 81 (5%) en construcción y montaje, y 461 (27%) en exploración, lo que muestra una clara concentración en la producción activa del mineral. La mayoría de estos títulos pertenece a la pequeña y mediana minería, con 40% y 47% respectivamente (ver Figura 37), además de contar con 5121 mineros/as de subsistencia registrados en RUCOM para todo el país con metales preciosos como sus minerales de extracción.

Figura 37. Titulación para el oro



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

12.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el oro

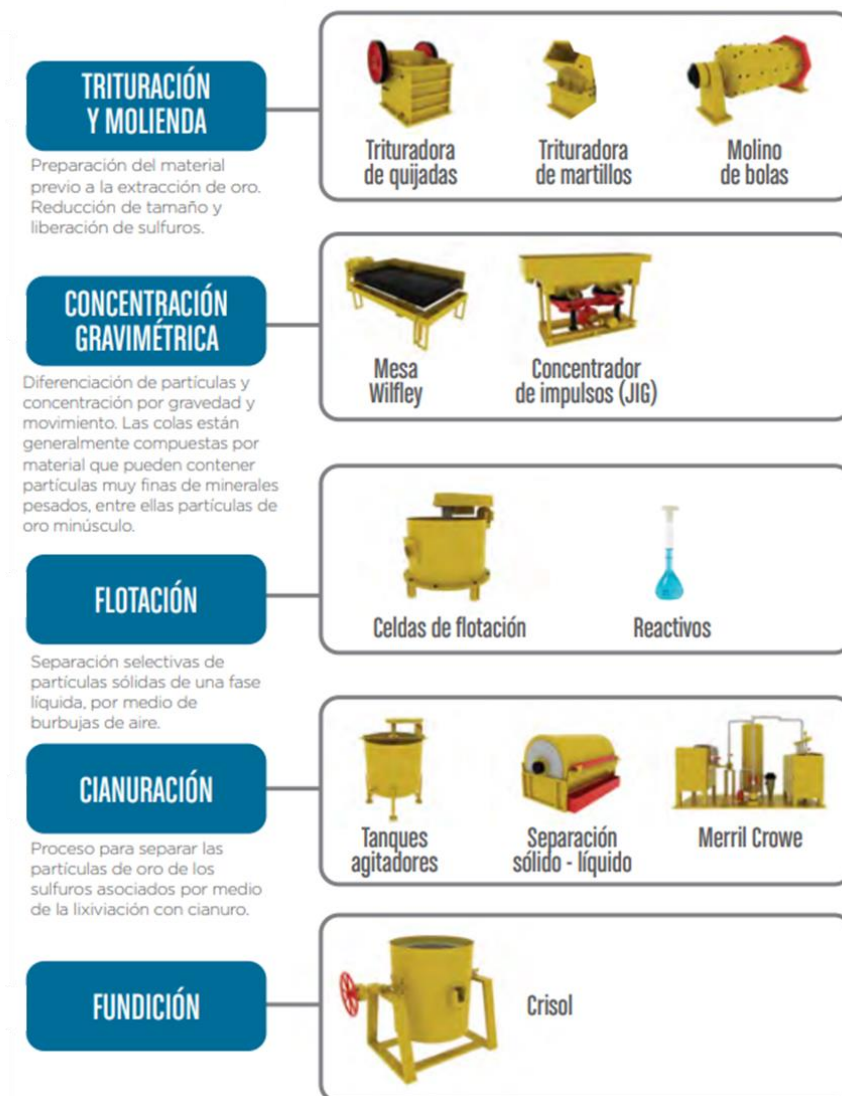
El mercado del oro se centra en su uso en joyería, tecnología y la fabricación de monedas, además de ser una inversión valorada como reserva o *commodity*. Se estima que Colombia demanda internamente 1 tonelada de oro al año de la cual el 76% se utiliza para la industria de la joyería a, lo que convierte a este sector en el mayor consumidor interno de oro (UPME, EY & JTBOYD, 2018)

En el campo de la electrónica, el oro es fundamental para asegurar la fiabilidad y durabilidad de dispositivos semiconductores, conectores, circuitos híbridos, y en la metalización de CD-R y DVD. También se utiliza en aleaciones de soldadura, donde su estabilidad y conductividad juegan un papel esencial. En el ámbito de la nanotecnología, el oro es igualmente valioso, con aplicaciones que abarcan desde sensores y componentes electrónicos nanométricos hasta materiales ópticos y de uso medicinal, dada su reactividad y maleabilidad a escala nanométrica (Materials World, 2003) (McDonald, 2007). En el sector médico y odontológico, el oro es apreciado por su biocompatibilidad, lo que lo convierte en una opción segura para implantes y tratamientos contra infecciones. Además, en aplicaciones térmicas, el oro es un excelente reflector de calor y radiación infrarroja, características que lo hacen ideal para su uso en motores de avión y en programas espaciales, donde es crucial minimizar la transmisión de calor (McDonald, 2007).

El proceso de beneficio del oro se compone de una serie de etapas técnicas cuyo objetivo es maximizar la recuperación del metal, abarcando desde la extracción del mineral hasta su refinación final (ver Figura 38). A continuación, se expone el proceso de beneficio del oro diseminado en grandes volúmenes de material, siguiendo lo descrito en Arias y López (2019), y Servicio Geológico Colombiano & Ministerio de Minas y Energía (2018).

En primer lugar, se lleva a cabo la extracción del mineral, que puede realizarse a cielo abierto o en minas subterráneas, dependiendo de las condiciones geológicas y estructurales del terreno. Una vez extraído el mineral, este pasa por la etapa de trituración primaria y secundaria, generalmente utilizando trituradoras de quijadas y de martillos, para reducir su tamaño. Posteriormente, pasa a molienda, donde en Colombia es común encontrar molinos de bolas ya que permiten una molienda más fina, lo que libera las partículas de oro contenidas en la roca.

Figura 38. Diagrama de procesos general de beneficio de oro en planta



Fuente: (Servicio Geológico Colombiano & Ministerio de Minas y Energía, 2018)

La siguiente fase es la concentración del oro, que se realiza mediante distintos métodos que incrementan la cantidad de oro en el mineral procesado:

- **Gravimetría**: este método utiliza equipos como mesas Wilfley y concentradores gravitacionales, que separan el oro de la ganga aprovechando las diferencias de densidad.

Aunque esta técnica es efectiva, no siempre logra un grado de pureza óptimo, por lo que el material puede requerir etapas adicionales de concentración.

- Flotación: el mineral concentrado se somete a un proceso en el que las partículas de oro se adhieren a burbujas de aire que las elevan a la superficie, facilitando su separación.
- Cianuración y precipitación con zinc: en esta etapa, el oro se disuelve en una solución de cianuro, y luego la solución rica en oro se trata con zinc (proceso de Merrill-Crowe) para precipitar y recuperar el oro disuelto.

Finalmente, en la etapa de fundición, el objetivo es procesar los cementos, o precipitados de cianuración, flotación o separación gravimétrica, para obtener lingotes de oro de alta pureza.

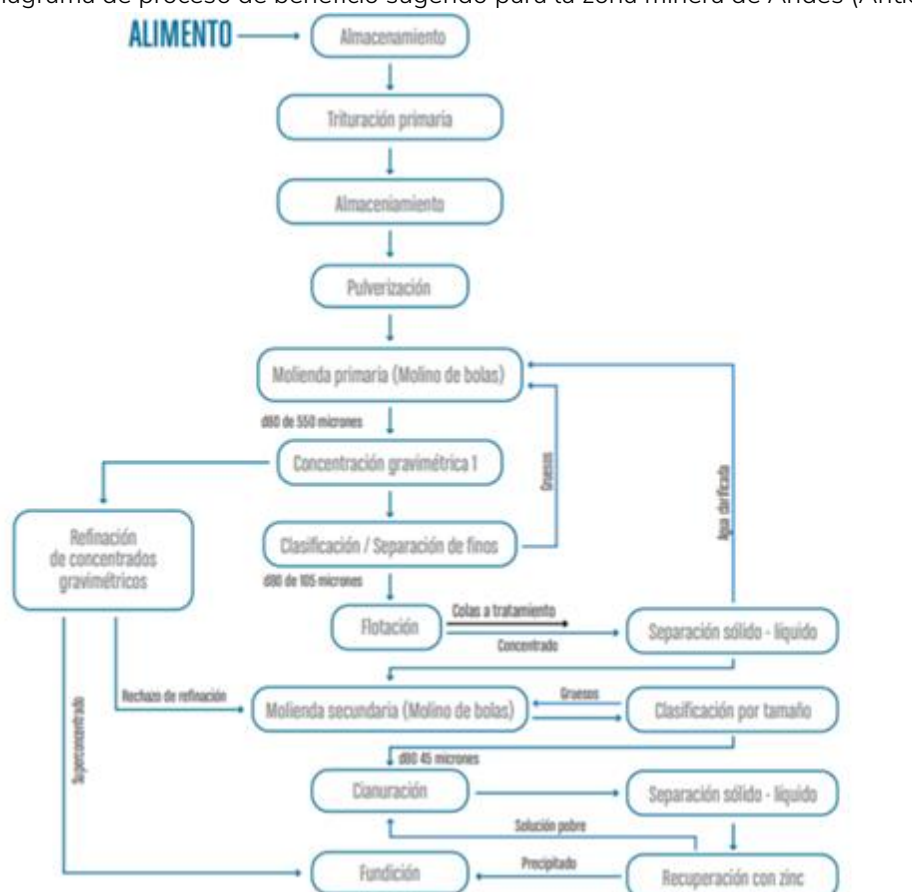
En Colombia, es muy común la explotación de oro aluvial, principalmente en los departamentos de Chocó, Antioquia y Córdoba. El proceso de beneficio en la minería aluvial es más sencillo e involucra únicamente procesos de concentración gravimétrica y fundición ya que las partículas de oro están libres (Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética, 2024). Además, en el país se trabajó durante muchos años la amalgamación con mercurio, ya que este permite atrapar las partículas de oro formando una amalgama, que luego se calienta para vaporizar el mercurio y obtener el oro. Esta práctica, aunque efectiva, plantea graves riesgos ambientales y de salud, por lo que actualmente está prohibida, al igual que el uso del mercurio en cualquier actividad en el país.

En concordancia con la normativa colombiana y los avances en tecnologías de minería limpia, el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía han elaborado las “Guías Metodológicas para el Beneficio de oro sin el uso de mercurio”, documentos que se desarrollan según las características geológicas, mineralógicas y metalúrgicas de cada región estudiada. A modo de ejemplo, se presenta un flujo de operaciones y procesos propuesto, que optimiza el beneficio del oro promoviendo un aprovechamiento efectivo y ambientalmente sostenible del material en la zona minera de Andes (Antioquia), tal como se muestra en la Figura 39. Esta propuesta incluye las siguientes etapas:

1. Trituración y molienda mejoradas: se sugiere optimizar el proceso de reducción de tamaño para maximizar la liberación de partículas de oro utilizando pulverizadores y configuraciones avanzadas de molinos para una molienda más fina.
2. Concentración gravimétrica avanzada: la concentración del oro se sugiere mediante métodos de gravimetría avanzada y flotación, que permiten una recuperación significativa de oro. Los equipos, como los concentradores centrífugos, pueden sustituir la amalgamación para separar eficientemente las partículas de oro.
3. Lixiviación con cianuro en circuitos cerrados: este paso propone un sistema de cianuración controlado y cerrado, utilizando reactivos para tratar las soluciones residuales de manera segura. Además, contempla el uso del proceso de Merrill-Crowe u otras alternativas como la lixiviación con tiosulfato, para reducir el uso de cianuro y garantizar la sostenibilidad en el manejo de residuos.
4. Fundición final: el oro recuperado se funde en barras de alta pureza.

Este modelo de beneficio sin mercurio resulta más seguro para los operadores y amigable con el ambiente. También permite un mayor porcentaje de recuperación de oro, reduciendo los costos operativos y mejorando la rentabilidad a largo plazo. Además, al eliminar el mercurio, se cumplen las regulaciones ambientales en Colombia y se promueve una minería responsable y sostenible en las comunidades mineras del país.

Figura 39. Diagrama de proceso de beneficio sugerido para la zona minera de Andes (Antioquia)



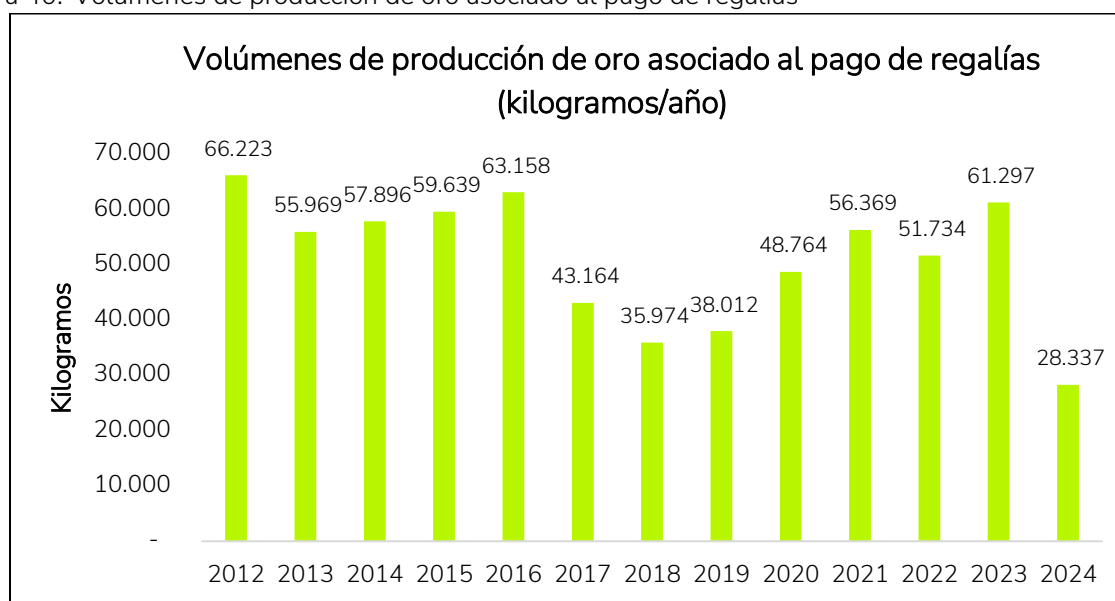
Fuente: tomado de Servicio Geológico Colombiano y Ministerio de Minas y Energía (2018)

12.3 Producción y oferta de oro

Entre 2012 y 2023, la producción de oro ha estado alrededor de los 51 mil kilogramos por año (ver Figura 40). Los departamentos del occidente del país concentran la mayoría de la producción nacional del mineral, con Antioquia y Chocó liderando la producción en los últimos años.

Casi la totalidad del mineral explotado se destina a la exportación, en particular, Estados Unidos, Europa, China y Australia se destacan como los principales destinos del oro colombiano. Por su parte, una pequeña proporción del mineral (<1%) se destina al consumo interno en su mayoría para actividades de joyería (UPME, 2024).

Figura 40. Volúmenes de producción de oro asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

13 Esmeraldas

13.1 Definición, potencial geológico y titulación de esmeraldas

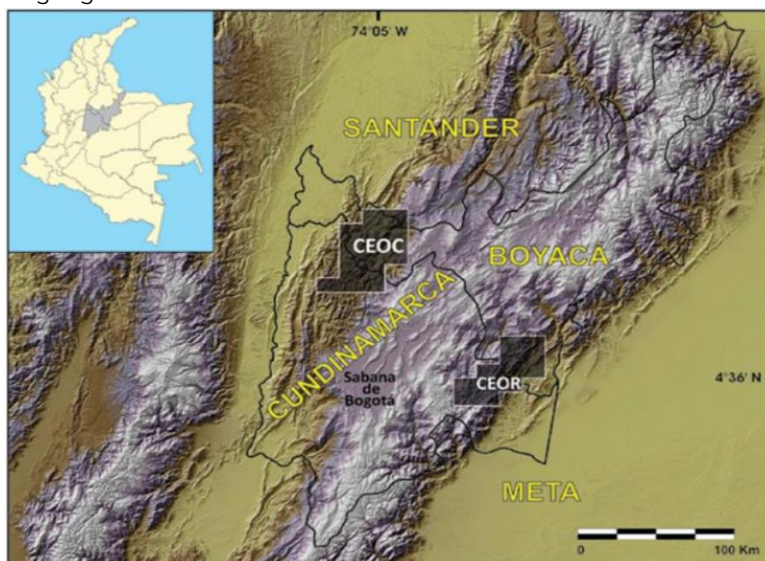
Las esmeraldas son una variedad del mineral berilo, cuya fórmula química es $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$. Su característico color verde se debe a la presencia de trazas de elementos como cromo, vanadio o hierro, que reemplazan parcialmente al aluminio en la estructura del berilo. La intensidad y el tono del color de las esmeraldas dependen de las proporciones de estos elementos traza. En el caso de las esmeraldas colombianas, el cromo es el principal responsable de su color verde vibrante, lo que las convierte en las esmeraldas más apreciadas a nivel mundial por su pureza y brillo (Terraza & Montoya, 2011) (Agencia Nacional de Minería, 2022).

A nivel global, las esmeraldas se forman en sistemas hidrotermales, y están asociadas con minerales como el cuarzo, la pirita, la calcita y la fluorita, que suelen aparecer en los mismos depósitos. Estos minerales acompañan a las esmeraldas en su proceso de formación, y en muchos casos, son indicadores geológicos clave para identificar la presencia de esmeraldas en una región. La formación de esmeraldas ocurre en condiciones específicas de baja presión y temperatura en ambientes sedimentarios, donde fluidos hidrotermales ricos en sílice y cromo interactúan con rocas calcáreas (Terraza & Montoya, 2011).

El potencial geológico de las esmeraldas en Colombia se concentra en la Cordillera Oriental, particularmente en los cinturones esmeraldíferos occidental y oriental. En el Cinturón Esmeraldífero Occidental se encuentran importantes minas como Muzo y Coscuez, mientras que en el Cinturón Esmeraldífero Oriental están las minas de Chivor y Somondoco (ver Figura 41).

Estos cinturones se caracterizan por formaciones sedimentarias del Cretácico, tales como la Formación Paja y la Formación Rosablanca, y están localizados a lo largo de estructuras tectónicas que permitieron la infiltración de fluidos hidrotermales, esenciales para la formación de esmeraldas (Terraza & Montoya, 2011) (Agencia Nacional de Minería, 2022).

Figura 41. Localización geográfica de los cinturones esmeraldíferos de la Cordillera Oriental de Colombia

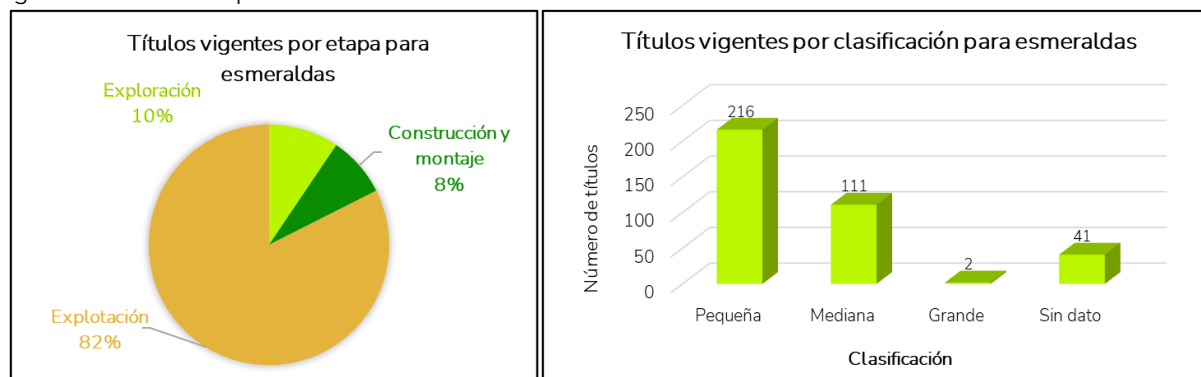


Notas: CEOC= Cinturón Esmeraldífero Occidental, CEOR= Cinturón Esmeraldífero Oriental

Fuente: Terraza y Montoya (2011)

Según los datos del Sistema Integral de Gestión Minera Anna Minería, con fecha de consulta 31 de octubre de 2024, existen 370 títulos vigentes que incluyen esmeraldas como mineral principal, abarcando un área de aproximadamente 114.452 hectáreas. De estos títulos, el 82% están en etapa de explotación, el 8% en construcción y montaje, y el 10% en exploración. Estos títulos se distribuyen principalmente entre la pequeña y mediana minería, representando el 58,4% y el 30% de la distribución total, respectivamente (ver Figura 42). Estos títulos están concentrados principalmente en las regiones de Boyacá y Cundinamarca, donde se encuentran las minas de mayor producción de esmeraldas.

Figura 42. Titulación para la esmeralda



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

13.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio de las esmeraldas

Las esmeraldas son principalmente utilizadas en la industria de la joyería, donde se valoran por su color, brillo, dureza y calidad excepcionales. La mayor parte de las esmeraldas extraídas en Colombia se destina a la creación de piezas de lujo, como anillos, collares, aretes y otros accesorios. Además de su uso en joyería, las esmeraldas de menor calidad también pueden emplearse en la industria óptica y tecnológica. Aunque este uso es mucho menos frecuente, las propiedades ópticas de las esmeraldas permiten su utilización en componentes para láseres y en tecnología de precisión, aunque su mercado en estos sectores es limitado (Terraza & Montoya, 2011).

El proceso de beneficio de las esmeraldas en Colombia comienza con la extracción subterránea, un método predominante debido a las características geológicas de las minas de esmeraldas en la Cordillera Oriental. La técnica de cámaras y pilares es comúnmente utilizada, lo que permite un acceso seguro a las vetas mientras se preserva la estabilidad de la mina. La extracción de las esmeraldas debe realizarse con gran cuidado, ya que las gemas son relativamente frágiles, y cualquier daño puede disminuir significativamente su valor en el mercado (Terraza & Montoya, 2011).

Una vez extraídas, las esmeraldas pasan por un proceso de clasificación y lavado. Durante este proceso, se separa el material estéril de las gemas, y las esmeraldas se clasifican en función de su tamaño, color y pureza. Las esmeraldas de mayor calidad son destinadas al tallado, un proceso que maximiza su valor comercial al mejorar su brillo y apariencia visual. El tallado se realiza en talleres especializados, donde las facetas de la gema son cortadas con precisión para resaltar sus características ópticas (Bonilla, 2024).

Es común que algunas esmeraldas con inclusiones o defectos visibles sean sometidas a tratamientos para mejorar su claridad y color. Los tratamientos más habituales incluyen la utilización de aceites o resinas para rellenar grietas y disimular las imperfecciones (ver Figura 43). Estos tratamientos, si bien mejoran el aspecto de la gema, deben ser transparentes y declarados en el mercado, ya que afectan su valor final (Bonilla, 2024).

El producto resultante de este proceso de beneficio, que incluye la extracción, clasificación, tallado y tratamiento, es una esmeralda lista para la comercialización. Colombia, como el principal productor de esmeraldas de alta calidad a nivel mundial, exporta una parte significativa de estas gemas al mercado de lujo global. La alta demanda de las esmeraldas colombianas refuerza su relevancia como recurso estratégico en la economía nacional (Agencia Nacional de Minería, 2022)

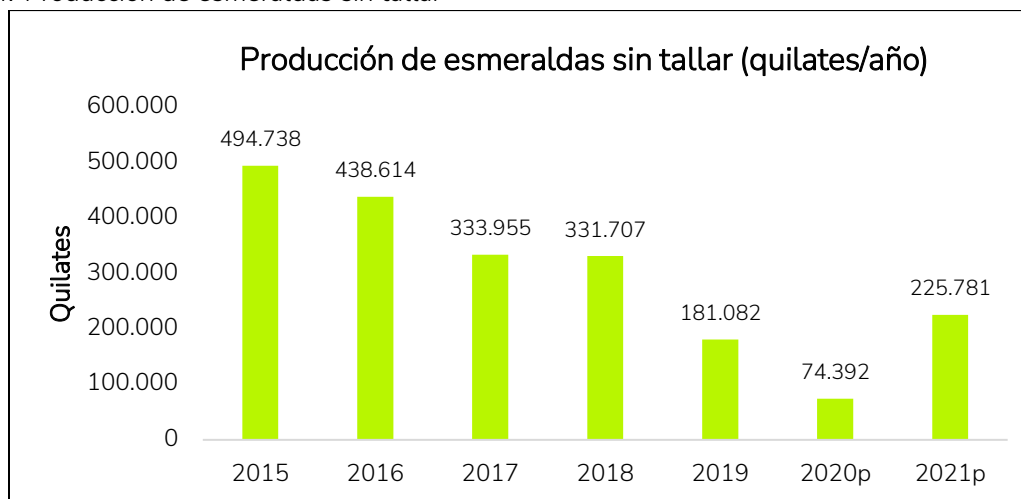
Figura 43. Proceso de beneficio de la esmeralda



13.3 Producción y oferta de esmeraldas

Entre 2015 y 2021, la producción de esmeraldas ha estado en promedio alrededor de los 297 mil quilates por año con Boyacá y Cundinamarca liderando en el país (ver Figura 44).

Figura 44. Producción de esmeraldas sin tallar



Fuente: elaboración propia con base en cifras de la Cuenta Satélite Minera del DANE

Casi la totalidad del mineral explotado se destina a la exportación, en particular hacia Estados Unidos, Europa, China y Australia. El mercado de esmeraldas colombianas es especialmente

competitivo debido a su alta calidad, derivada de su color vibrante y menor cantidad de inclusiones en comparación con esmeraldas de otras regiones, como Zambia o Brasil (Agencia Nacional de Minería, 2023; Ficha Esmeraldas, 2024). Por su parte una pequeña proporción del mineral se destina al consumo interno en su mayoría para actividades de joyería (UPME, 2024).

14 Materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas

14.1 Definición, potencial geológico y titulación de materiales de construcción, limitados únicamente a arenas, gravas y arcillas

Los materiales de construcción (arenas, gravas y arcillas) juegan un papel importante en Colombia debido a sus aplicaciones en infraestructura y construcción, como en carreteras, edificaciones y proyectos de saneamiento urbano. Las arenas y gravas son sedimentos de rocas desintegradas que se emplean ampliamente en concreto, asfaltos y rellenos estructurales, mientras que las arcillas, debido a su plasticidad y cohesión, son esenciales en la fabricación de ladrillos y cerámicas (ver Tabla 10). Esta clasificación está respaldada por la legislación, que define estos materiales como esenciales en la economía nacional (Pulido, 2019).

Tabla 10. Clasificación de arenas, limos y arcillas según tamaño de grano y aplicación principal.

Tipo de Material	Tamaño de Grano (mm)	Aplicación Principal
Arenas Muy Gruesas	1 - 2 mm	Bases de carreteras y rellenos
Arenas Gruesas	0.5 - 1 mm	Concreto de alta resistencia
Arenas Medias	0.25 - 0.5 mm	Concreto y mezclas de mortero
Arenas Finas	0.125 - 0.25 mm	Enlucidos, estucos y morteros finos
Arenas Muy Finas	0.0625 - 0.125 mm	Revestimientos decorativos
Limos	0.0039 - 0.0625 mm	Mejoras de suelos, estabilización
Arcillas	<0.0039 mm	Productos cerámicos y ladrillos

Fuente: adaptado de "Sedimentology and Stratigraphy" (Nichols, 2023)

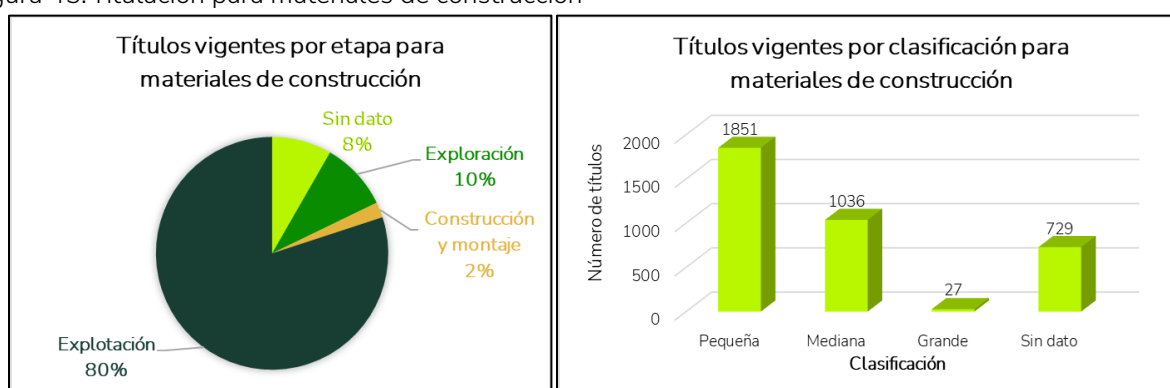
Los principales depósitos de arenas y gravas se encuentran en las regiones montañosas y en las terrazas aluviales de las cuencas hidrográficas de los ríos Magdalena y Cauca. Además, las formaciones de arcillas se localizan en regiones volcánicas y en cuencas sedimentarias de los periodos Cretácico y Cuaternario, particularmente en la Cordillera Central y en el sur de la región Caribe (Montoya & Reyes, 2023), (Servicio Geológico Colombiano, 2020).

Las cordilleras Occidental, Central y Oriental, junto con los valles interandinos, son áreas de alto potencial para estos materiales debido a su geología sedimentaria y a la actividad tectónica, que han propiciado el depósito de gravas y arenas. La Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía del Perijá también contienen depósitos de importancia económica, mientras que en el Pacífico y en las llanuras de la Orinoquía y la Amazonía se encuentran depósitos adicionales de arenas cuarzosas

y arcillas de origen volcánico y fluvial (Gómez, Mateus-Zabala, & Eds., 2020), (Horton & Mateus-Zabala, 2010).

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera (Anna Minería), actualizado al 31 de octubre de 2024, en Colombia existen actualmente 3.643 títulos mineros vigentes que incluyen arcillas, arenas, gravas, recebos o demás clasificados como materiales de construcción dentro de sus minerales, cubriendo un total de 684.609 hectáreas. De estos, el 80% está en fase de explotación, 2% en construcción y montaje y 10% en exploración (ver Figura 45); con un 8% sin dato para etapa, pero que en su totalidad se encuentran en modalidad de “autorización temporal”. Entre la titulación domina la pequeña y mediana minería con 50,8% y 28,4% respectivamente.

Figura 45. Titulación para materiales de construcción



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

14.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio

En el contexto de la infraestructura colombiana, los materiales de construcción como las arenas, gravas y arcillas cumplen funciones fundamentales gracias a sus propiedades físicas y su disponibilidad. Las arenas y gravas, ampliamente utilizadas como agregados, son esenciales en la fabricación de concreto y asfalto, necesarios para pavimentación de carreteras, construcción de edificaciones y sistemas de drenaje, ya que su alta capacidad de compactación y estabilidad estructural proporciona resistencia y durabilidad a las infraestructuras (Pulido, 2019), (Álvarez, Obando, Poveda, & Sánchez, 2023). Las arcillas, por su parte, son materiales clave en la industria cerámica, ya que su plasticidad y cohesión las hacen ideales para la fabricación de ladrillos, tejas y baldosas, productos ampliamente usados en construcciones residenciales y comerciales por su durabilidad y capacidad de aislamiento térmico (Geosciences Libre Texts, 2021).

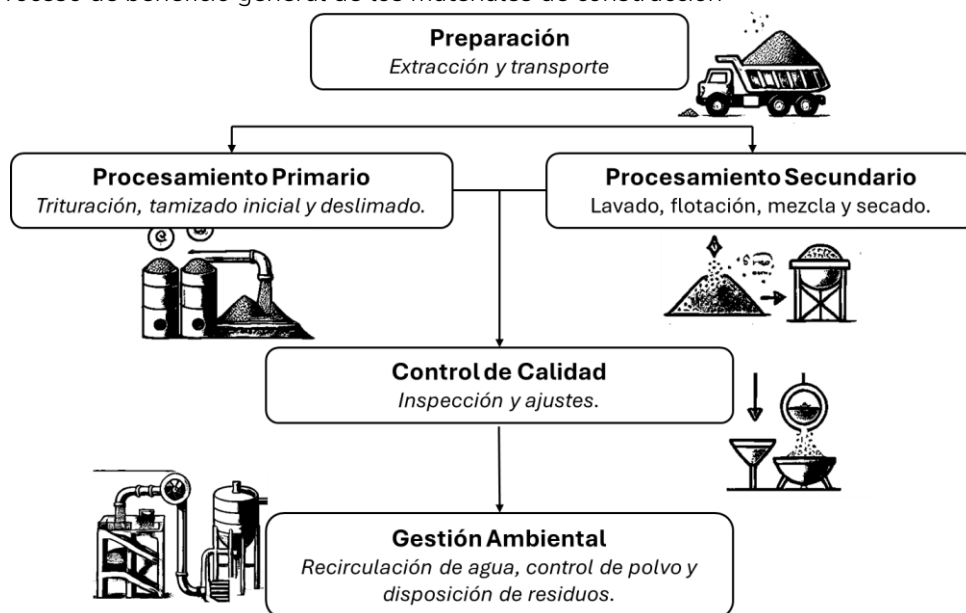
Los productos derivados de estos materiales, también conocidos como productos manufacturados o transformados de construcción, se desarrollan a través de procesos de transformación y adaptación. Los agregados para concreto y asfalto se obtienen principalmente de arenas y gravas que han pasado por procesos de trituración y clasificación, ajustándose en tamaño y pureza para cumplir con los requisitos estructurales de cada aplicación. Estos agregados de diferentes

granulometrías son cruciales en la construcción de pavimentos y estructuras de soporte en edificaciones (International Finance Corporation, 2007).

Los productos cerámicos derivados de la arcilla, como ladrillos, baldosas y tejas, se someten a procesos de moldeo y cocción que les confieren propiedades de resistencia y aislamiento, fundamentales en el revestimiento de exteriores e interiores de edificaciones. Asimismo, las arenas y limos también son empleadas como materiales de relleno y estabilización de suelos, proporcionando estabilidad y cohesión en proyectos de nivelación y compactación de terrenos. Estos materiales, mezclados con aglutinantes, son esenciales para preparar el terreno en proyectos de construcción, especialmente en áreas con suelos inestables (International Finance Corporation, 2007).

Para obtener estos productos derivados, los materiales de construcción pasan por diferentes procesos de beneficio que optimizan su calidad y adaptabilidad. En el caso de las arenas y gravas, el proceso de beneficio incluye etapas de trituración y clasificación a través de tamizado y machaqueo, eliminando impurezas y ajustando la granulometría para obtener una textura uniforme. Este proceso también puede incorporar lavado y deslimado para retirar partículas no deseadas como mica y feldespato, mejorando su cohesión y resistencia en aplicaciones de concreto. En instalaciones avanzadas, estos materiales pueden someterse a un proceso de flotación, donde se aplican reactivos específicos para separar impurezas y lograr una pureza superior en agregados de alta calidad (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA, 1995). Las arcillas, en cambio, requieren un proceso de beneficio que incluye molienda, secado y clasificación para ajustar su plasticidad y reducir la humedad, condiciones esenciales en la fabricación de productos cerámicos. En la Figura 46 se presenta de manera general el proceso de beneficio para los materiales de construcción.

Figura 46. Proceso de beneficio general de los materiales de construcción



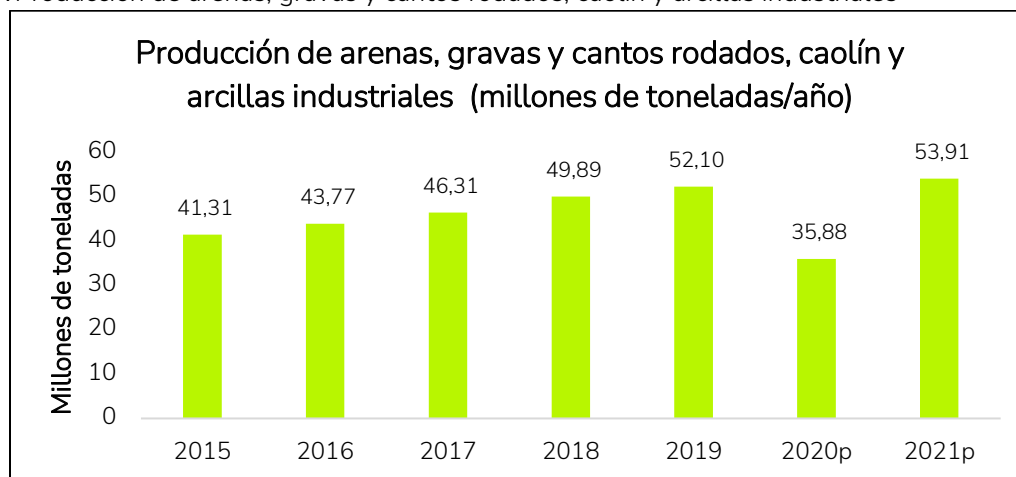
Fuente: elaboración propia

Los procesos de beneficio también incluyen medidas de gestión ambiental, especialmente en instalaciones que utilizan agua en el lavado de materiales. La implementación de sistemas de recirculación de agua permite conservar el recurso y minimizar la descarga de sedimentos en cuerpos de agua, reduciendo el impacto ambiental de estas operaciones y cumpliendo con las normativas locales de sostenibilidad (International Finance Corporation, 2007). Estas prácticas aseguran un aprovechamiento adecuado de los materiales de construcción, equilibrando su importancia en la infraestructura con el compromiso de proteger el entorno natural.

14.3 Producción y oferta de materiales de construcción

Entre 2015 y 2021, la producción de materiales de construcción estuvo en promedio en el orden de los 46 millones de toneladas por año (ver Figura 47). La mayor parte del mineral explotado se destina al consumo nacional, pues estos minerales en su mayoría son destinados para el desarrollo de los sectores de la construcción e infraestructura, en especial en lo relacionado con la construcción de edificaciones y vías de comunicación (UPME, 2024).

Figura 47. Producción de arenas, gravas y cantos rodados, caolín y arcillas industriales



Fuente: elaboración propia con base en cifras de la Cuenta Satélite Minera del DANE

15 Arenas silíceas, silicio (Si)

15.1 Definición, potencial geológico y titulación de arenas silíceas, silicio (Si)

Las arenas silíceas son materiales compuestos principalmente de dióxido de silicio (SiO_2), un componente esencial derivado del cuarzo. Este mineral es conocido por su estabilidad química y resistencia, lo cual permite que se encuentre en diversos ambientes geológicos, incluyendo formaciones rocosas sedimentarias, ígneas y metamórficas. Su alta pureza, que en numerosos depósitos colombianos supera el 95%, convierte a las arenas silíceas en un recurso altamente valorado para distintas aplicaciones industriales, tales como la fabricación de vidrio, cerámicas y

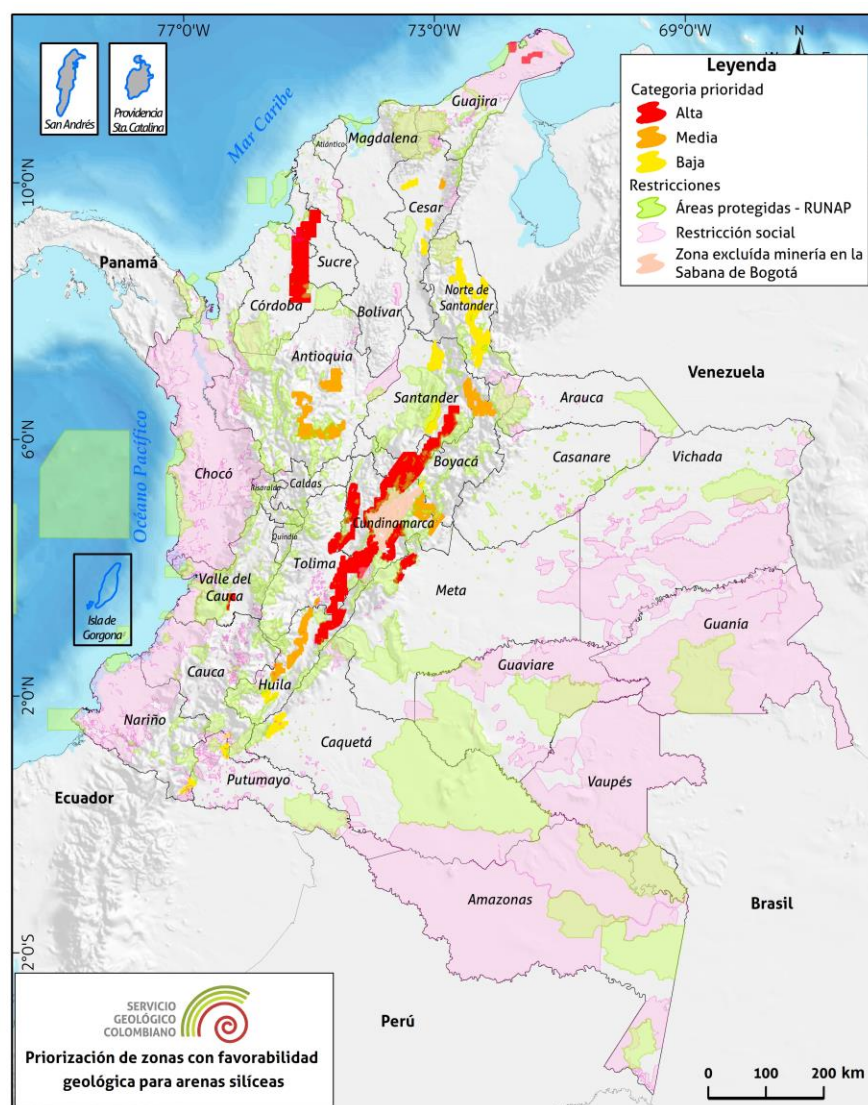
materiales resistentes al calor. Además, en sectores de alta tecnología como la producción de paneles solares y semiconductores, la pureza del cuarzo es un factor crítico, ya que se requiere SiO_2 de gran calidad para asegurar la eficacia y durabilidad de estos productos (ANM, comunicación interna).

En la naturaleza, el silicio no solo se encuentra en forma de cuarzo; también forma silicatos, un grupo de minerales que incluye feldespatos y micas, fundamentales en la composición de diversas rocas. La combinación de SiO_2 con otros minerales contribuye a la formación de estructuras rocosas que proporcionan estabilidad y durabilidad. Por esta razón, el SiO_2 es un recurso prioritario para aplicaciones industriales que exigen materiales con alta resistencia a la erosión y estabilidad en condiciones adversas (Enghag, 2004) (Dill, 2010).

La diversidad geológica del país, situada en la intersección de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Sudamericana, favorece la formación de depósitos de arenas silíceas de alta calidad en distintas regiones (Sepúlveda, y otros, 2020). Entre las principales áreas de depósito se encuentra la Cordillera Oriental, la cual alberga importantes formaciones de areniscas cuarzosas con altas concentraciones de SiO_2 . Los procesos tectónicos y sedimentarios en esta región han facilitado la acumulación y preservación de arenas silíceas en ambientes geológicamente estables, permitiendo la creación de depósitos de calidad excepcional. Asimismo, sectores de los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca representan una vasta extensión de llanuras sedimentarias con yacimientos significativos de arenas silíceas de gran pureza, resultado de la deposición continua de sedimentos y la influencia de sistemas fluviales y eólicos. Estos procesos han contribuido a la concentración de SiO_2 en los depósitos actuales de estas áreas (UPME, EY & JTBOYD, 2018), (Sepúlveda, y otros, 2020). En la Figura 48 se observa una priorización de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas.

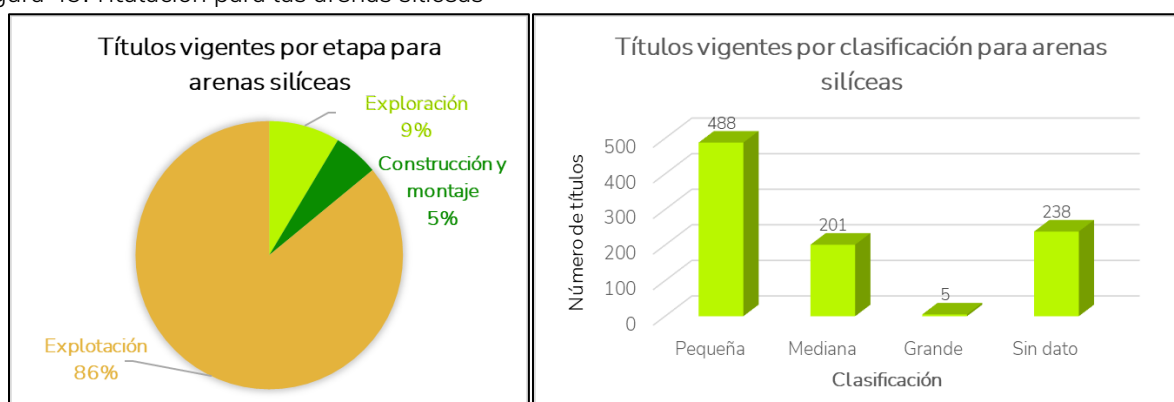
Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 932 títulos vigentes que incluyen las arenas silíceas como mineral principal, correspondientes a 234.752 hectáreas. El 86% de los títulos están en etapa de explotación, 5% en etapa de construcción y montaje y 9% en exploración; distribuidos en su mayoría entre pequeña minería con 488 títulos (52%) y mediana minería con 201 títulos (22%), como se ve en la Figura 49.

Figura 48. Priorización de zonas con favorabilidad geológica para arenas silíceas



Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2024)

Figura 49. Titulación para las arenas silíceas



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

15.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio de arenas silíceas

Las arenas silíceas, compuestas principalmente de dióxido de silicio (SiO_2), son un recurso destacado por su alta pureza y resistencia tanto química como térmica, características que las convierten en un material esencial para múltiples industrias. Su uso más notable se encuentra en la industria del vidrio donde se requieren arenas con un contenido de SiO_2 superior al 95% para garantizar propiedades como transparencia, durabilidad y estabilidad. En este sector, las arenas se emplean en la producción de diversos tipos de vidrio, incluyendo envases, ventanas, cristalería, y productos especializados como fibras ópticas y vidrios para paneles solares y dispositivos fotovoltaicos (Geología Web, 2023).

Además de su aplicación en el vidrio, las arenas silíceas son fundamentales en la fabricación de cerámicas y materiales refractarios debido a su capacidad para soportar altas temperaturas y su resistencia a reacciones químicas. En la construcción, estas arenas se utilizan en la producción de hormigón y morteros. En la industria de fundición de metales, las arenas de alta pureza son indispensables para moldear y crear núcleos de fundición, contribuyendo a la precisión y calidad de las piezas metálicas. En el sector tecnológico, las arenas silíceas de alta pureza se procesan para obtener silicio metalúrgico y silicio policristalino, materiales esenciales en la fabricación de semiconductores y paneles solares, donde la pureza del SiO_2 es clave para garantizar la eficiencia y la durabilidad de estos productos (Agencia Nacional de Minería, 2023), (Industriapedia, 2023).

Para cumplir con los estrictos estándares de calidad del mercado industrial, las arenas silíceas extraídas de depósitos no consolidados (arenas sueltas) o de formaciones consolidadas (roca) se someten a un proceso de beneficio diseñado para asegurar su pureza y granulometría adecuadas (ver Figura 50). Este proceso inicia con la extracción, generalmente mediante minería a cielo abierto, lo que facilita el acceso y minimiza la posibilidad de mezclar el material con otros minerales que podrían afectar su pureza. En depósitos no consolidados, la extracción es relativamente sencilla, mientras que en formaciones consolidadas se requiere la trituración y molienda de la roca para reducirla al tamaño deseado antes de someterla al proceso de beneficio (Geoterra Dominicana, 2023).

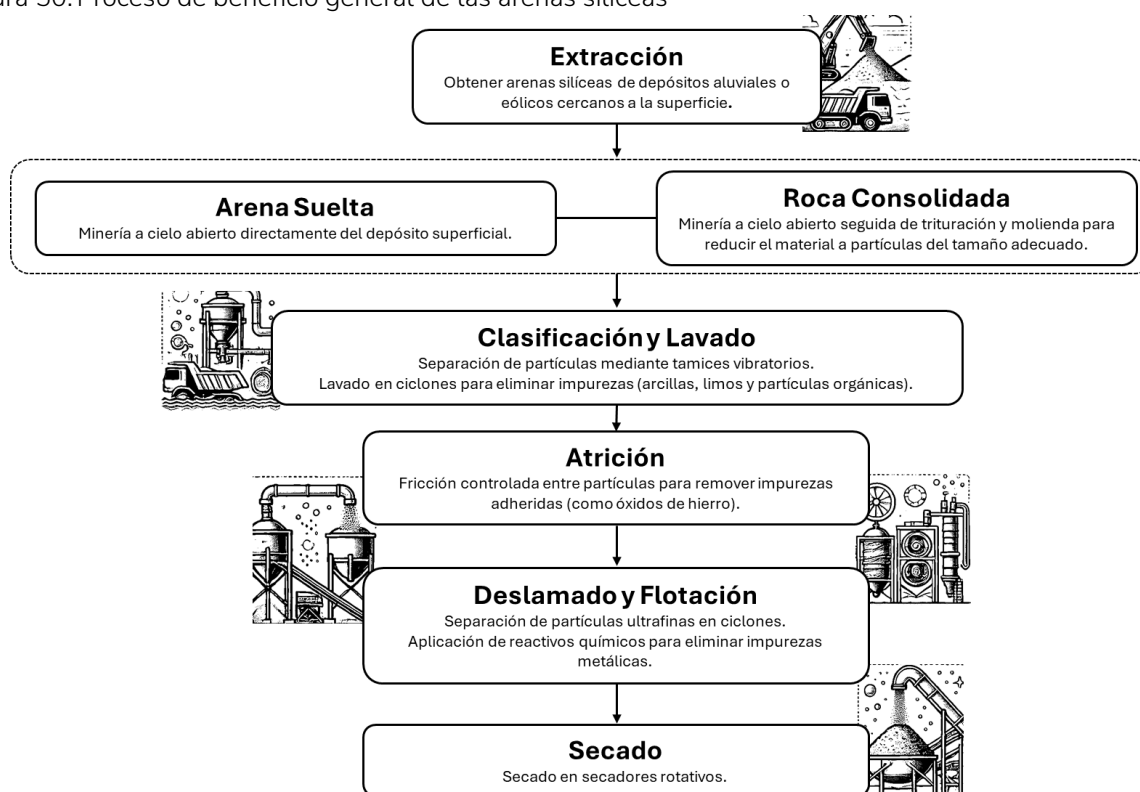
Después de la extracción, las arenas pasan por un proceso de clasificación y lavado, en el cual se eliminan impurezas como arcillas, limos y partículas orgánicas. Este paso es clave tanto para arenas sueltas como para material triturado de roca, ya que asegura una granulometría uniforme y reduce el contenido de impurezas. Durante esta fase, se utilizan tamices vibratorios y ciclones que separan las partículas según su tamaño y densidad, lo cual es esencial para obtener un material limpio que cumpla con los estándares de las aplicaciones industriales que requieren alta pureza (911Metallurgist, 2023).

En el siguiente paso, las arenas son sometidas a un proceso de atrición, una fricción controlada entre partículas que permite eliminar impurezas adheridas a los granos de cuarzo, como óxidos de hierro y minerales pesados. Este proceso mejora la blancura y pureza de la arena, aspectos

especialmente importantes en aplicaciones de alta calidad, como la fabricación de vidrio y cerámica, donde se requieren altos niveles de transparencia y uniformidad en el producto final. Para arenas extraídas de roca, este paso es crucial para asegurar que las partículas finas derivadas de la trituración no contaminen el producto (Agencia Nacional de Minería, 2023), (911Metallurgist, 2023).

Para arenas que contienen impurezas metálicas persistentes, se emplean técnicas de deslamado y flotación. El deslamado utiliza ciclones para separar partículas ultrafinas que pueden comprometer la calidad del producto, mientras que la flotación, con reactivos químicos específicos, elimina impurezas metálicas como el hierro, lo que es fundamental para aplicaciones en vidrio de alta calidad y dispositivos fotovoltaicos, donde es crucial minimizar la presencia de metales que podrían generar imperfecciones en el producto final (911Metallurgist, 2023).

Figura 50. Proceso de beneficio general de las arenas silíceas



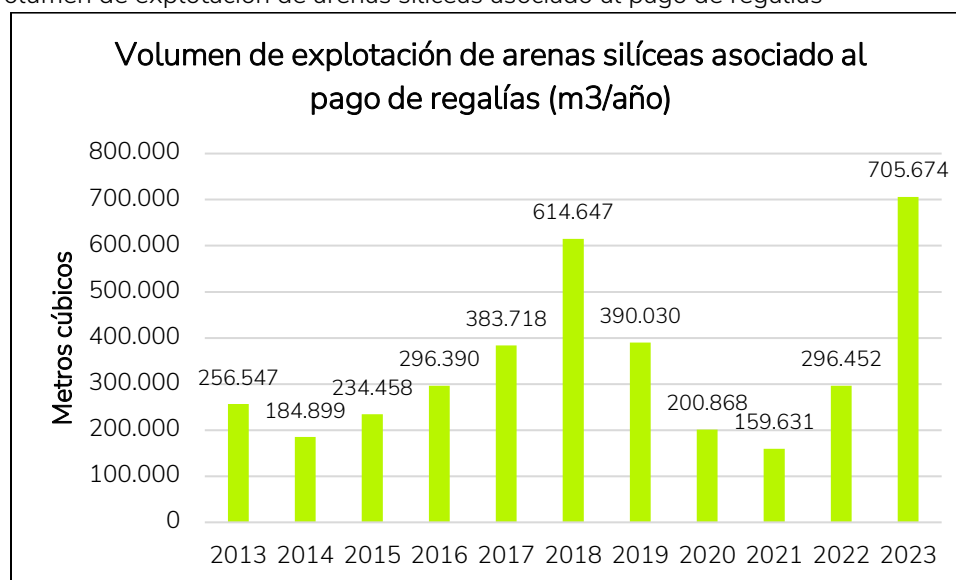
Fuente: elaboración propia basada en datos de Agencia Nacional de Minería (2023) y 911Metallurgist (2023)

Finalmente, tanto las arenas provenientes de depósitos sueltos como de roca triturada pasan por un proceso de secado en secadores rotativos, que elimina la humedad residual y permite que la arena conserve sus propiedades físicas y químicas durante el almacenamiento y transporte. Este secado asegura que el producto llegue en óptimas condiciones a su destino, listo para satisfacer los altos estándares de calidad y estabilidad que exigen las industrias avanzadas (Geología Web, 2023).

15.3 Producción y oferta de arenas silíceas

Entre 2013 y 2023, la producción de arenas silíceas estuvo en promedio en el orden de los 338.400 metros cúbicos al año (ver Figura 51). La mayor parte del mineral explotado se destina al consumo nacional, pues en su mayoría la arena silícea es destinada para la fabricación de vidrios y el desarrollo de los sectores de la construcción e infraestructura.

Figura 51. Volumen de explotación de arenas silíceas asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en información de la Agencia Nacional de Minería

16 Calizas

16.1 Definición, potencial geológico y titulación para calizas

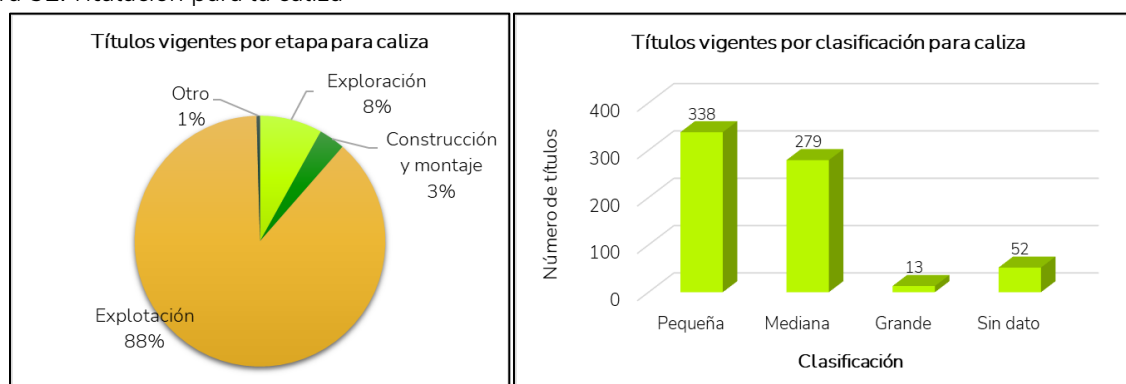
La caliza es una roca sedimentaria compuesta principalmente por calcita o carbonato de calcio (CaCO_3); también acompañan otros minerales como son dolomita, aragonito o siderita. Con respecto a su origen, se distinguen las calizas formadas por precipitación de carbonato cálcico, las de origen orgánico producto de acumulaciones de restos calcáreos de seres vivos, y las de origen detrítico, que son el resultado de la acumulación y compactación de barros calcáreos (Renzoni G. C., 2007).

Los yacimientos de caliza se encuentran ampliamente distribuidos por todo el país y están asociados a unidades sedimentarias y metamórficas distribuidas principalmente en la cordillera oriental y central y en la región caribe, en departamentos como Tolima, Boyacá, Valle del Cauca, Bolívar, Magdalena, Sucre, Meta, Cundinamarca, Norte Santander, Santander, Atlántico y Antioquia, entre otros (Agencia Nacional de Minería - ANM, 2017). Según la Agencia Nacional de Minería, se requiere incrementar la información geocientífica relacionada con la calidad de la caliza en las diferentes regiones del país, para establecer su posible uso. También mencionan que, para

el uso siderúrgico, las calizas deben ser ricas en contenido de magnesio (Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento, 2024).

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 682 títulos vigentes que incluyen la caliza como mineral principal, correspondientes a 230.583 hectáreas. El 88% de los títulos están en etapa de explotación, 3% en etapa de construcción y montaje y 8% en exploración; distribuidos en su mayoría entre pequeña minería con 338 títulos (49,6%) y mediana minería con 279 títulos (40,9%), como se ve en la Figura 52. Este mineral se explota principalmente por minería a cielo abierto (canteras).

Figura 52. Titulación para la caliza



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

16.2 Usos, productos y procesos de beneficio para obtención de cal, carbonato de calcio y clinker

La caliza es usada en la industria de la construcción principalmente para la fabricación del cemento, pero también como roca fragmentada, agregado, en mezcla de materiales para bases y otros similares. También se utiliza como fundente en la industria de la fundición y refinación del hierro y otros metales, en la industria de productos químicos para producir cal, como acondicionador del suelo en la industria de agroquímicos o en la fabricación de vidrio como neutralizante de ácidos (Coordinación General de Minería - México, 2013) (Renzoni G. C., 2007).

En Colombia, el 98% de la caliza producida se utiliza en la industria del cemento y sus derivados, mientras que el 2% restante se utiliza como fundente en la industria siderúrgica, fabricación de cal o como roca ornamental en la industria de la construcción (Agencia Nacional de Minería - ANM, 2017). Comercialmente se conocen las variedades: cal viva (óxido de calcio), cal hidratada o apagada (hidróxido de calcio), cal hidráulica (hidróxido de calcio, sílica y alúmina), carbonato de calcio molido, carbonato de calcio precipitado y variedades de cemento (Coordinación General de Minería - México, 2013).

Los principales derivados de las calizas son la cal, el carbonato de calcio y el clinker para la elaboración del cemento. A continuación, se presentan brevemente los procesos de beneficio de la caliza para obtener cada uno de estos productos.

16.2.1 Cal

Se conoce con este nombre las formas físicas del óxido de calcio (CaO) y es producto de calcinación de la caliza. Se denomina cal viva al óxido de calcio y cal apagada a la cal hidratada o hidróxido de calcio. Se utilizan en procesos metalúrgicos como la industria del acero o la fundición de metales no ferrosos, como tratamiento de aguas, elaboración de productos químicos, pulpa de papel, cerámica y recubrimientos, entre otros.

Para obtener la cal, se extrae la caliza, se tritura hasta obtener un tamaño homogéneo (por esto se puede realizar solo una trituración primaria o pasar el material por trituración secundaria) y posteriormente se ingresa el material a calcinación por exposición directa al fuego. De allí el material se somete a un proceso de enfriamiento e inspección, esto para evitar fragmentos de roca sin calcinar, y se somete a un cribado para separar por tamaños el material. Según la necesidad del consumidor final, se pueden vender guijarros o fragmentos de mayor tamaño de esta cal. Sin embargo, la mayoría de los consumidores prefieren el material triturado y pulverizado, por lo que este proceso también se puede realizar para obtener cal viva molida (Ver Figura 53).

Para obtener cal apagada o hidratada se somete la cal viva a un proceso de hidratación, el cual puede variar según la calidad de la cal viva: si se trata de cal viva alta en calcio solo se le agrega agua y se somete a un separador de residuos. Si se trata de cal viva dolomítica requiere un hidratador a presión y posterior molienda. En ambos casos se obtiene cal apagada o hidratada la cual es apta para comercialización (Coordinación General de Minería - México, 2013).

16.2.2 Carbonato de calcio

Se trata del CaCO_3 extraído de las calizas. Se comercializa en su variedad molido y precipitado, este último obtenido a través de los procesos químicos de calcinación, hidratación o apagamiento y carbonatación. El carbonato de calcio precipitado tiene menos impurezas y es usado en aplicaciones específicas de la industria manufacturera, farmacéutica y de alimentos; así como recubrimiento y en elastómeros.

Debido al proceso de obtención, usualmente se comercializa la variedad de carbonato de calcio molido, el cual tiene un procesamiento sencillo en el que se extrae el material, se tritura, se muele hasta convertir en polvo con una malla 200 o 300, se clasifica para separar por tamaño de partícula y remover sustancias extrañas y se envasa para su comercialización (Ver Figura 53).

16.2.3 Clinker (Cemento)

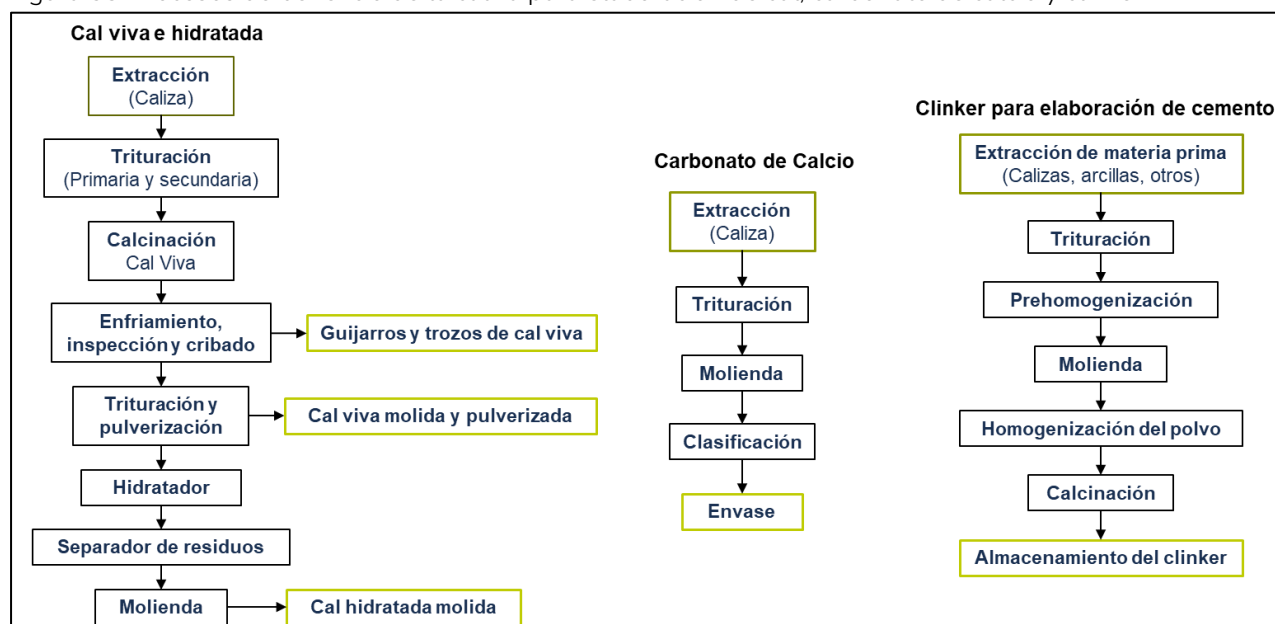
El cemento se trata de un polvo gris fabricado que, cuando se mezcla con agua, forma una masa plástica que se endurece. Se combina con agregados para hacer concreto y otros materiales resistentes y adaptables a diversos usos (U.S. Bureau of Mines, 1996). Existen diversas variedades comerciales, pero en general, la mayoría de los cementos usan como base 75% de caliza, 20% de

arcillas y otros minerales como hierro o sílice en cantidades pequeñas para obtener la composición deseada (Coordinación General de Minería - México, 2013).

Para el proceso de preparación de cemento se requiere la preparación de clínker, para el cual primero se extraen las materias primas (caliza y arcillas principalmente), se trituran y prehomogenizan buscando uniformidad en distribución de tamaño y composición química, se muelen y vuelven a homogeneización para mejorar la uniformidad del material previamente molido y se deposita en silos. De allí, se pasa a un proceso de calcinación, donde los materiales se hornean a temperaturas superiores a 1350°C, lo que permite una reacción y combinación de estas para generar **clínker** (ver Figura 53). Finalmente, el material se pasa a un enfriador y después del enfriamiento se almacena, para posteriormente mezclarse con yeso y realizar otros procesos para la producción de cemento (Coordinación General de Minería - México, 2013).

La producción de cemento en la totalidad de las etapas se presentará en el capítulo de mineral de yeso, por si se requiere profundizar en el tema.

Figura 53. Procesos de beneficio de la caliza para elaboración de cal, carbonato de calcio y clínker



Fuente: elaboración propia con base en Coordinación General de Minería – México (2013)

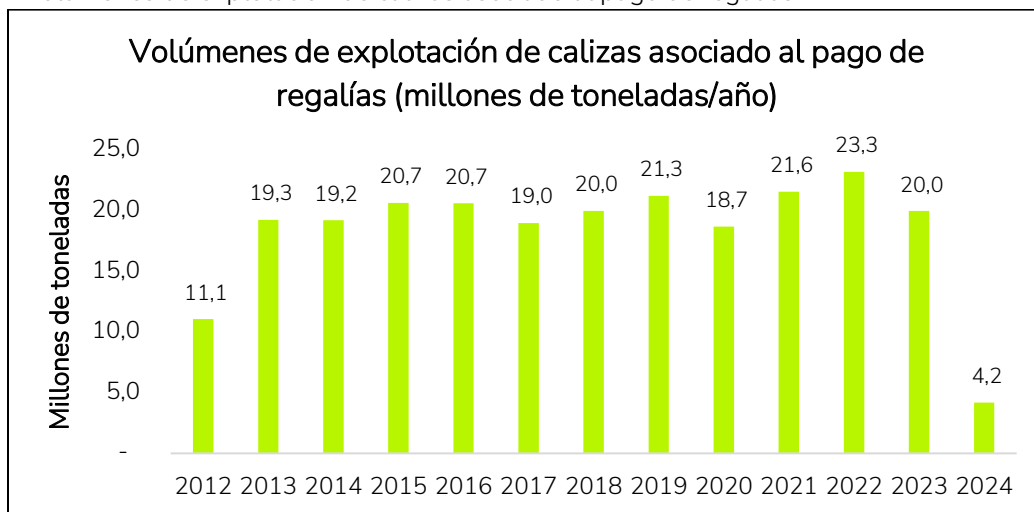
16.3 Producción, oferta y demanda de calizas

Entre 2015 y 2023, la producción de calizas ha estado en promedio en el orden de los 19,6 millones de toneladas por año y para 2024 con corte a agosto apenas estaban superando los 4,2 millones de toneladas (ver Figura 54) y se espera que la cifra de cierre de año no supere el promedio anual de los últimos ocho años. La producción de este mineral se distribuye a lo largo del país y se concentra principalmente en los departamentos de Bolívar (24%), Boyacá (23%),

Antioquia (15%) y Valle del Cauca (10%). Una vez más Boyacá se destaca por tener los principales yacimientos del mineral que se destinan para la industria siderúrgica.

Según la información registrada tanto en la cuenta satélite del Dane, como en el Sistema de Información Minero Colombiano, el total de la producción del mineral se destina para consumo interno y se destina principalmente para la producción de cemento, industria siderúrgica, infraestructura, agricultura, tratamiento de aguas, fabricación de papel, medicina e industria química (UPME, 2024).

Figura 54. Volúmenes de explotación de calizas asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

17 Yeso

17.1 Definición, potencial geológico y titulación para el yeso

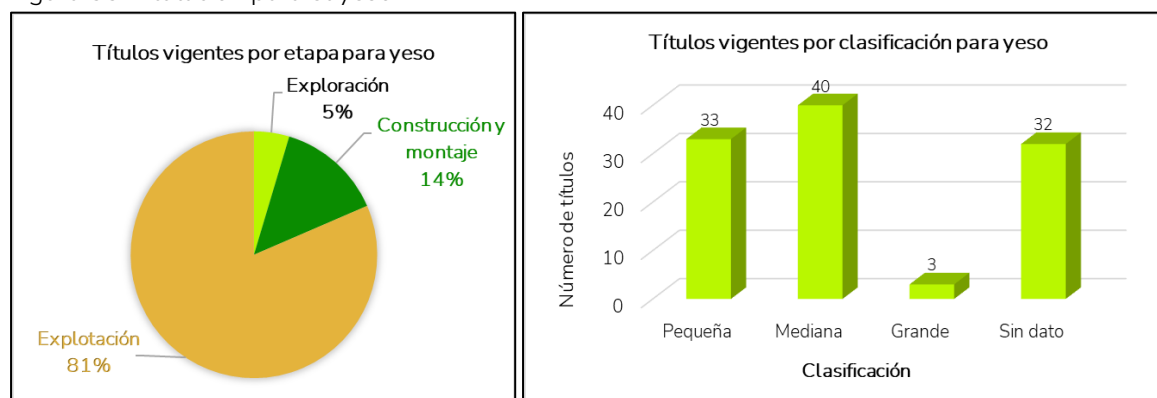
El yeso es un sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), su origen principal está asociado a secuencias evaporíticas por precipitación directa de soluciones en conexión con rocas calcáreas y arcillas en depósitos asociados con antiguas aguas saladas. También se puede encontrar por hidratación directa de la anhidrita; como filones en áreas volcánicas; o por la acción del ácido sulfúrico procedente de las piritas al actuar sobre la calcita de margas y arcillas calcáreas (Renzoni G. , 2007).

En Colombia, los depósitos de yeso por evaporación de agua marina son frecuentes en la cordillera oriental y en algunos sectores de la costa atlántica y el valle del Magdalena. Santander es el departamento que posee mayor producción de yeso del país, particularmente en los municipios de Los Santos, Zapatoca y Villanueva. También se ha presentado producción para los últimos años en el municipio de Uribia, en La Guajira (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023) (UPME, 2024).

En el departamento de Boyacá existen depósitos de yeso considerados de interés por su buena calidad y que ofrecen buenas reservas. La ocurrencia de yeso en este departamento proviene de tres tipos de depósito: por evaporación de agua marina, por reacción entre H_2SO_4 secuencias calcáreas y por precipitación de soluciones ricas en SO_4 al paso por secuencias yesíferas (Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, y otros, 2023).

Según el visor geográfico del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería con revisión el 31 de octubre de 2024 existen 108 títulos vigentes, correspondientes a 82.837 hectáreas. El 81% de los títulos están en etapa de explotación, 15% en etapa de construcción y montaje y 5% en exploración como se ve en la Figura 55. Se distribuye mayormente en pequeña y mediana minería con 30,6% y 37% respectivamente y 29 de los 32 títulos reportados sin dato se encuentran en estado “Terminado” o “en proceso de liquidación”.

Figura 55. Titulación para el yeso



Fuente: elaboración propia con base en datos de Anna Minería (Consulta 31/10/2024)

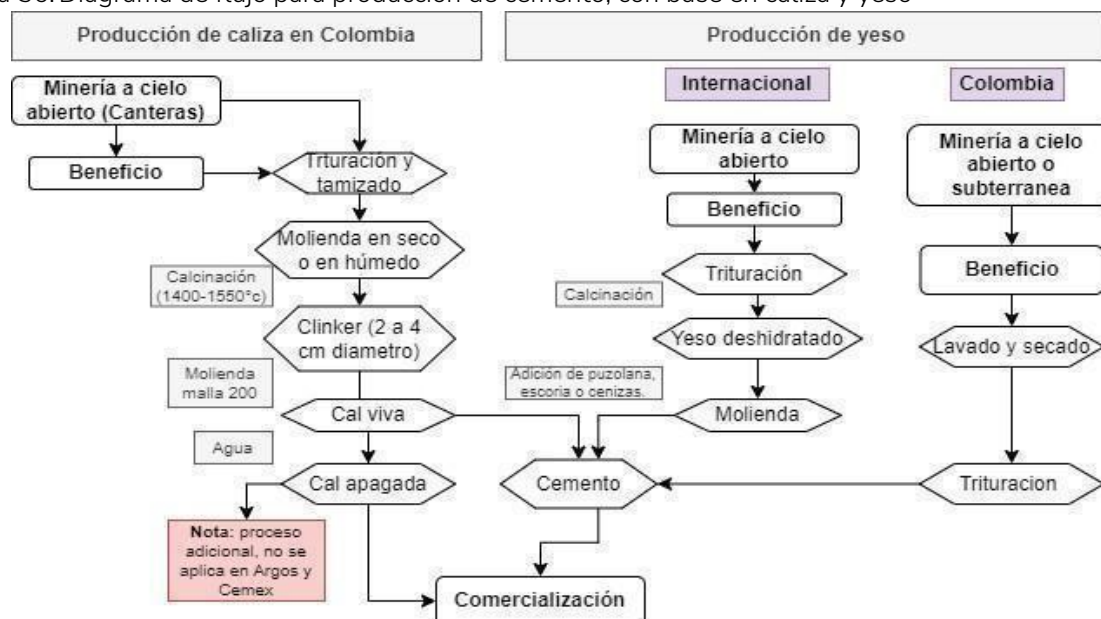
17.2 Usos, productos y procesos de beneficio del yeso

El yeso es un material con resistencia al fuego, no es abrasivo y funciona como agente oxidante. Se usa principalmente en la industria de la construcción, en productos como revestimientos, estuco o para preparar superficies para decoraciones, entre otros. Se emplea además como yeso crudo para la producción de cemento Portland como retardador de fraguado. En la industria de agroquímicos se considera una buena fuente de calcio y azufre por lo que se usa para la fabricación de fertilizantes, así como neutralizador o para mejorar la permeabilidad de ciertos suelos y por lo tanto potenciar la productividad. También se utiliza en otras industrias como la química, cerámica, fabricación de papel, de tizas o, la más común, en medicina como elaboración de moldes para ortopedia, entre otros (Renzoni G. , 2007) (Subsecretaría de Minería - México, 2017).

En Colombia la extracción de este mineral se realiza tanto a cielo abierto como de manera subterránea. En ambos casos el material pasa a un proceso de beneficio sencillo en el que se tritura previo a la comercialización. Para la minería a cielo abierto, se debe realizar un previo lavado y secado del material (Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética, 2024).

Los procesos descritos previamente para la producción de caliza y la producción de yeso se describen en conjunto mediante la Figura 56, donde se puede observar el método de producción de cemento empleado en Colombia y el método de producción de yeso empleado tanto a nivel nacional como internacional donde se tienen pasos extra como la calcinación (240 °C) y remolienda para obtener un producto de mejor calidad (Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética, 2024)..

Figura 56. Diagrama de flujo para producción de cemento, con base en caliza y yeso



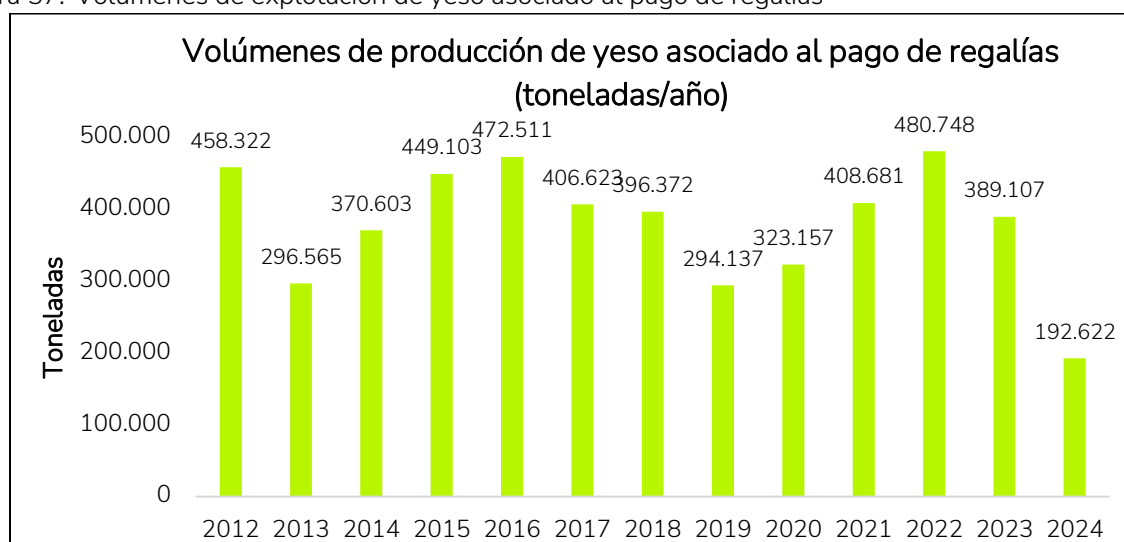
Fuente: (Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética, 2024).

17.3 Producción y oferta de yeso

Entre 2015 y 2022, la producción de yeso estuvo en promedio en el orden de las 395 mil toneladas por año y para 2024 con corte a agosto apenas se estaban superando las 192 mil toneladas y se espera que la cifra de cierre de año no supere el promedio anual de los últimos ocho años (ver Figura 57).

La producción de este mineral se concentra en el departamento de Santander y si bien existe en otras zonas del país sus niveles de producción son mucho menores. Según la información registrada tanto en la cuenta satélite del Dane, como en el Sistema de Información Minero Colombiano, casi la totalidad de la producción del mineral se destina para consumo interno, principalmente para actividades de construcción, agricultura y algunos usos menores en la medicina.

Figura 57. Volúmenes de explotación de yeso asociado al pago de regalías



Fuente: elaboración propia con base en cifras publicadas en el SIMCO (Consulta 27/09/2024)

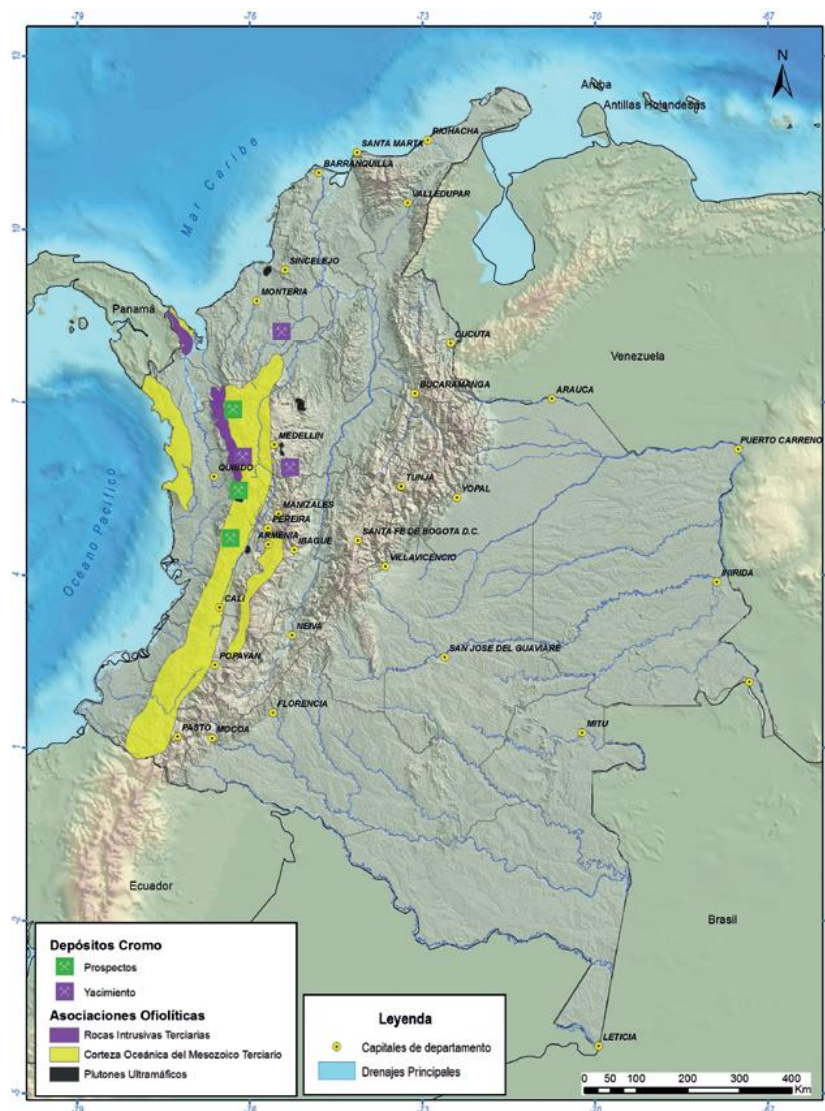
18 Cromo (Cr)

18.1 Definición, potencial geológico y titulación del cromo

El cromo es un metal de transición, de color plateado, duro y con alta resistencia a la corrosión, conocido por su capacidad para conferir brillo y durabilidad a las aleaciones metálicas, especialmente en el acero inoxidable. En la naturaleza, el cromo no se encuentra en estado libre; su mineral más significativo por abundancia y valor económico es la cromita (FeCr_2O_4). Las cromitas de interés comercial contienen entre un 25 y un 65 % de Cr_2O_3 y están libres de impurezas o ganga (González, 2019).

En Colombia, la cromita se encuentra en depósitos podiformes, asociados a rocas máficas y ultramáficas dentro de complejos ofiolíticos. Estas rocas se distribuyen en tres cinturones geológicos principales: el Cinturón Ofiolítico Romeral, el Cinturón Ultramáfico del Atrato y el Cinturón Ofiolítico del Caribe, todos ubicados en el sistema de fallas Cauca-Romeral, tal como se observa en la Figura 58 (González, 2019). Aunque existen varios cuerpos de estas rocas en los cinturones Romeral y Atrato, la cromita solo se ha identificado en dos sitios: las Dunitas de Medellín, en Antioquia, y las Serpentinitas de Parashi, en La Guajira. De estos depósitos, únicamente el ubicado en Medellín fue económicamente viable para su explotación, aunque sus cromitas ya fueron completamente extraídas (UPME, EY & JTBOYD, 2018).

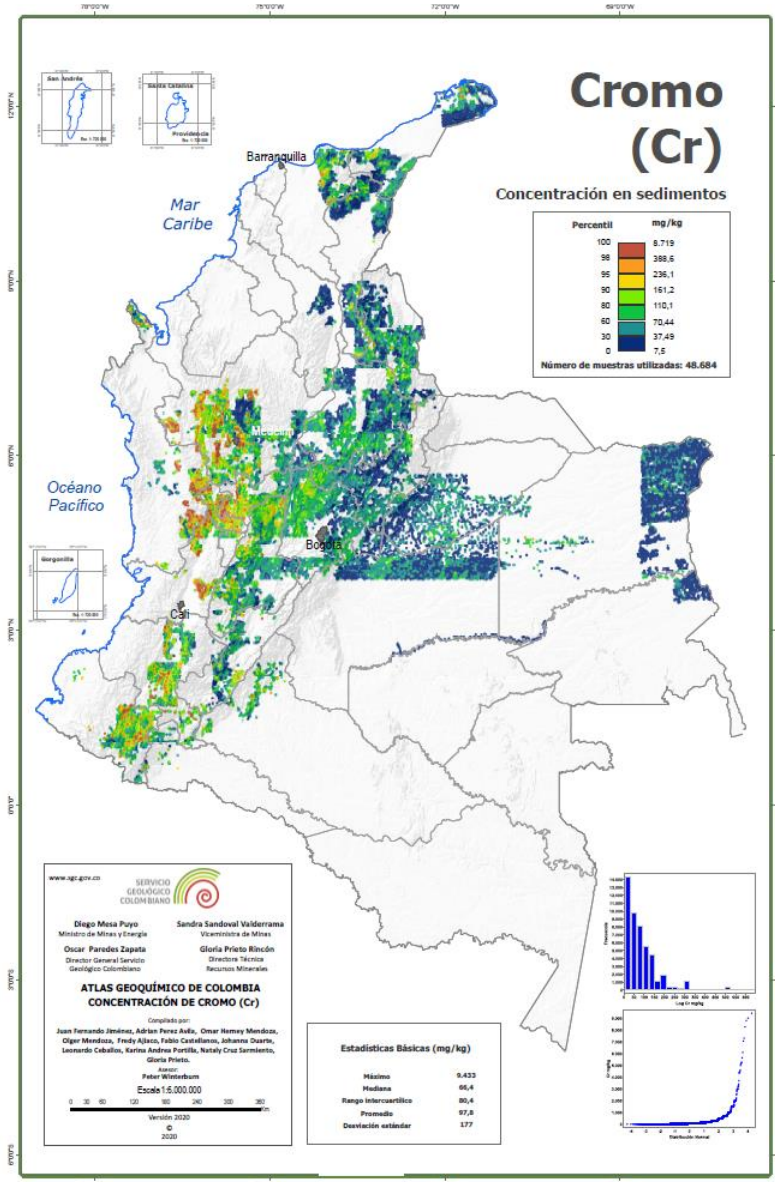
Figura 58. Sistema de fallas Cauca-Romeral con ofiolitas asociadas



Fuente: tomado de (González, 2019)

Los análisis geoquímicos del Servicio Geológico Colombiano (2020) han confirmado la presencia de concentraciones significativas de cromo en el occidente de Colombia y en la región de La Guajira (Figura 59). Los estudios de sedimentos y muestras de rocas indican que el enriquecimiento de cromo está vinculado a las fajas ofiolíticas en estos cinturones geológicos. No obstante, la naturaleza dispersa y la escala reducida de estos depósitos limitan el potencial para desarrollar proyectos mineros (Jiménez, Duarte, Pérez, & Castellanos, 2020).

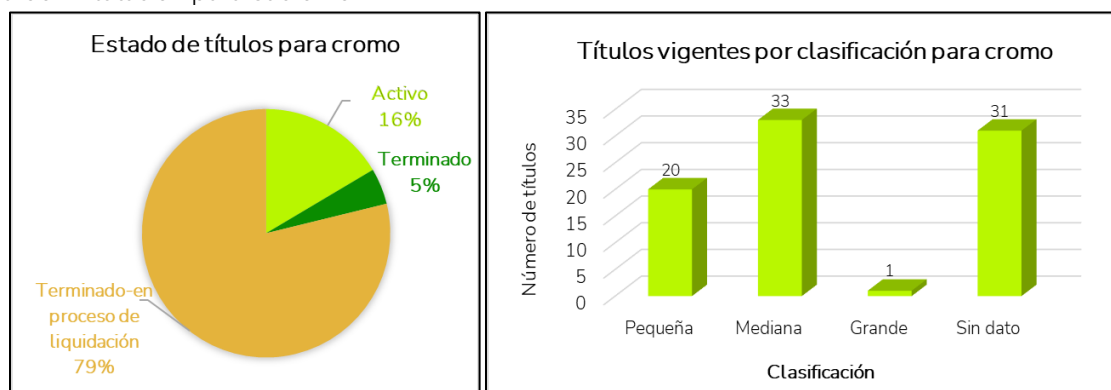
Figura 59. Concentración de cromo en sedimentos



Fuente: tomado de (Jiménez, Duarte, Pérez, & Castellanos, 2020)

Según datos del Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería, actualizados al 31 de octubre de 2024, en Colombia existen 84 títulos mineros activos que incluyen el cromo como mineral principal, abarcando un total de 73.535 hectáreas. Del total de estos títulos, el 84% se encuentra en estado terminado o en proceso de liquidación, como se observa en la Figura 60. La mayor parte de estos títulos corresponde a proyectos de pequeña y mediana minería, con un 24% y un 39%, respectivamente; y solamente un 1% de gran minería.

Figura 60. Titulación para el cromo



Fuente: elaboración propia con datos de Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería

18.2 Usos, productos derivados y procesos de beneficio para el cromo

El cromo es un elemento fundamental en múltiples industrias gracias a sus propiedades de resistencia a la corrosión, al desgaste y al calor. Su uso principal se concentra en la industria metalúrgica, que emplea alrededor del 90% de la producción mundial de cromo, mientras que la industria química y la de productos refractarios y fundiciones utilizan cada una aproximadamente el 5% de este recurso (González, 2019).

En la metalurgia, el cromo se emplea para fabricar aleaciones, como el ferrocromo, que confiere dureza y resistencia, especialmente en el acero inoxidable, que suele contener entre un 8% y un 12% de cromo. Este tipo de acero es ampliamente utilizado en la construcción, fabricación de electrodomésticos y en la industria automotriz debido a su durabilidad y resistencia a la corrosión. En la industria química, el cromo es valorado por su estabilidad y capacidad para mantener el color, lo que lo convierte en un material idóneo para su uso como catalizador y pigmento. Además, compuestos como los cromatos y dicromatos actúan como inhibidores de la corrosión y son empleados en colorantes, fungicidas y esmaltes. En el caso de los materiales refractarios, el cromo es especialmente útil debido a su alto punto de fusión, lo que lo convierte en un componente esencial para la fabricación de ladrillos refractarios y equipos de hornos (González, 2019).

El proceso de beneficio de minerales de cromo, según las descripciones de González (2019) y Mining Pedia (2023), incluye una serie de etapas que optimizan el valor y pureza del cromo obtenido. En primer lugar, se realiza la extracción del mineral, proceso que varía según el tipo de depósito. La explotación de cromita puede llevarse a cabo mediante métodos a cielo abierto o subterráneos. Luego de la extracción, el mineral pasa por una etapa de trituración y molienda que permite reducir su tamaño a partículas adecuadas para los procesos de concentración y fundición. Tras esto, se procede a la clasificación y separación de la cromita de otros minerales presentes (Mining Pedia, 2023). Para lograrlo, se utilizan diversas técnicas de separación, tales como la gravedad, separación magnética y flotación; en Colombia, en particular, se recurre a métodos de medios densos y separadores magnéticos de tipo Frantz (González, 2019).

Una vez aislada la cromita, se somete a un proceso de tostado y lixiviado. El tostado implica calentar el mineral para eliminar impurezas, mientras que la lixiviación, realizada con ácido, permite disolver el cromo y prepararlo para la siguiente fase de procesamiento. En la etapa de precipitación y refinación, el cromo se separa en forma sólida mediante ajustes en el pH de la solución y se filtra para obtener un producto más puro. Este cromo puede pasar por una refinación adicional para asegurar la eliminación completa de impurezas, resultando en un material de alta calidad.

En ciertos casos, el cromo refinado se utiliza en fundición y aleación, donde se mezcla con metales como el hierro o el níquel para crear aleaciones con características específicas, como el acero inoxidable, que ofrece resistencia a la corrosión, durabilidad y capacidad de soportar altas temperaturas. Finalmente, el producto obtenido, ya sea cromo puro, aleaciones de cromo o materiales intermedios, es empaquetado y preparado para su distribución a las industrias que dependen de este recurso para sus actividades productivas. Este proceso de beneficio asegura un cromo de alta calidad, esencial para las aplicaciones técnicas e industriales que requieren un material resistente y durable (González, 2019), (Mining Pedia, 2023).

Figura 61. Proceso de beneficio de minerales de Cromo



Fuente: elaboración propia con base en Gonzales (2019) y Mining Pedia (2023).

19 Referencias

- 911Metallurgist. (2023). *Procesamiento de arena de sílice: etapas y beneficios*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/procesamiento-arena-silica/>
- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA. (1995). *AP-42, Capítulo 11.19.1: Procesamiento de arena y grava*. Obtenido de *Procesamiento de arena y grava*: <https://www.epa.gov>
- Agencia Nacional de Minería - ANM. (2017). *Calizas*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha_calizas_es.pdf
- Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, Bayter, M., Rodríguez, F., Sierra, H., Ortega, M., Tovar, C., . . . Cañas, W. (2023). *Determinación de Minerales de Interés Estratégico para Colombia*. Agencia Nacional de Minería, Bogotá.
- Agencia Nacional de Minería – Grupo de Promoción, Rueda, C., Rodríguez, F., Ortega, M., Ballesteros, J., Tovar, C., . . . Figueroa, G. (2023). *Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia*. Vicepresidencia de Promoción y Fomento - Agencia Nacional de Minería, Bogotá.
- Agencia Nacional de Minería. (2022). *Ficha de esmeraldas*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ficha_esmeraldas_es.pdf
- Agencia Nacional de Minería. (2023). *Informe de producción y concesiones de arenas silíceas*.
- Agencia Nacional de Minería. (2023). *Resolución Número 1006 de 30 nov 2023, "Por medio de la cual se determinan los minerales de interés estratégico para el País"*.
- Álvarez, J. G., Obando, M. C., Poveda, G. A., & Sánchez, S. F. (2023). *Diagnóstico preliminar del comportamiento de las tendencias en los mercados de materiales de*. Bogotá: Subdirección de Minería - Unidad de Planeación Minero Eenergética.
- American Mineralogist. (2022). *Smithsonite Mineral Data*. Obtenido de <https://www.minsocam.org/msa/AmMin>
- Arias, A., & López, J. (2019). Oro. En *Recursos Minerales de Colombia*, Vol. 2. Servicio Geológico Colombiano.
- Boldt, J. R., & Queneau, P. (1967). *The winning of nickel, its geology, mining and extractive metallurgy*. Londres: Methuen and Co. Ltda.
- Bonilla, P. (2024). *Como saber si mi esmeralda colombiana fue tratada*. Obtenido de Emerald by love: https://emeraldbyllove.com/es/blogs/news/how-to-know-if-my-colombian-emerald-was-treated?srltid=AfmBOoo9mal78baTbDuizkMvLh3CbHnqsSFT6FoLllvcPL7kp_AXMU0N
- Britannica. (2024). *Zinc: Properties, Uses, & Facts*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/zinc>
- British Geological Survey. (2007). *Copper*. Natural Environment Research Council.
- British Geological Survey. (2022). *Nickel: Mineral Commodity Profile*. Natural Environment Research Council. Obtenido de <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/commodity/index.html>

- Buenaventura, J. (2002). *Memoria explicativa del mapa de recursos minerales de Colombia: minerales metálicos, preciosos y energéticos a escalas 1:500.000 Y 1:1'500.000*. INGEOMINAS, Bogotá. Recuperado el 23 de 12 de 2023, de https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/f0297_Mapa_Recursos_Energeticos_1500-/Documento/pdf/Memoria%20Recursos%20Minerales.pdf
- C.I. Milpa S.A. (2023). *Coque - Base del Desarrollo Orgullo Nacional*. Obtenido de <https://acmineria.com.co/sitio/wp-content/uploads/2023/05/Proceso-productivo-Coque.pptx.pdf>
- Cahuana, A. (2014). *Sílice: el aliado oculto y estratégico para el desarrollo empresarial de la industria nacional*. Seminario de grado – Especialización en alta gerencia, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12499/Ensayo%20tesis%20silice%20%20Alexa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Coordinación General de Minería - México. (2013). *Perfil de Mercado de la Caliza*. Secretaría de Economía de México, Dirección General de Desarrollo Minero. Recuperado el 05 de 03 de 2024, de https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_caliza_1013.pdf
- Copper Development Association. (2023). *Properties & Uses*. Copper.org. Obtenido de <https://www.copper.org>
- CRU Consulting & Unidad de Planeación Minero Energética. (2018). *Roca fosfórica. Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano y largo plazo con vigencia al año 2035*. CRU International Limited.
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011). *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Elsevier.
- Dill, H. G. (2010). The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, 100((1-4)).
- El Bamiki, R., Raji, O., Ouabid, M., Elghali, A., Khadiri Yazami, O., & Bodinier, J. (2021). Phosphate rocks: A review of sedimentary and igneous occurrences in Morocco. *Minerals*.
- Encyclopedia MDPI. (2023). *Platinum Group Minerals*. Obtenido de <https://encyclopedia.pub>
- Enghag, P. (2004). *Encyclopedia of the Elements: Technical Data, History, Processing, Applications*. Wiley - VCH.
- Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Unidad de Planeación Minero Energética. (2024). *Escenarios y modelo de simulación para minerales estratégicos en Colombia*.
- Frangiskos, P., & Kontopoulos, A. (1976). Beneficiation of magnesite ores by dry calcination and air separation. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 85.

- Geología Web. (2023). *Arena de sílice: características, usos y beneficios*. Obtenido de Geología Web: <https://geologiaweb.com/materiales/arena-de-silice/>
- Geology Science. (2023). *Manganese (Mn) Ore | Minerals, Occurrence, Deposits*. Obtenido de <https://geologyscience.com/manganese-mn-ore-minerals-occurrence-deposits/>
- Geosciences Libre Texts. (2021). *Soil and sediment properties*. Obtenido de <https://geo.libretexts.org>
- Geoterra Dominicana. (2023). *Los secretos detrás de la producción y extracción de arena silícea*. Obtenido de <https://www.geoterradominicana.com/articulos/los-secretos-detras-de-la-produccion-y-extraccion-de-arena-silica/>
- Gómez, J., Mateus-Zabala, D., & Eds. (2020). *The Geology of Colombia, Volume 1: Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiana.
- González, H. (2019). Cromo. En *Recursos Minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Government of Canada. (2024). *Iron ore facts*. Obtenido de Mineral and metal facts: <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/mining-data-statistics-and-analysis/minerals-metals-facts/iron-ore-facts/20517>
- Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the Elements*. Pergamon.
- Grupo de Promoción - Vicepresidencia de Promoción y Fomento. (2024). *Panorama de la Industria del Acero en Colombia. Oportunidades y retos en la Siderúrgica de Aceros Planos*. Agencia Nacional de Minería, Bogotá.
- Habashi, F. (2017). *Handbook of Extractive Metallurgy* (Vol. 2). Wiley-VCH.
- Horton, B. K., & Mateus-Zabala, L. A. (2010). Sedimentary basins and geology of Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(2), 55-72.
- Hunt, A. R., & Ryans, R. (2019). *Copper: Properties and Applications*. Springer.
- Industriapedia. (2023). *¿Qué es la arena de sílice y para que se utiliza?* Obtenido de Industriapedia: <https://industriapedia.com/que-es-arena-de-silice/>
- International Copper Association. (2023). *Copper: An Essential Resource*. Obtenido de <https://internationalcopper.org>
- International Finance Corporation. (2007). *Environmental, health, and safety guidelines for construction materials extraction*. Obtenido de <https://www.ifc.org>
- International Nickel Study Group. (2023). *World Nickel Statistics*. Obtenido de <https://www.insg.org>
- International Platinum Group Metals Association. (2023). *Applications of Platinum Group Metals*. Obtenido de <https://ipa-news.com>
- International Zinc Association. (2023). *Zinc: The Essential Sustainable Material*. Obtenido de <https://www.zinc.org/>

- Jara, J. J., Recabarren, J., Urzúa, O., Dufey, A., & Sucre, C. G. (2024). *Análisis estratégico del desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia*. anco Interamericano de Desarrollo, División de Energía.
- Jiménez, J. F., Castellanos, F., & Mendoza, O. H. (2020). Zinc (Zn). *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*.
- Jiménez, J. F., Duarte, J., Pérez, A., & Castellanos, F. (2020). Cromo (Cr). *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*.
- Klein, C., & Dutrow, B. (2007). *Manual of Mineral Science* (23 ed.). Wiley.
- López-Isaza, J., Leal-Mejía, H., Luengas Burgos, C. S., Velásquez Cardenas, L. E., Celada Arango, C., Sepúlveda Ospina, M. J., . . . Hart, C. (2018). *Memoria Explicativa Mapa Metalogénico de Colombia: Principios, conceptos y modelos de depósito y manifestaciones u ocurrencias minerales para Colombia*. Servicio Geológico Colombiano.
- Martin, C., Rojas, N., Martínez, G., Rojas, S., Terraza, R., & Cauca, A. (2020). *Estado del conocimiento en la exploración de fosfatos en el costado oriental del río Magdalena y sector sureste de Ataco, calle superior del Magdalena, departamentos del Huila y Tolima*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Materials World. (2003). Gold. Applications and developments in the electronics, biomaterials and catalysis. *Materials World*, 11(2), 12-14.
- McDonald, E. (2007). *Handbook of gold exploration and evaluation*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Mendoza, O. G., Ceballos, L., Pérez, A., Castellanos, F., & Mendoza, O. H. (2020). Aluminio (Al_2O_3). (S. G. Colombiano, Ed.) *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*.
- Mendoza, O. G., Ceballos, L., Pérez, A., Castellanos, F., & Rincón, A. (2020). Magnesio (MgO). *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*.
- Mendoza, O. H., Ceballos, L., Pérez, A., & Jiménez, J. F. (2020). Manganeso (Mn). *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*.
- Mendoza, O. H., Cruz, N., Pérez, A., Castellanos, F., & Jiménez, J. F. (2020). *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*. Servicio Geológico Colombiano.
- Mendoza, O. H., Portilla, K. A., Pérez, A., & Castellanos, F. (2020). Oro (Au). En *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2020*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Metalcess. (2023). *Extraction of Magnesium*. Obtenido de https://www.metalcess.com/meta_extracting/magnesium
- Michel, J. (2013). Introduction to copper and copper alloys. Copper Development Association Inc.
- Mindat.org. (2024). *Hemimorphite Mineral Information*. Obtenido de <https://www.mindat.org/>

- Mining Pedia. (2023). *Step by step. Guide for Chrome Plant Process Flow Explained*. Obtenido de Mining Pedia: <https://www.miningpedia.cn/dressing/step-by-step-guide-for-chrome-plant-process-flow-explained.html>
- Montoya, J., & Reyes, J. (2023). *Potencial geológico en Colombia: Depósitos de construcción*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Moss, M. A., & Whitmore, M. R. (2018). Zinc and its applications in batteries: Opportunities and challenges. *Journal of Power Sources*, 43-55.
- Nature Communications. (2022). *Transformation of abundant magnesium silicate minerals for enhanced CO2 sequestration*.
- Nichols, G. (2023). *Sedimentology and Stratigraphy, 3rd Edition*. Wiley.
- Pulido, O. (2019). Arenas y gravas. En *Recursos Minerales de Colombia, vol1*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Reimann, C., & Caritat, P. (1998). *Chemical Elements in the Environment*. Springer.
- Renzoni, G. (2007). Yeso. En INGEOMINAS, & GI GEORECURSOS S.A., *Recursos Minerales de Colombia Tomo III - Minerales Industriales* (Vol. Publicaciones Especiales de INGEOMINAS No. 29). Bogotá.
- Renzoni, G. C. (2007). Caliza. En INGEOMINAS, & GI. GEORECURSOS S.A., *Recursos Minerales de Colombia Tomo IV - Minerales energéticos y materiales de construcción* (Vol. Publicaciones Especiales de INGEOMINAS No. 29). Bogotá.
- Rincón M., M. A., Monroy, W. O., Alvarado B., S. I., Ibáñez P., R., Duarte B., C. I., & Córdoba, R. A. (2011). *Mapa Potencial Carbonífero de Colombia 2011 Escala 1:1.500.000*. Subdirección de Recursos del Subsuelo - Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Royal Society of Chemistry. (2024). *Zinc - Element information, properties and uses*. Obtenido de <https://www.rsc.org/periodic-table/element/30/zinc>
- Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2022). *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier.
- Schulte, R. F., & Foley, N. K. (2013). Compilation of gallium resource data for bauxite deposits. *U.S. Geological Survey*.
- Schwarz, K. O. (2019). Advances in the use of zinc oxide in chemical industry. *Chemical Engineering Journal*, 658-672.
- Sepúlveda Ospina, J., Celada Arango, C. M., Murillo Bohórquez, H., Gómez Casallas, M., Salgado González, D., Prieto, D., . . . Leal-Mejía, H. (2022). *Mapa Metalogénico de Colombia, edición 2022*. Servicio Geológico Colombiano.
- Sepúlveda, J., Celada, C., Leal-Mejía, H., Murillo, H., Rodríguez, A., Gómez, M., . . . Hart, C. (2020). *Mapa Metalogénico de Colombia 2020. Memoria Explicativa*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Servicio Geológico Colombiano & Ministerio de Minas y Energía. (2018). *Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso del mercurio. Andes (Antioquia)*.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Recursos minerales de Colombia: Depósitos y ocurrencias minerales (Grupo V: Minerales industriales)*. Bogotá D.C.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Mapa Metalogénico de Colombia*. Bogotá D.C.
- Servicio Geológico Colombiano. (2022). *Avance en potencial de minerales para transición energética en Colombia [Informe en construcción]*. Bogotá: Dirección de Recursos Minerales.
- Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Documento de Determinación de Minerales Estratégicos*. Bogotá D.C.
- Servicio Geológico Colombiano. (2024). Presentación en el marco del evento "Cadenas Productivas: Arenas Silíceas en la Industria Colombiana, Paneles Solares y Transición Energética". Bogotá.
- Sistema Integral de Gestión Minera - Anna Minería. (2023). *Visor geográfico de la minería en Colombia*. Obtenido de <https://annamineria.anm.gov.co>
- Sole, K. C., & Cole, P. M. (2018). *Solvent Extraction in Hydrometallurgy: Present and Future*. Springer.
- Subdirección de Minería, Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2021). *Análisis de técnicas de aprovechamiento de mineral de cobre en Colombia y posibles incidencias económicas*. Bogotá.
- Subsecretaría de Minería - México. (2017). *Perfil de Mercado del Yeso*. Dirección General de Desarrollo Minero. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287809/Perfil_Yeso_2017.pdf
- Tan, J., & Ramakrishna, S. (2021). Applications of Magnesium and its Alloys: A Review. *Applied Sciences*, 11(15).
- Terraza, R., & Montoya, D. (2011). *Las esmeraldas de Colombia en su ámbito geológico: excursión geológica a los cinturones esmeraldíferos de la Cordillera Oriental de Colombia*. INGEOMINAS.
- Terraza, R., Martin, C., Martínez, G., Rojas, S., & Rojas, N. (2019). *Exploración geológica de fosfatos en el Bloque Boyacá. Planchas 191 y 210. Informe Técnico*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- U.S. Bureau of Mines. (1996). *Dictionary of Mining, Mineral, & Related Terms* (Second Edition ed.). U.S. Department of the Interior.
- U.S. Geological Survey. (2023). *Bauxite and Alumina Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/bauxite-and-alumina-statistics-and-information>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Magnesium Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/magnesium-statistics-and-information>

- U.S. Geological Survey. (2023). *Manganese Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/manganese-statistics-and-information>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Nickel Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Platinum-Group Metals Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov>
- U.S. Geological Survey. (2023). *Zinc Mineral Resources*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/>
- Ulloa Melo, C. (2019). Hierro. En Servicio Geológico Colombiano, *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2009). *El níquel en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía.
- Universidad Nacional de Colombia. (2017). *Estudios sobre la obtención de magnesio y sus aplicaciones industriales*. Bogotá: Facultad de Ingeniería.
- UPME. (2024). *SIMCO - Sistema de Información Minero Colombiano*. Recuperado el 04 de 03 de 2024, de <https://www1.upme.gov.co/simco/>
- UPME, EY & JTBOYD. (2018). *Elaborar los modelos nacionales de oferta y demanda y balance de minerales, analizando los escenarios minerales del país y estableciendo proyecciones de oferta y demanda de minerales en el corto, mediano y largo plazo (a 2035)*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.
- Wood Mackenzie. (Junio de 2024). *Metallurgical coal energy transition outlook 2024*. Obtenido de Wood Mackenzie: <https://my.woodmac.com/reports/coal-metallurgical-coal-energy-transition-outlook-2024-150279534>
- World Gold Council. (2021). *The Golden Thread*. Obtenido de World Gold Council: <https://thegoldenthread.gold.org/>
- Zhou, J., Jago, B., & Martin, C. (2004). Establishing the process mineralogy of gold ores. *Boletín Técnico*, 03.
- Zientek, M. L., Loferski, P. J., Parks, H. L., Schulte, R. F., & Seal, R. R. (2017). *Platinum-group elements*. Obtenido de <https://pubs.usgs.gov>