



Diamante

Fotografia: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Rocks_with_quartz-type_inclusions_Maramure%C5%9F_diamonds.jpg

Diamante

Álvaro Murillo Rodríguez

Citación: Murillo, A. (2019). Diamante. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

La historia inicial del diamante se relaciona con las sociedades que habitaron el territorio de la India, alrededor del año 2800 a.c, donde se producía abundantemente a partir de la explotación de los placeres aluviales de los ríos Perner, Krishna y Godavari; luego se asoció con la divinidad y la buena suerte para quienes lo utilizaban y, por último, se identificó el color con las castas hindúes y únicamente los reyes podían utilizar todos los colores (Madehow.com, 2017). Se reconocieron sus cualidades como adorno y como material de gran dureza a partir del siglo XI, con el cual se podían tallar otros minerales y horadar las rocas. Sin embargo, la tradición de amuleto y otras consideraciones hicieron que Europa y el mundo occidental tardaran cerca de diez siglos en reconocer al diamante como gema y material de uso industrial, tiempo durante el cual el rubí y las esmeraldas fueron las gemas más importantes.

Durante la Edad Media, alrededor de 1300, el tabú (misterio y superstición) relacionado con el diamante y los tipos de tallado provenientes de la India se disiparon,

y muy pronto en Europa se empezó a usar como adorno y a apreciar sus propiedades físicas. La calidad de la gema se reconoció hasta el punto de que el rey Luis IX de Francia estableció una ley por medio de la cual solo el rey podía poseer diamantes. Luego de ser considerado con fines de atesoramiento, en el siglo XVII un tallador veneciano llamado Vincenzo Peruzzi desarrolló el corte llamado “brillante”, con el cual demostró la belleza, las intrincaciones y la perfección de esta piedra preciosa.

El diamante como una gema y, por ende, como material de joyería, tuvo un gran desarrollo, y desde esa época talladores especializados elaboraron cortes reconocidos mundialmente (figura 1). El diamante más grande hasta 1905 era parte de las joyas de la corona británica: se llamó Cullinam y pesaba 3106.75 Q. De este se obtuvo la Gran Estrella del África, con un peso de 530.2 Q, considerado como el diamante tallado más grande hasta 1985, cuando se obtuvo el Jubileo Dorado con 545.67 Q, de color amarillo (Schoner, 2004).

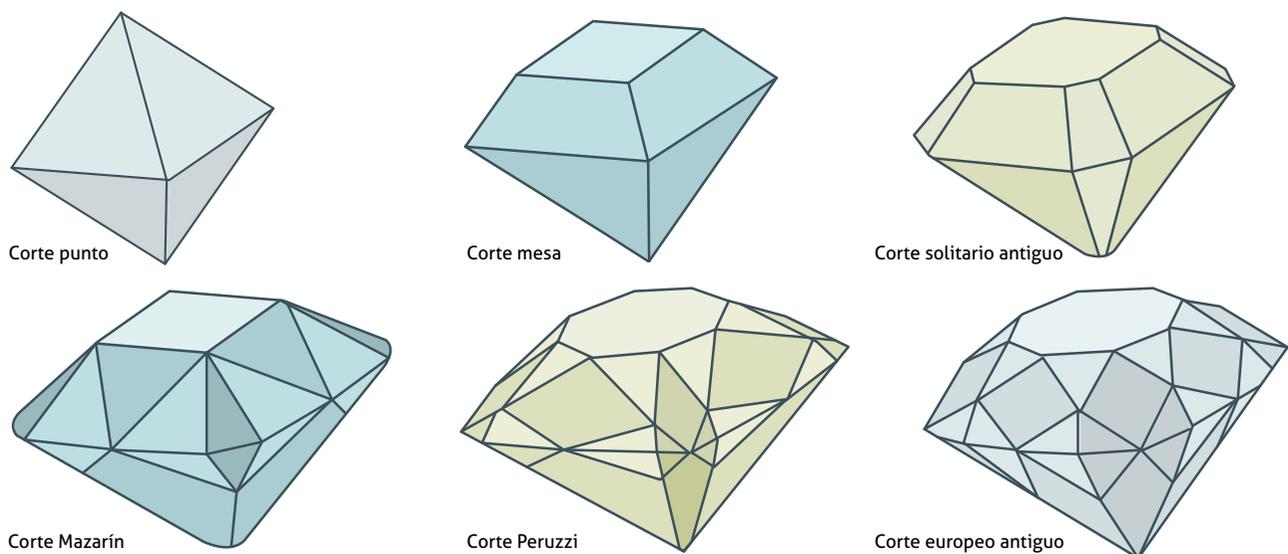


Figura 1. Registro de los cortes más reconocidos en los diamantes

Fuente: Schoner (2004)

Acerca del diamante como un mineral para la aplicación en la industria, se atribuye su aprovechamiento a las sociedades que poblaron China, alrededor del año 600 a. C., las cuales reconocieron su extraordinaria dureza, con la cual podían efectuar perforaciones y pulir otros minerales o metales (Madehow.com, 2017). Sin embargo, el empleo moderno de estas propiedades físicas del diamante lo redescubrió Henry Ford quien lo usó en la industria del automóvil, ejemplo seguido rápidamente por otras industrias. El diamante industrial puede tener origen natural, cuando se extrae de la roca y no posee las características de gema, o artificial, esto último a partir de 1954, cuando un equipo de investigadores al servicio de General Electric, encabezado por Tracy Hall, desarrolló la metodología (alta temperatura-alta presión) y la tecnología necesarias para producir diamante con fines abrasivos (Wikipedia.com, 2017a). Este mismo equipo logró producir cristales de diamante de calidad gema en 1970 y, a partir de 1980, se utiliza en esta manufactura el método de depositación de vapor químico (*chemical vapor deposition* [CVD], por su sigla en inglés), que comprende una serie de etapas de reacciones químicas en superficie en una fase gaseosa y la depositación de los productos obtenidos por esta reacción, es decir, el diamante, sobre la superficie de un sustrato sólido (Hemley, Yan y Chen, 2005). Los desarrollos recientes de esta técnica han ayudado a mejorar notablemente la tasa de formación de cristales, los cuales son producidos a una velocidad de crecimiento que varía entre 50 y 100 nm/h y con posibilidades de afinamiento que permiten alcanzar destacables propiedades mecánicas (Yan, Vohra, Mao, Hemley, 2002; Yan *et al.*, 2004). Estos diamantes industriales artificiales solo se producen de 3 Q, aproximadamente.

En el 2005 un equipo de físicos de la Universidad de Bayreuth, en Alemania, liderado por la científica Natalia Dubrovinskaia crearon el diamante policristalino superabrasivo *Aggregated Diamond Nanorods* (ADNR), alcanzando un módulo de 491 gigapascales (GPa) y superando al diamante natural, que tiene un módulo de 442 GPa. El carbono se utiliza a menudo como un elemento que exhibe alotropía, lo que significa que puede existir en más de una estructura multiatómica. Entre las que se encuentra el carbono amorfo (un componente de carbón), grafito y diamante, y ahora también incluye buckminsterfullereno, nanotubos de carbono, nanoforma de carbono y muchos más. (Felice, 2013).

Al someter varias formas de carbono a diferentes temperaturas y presiones se encontró que a partir de buckminsterfullereno C60, una temperatura de 2000 ° C y una

presión de 20 GPa. se obtenía cilindros sólidos, de 3 mm de altura y 1.8 mm de diámetro, hechos de un material que era compacto y translúcido. Sus patrones de difracción de rayos X indicaban que el material tenía una estructura de diamante y sus espectros Raman e IR eran similares a los obtenidos por nanodiamantes (Felice, 2013).

1. Usos

El uso del diamante como gema es reconocido a partir del siglo XI, como la base de la joyería, donde se aprovechan sus propiedades de alto índice de refracción y color, para lo cual se utilizan como parámetros de medida estándar de calidad los siguientes atributos: corte, color, claridad y quilate. Cuando el cristal no alcanza los niveles mínimos en estas cualidades para que se lo considere gema, se le clasifica como diamante para uso industrial y se aprovechan sus restantes propiedades físicas, empezando por las de la dureza, en la fabricación de abrasivos.

Las características químicas, cristalinas, eléctricas, ópticas y térmicas del diamante lo hacen uno de los mejores materiales para la industria de los recubrimientos contra el desgaste y resistentes a la corrosión de los amolamientos lubricados; en la fabricación de hilos metálicos y en usos especializados como bisturís, lentes, circuitos eléctricos, materiales de computación y otras tecnologías avanzadas (USGS, 2006).

En los amolamientos lubricados el diamante se aprovecha por su capacidad de corte y su propiedad de ser friable. En el primer caso, se pueden hacer cortes hasta de 1900 km de longitud sin necesidad de cambiar la herramienta y, en el segundo, se obtienen acabados ultrafinos. En la producción de hilos de metal se utilizan los dados de diamantes que, unidos, permiten obtener agujeros de diferentes tamaños a través de los cuales se halan los materiales que se convertirán en hilo, obteniéndose en el cobre hasta 24 000 km de longitud (Moon, Whateley y Evans, 2006), antes de que sea necesario volver a moldear el diamante.

En los usos especializados se aprovecha la estructura continua del cristal individual que, combinada con la dureza, la pureza, la estabilidad y la integridad que tiene el diamante, lo hace indispensable en procedimientos y operaciones tecnológicas (Roffman, Lieber y Solow, 2017). Estos autores corporativos (Lieber y Solow Co.) mencionan, por ejemplo, los bisturís de diamante, que se utilizan en los procedimientos quirúrgicos para rebanar y en la obtención de muestras de tejidos humanos y de otros materiales; los pulverizadores de agua a chorro para la

obtención de cortes especiales; en la fabricación de fibra óptica y algunas operaciones de grabado; en disipadores de calor y ventanas especiales de diamante y, por último, en las brocas para efectuar perforaciones en el grado de la ultraprecisión.

En el futuro, la nanotecnología basada en el diamante será un campo “brillante” si los microdispositivos construidos con esta tecnología superan a los de silicio, haciéndose, por tanto, con el mercado de las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC), al igual que con el de la biomedicina, dado que el diamante es hidrofóbico, con lo cual supera al silicio, que modifica sus propiedades en medios húmedos (Wangensteen, 2001). Además, el diamante no es tóxico ni alergénico cuando se introduce en el cuerpo de un ser vivo, a diferencia de los demás materiales empleados por lo general en nanotecnología. Un equipo de inventores en la Universidad de Vanderbilt (Tennessee, Estados Unidos) está explorando el uso de diamante policristalino como reemplazo de las células solares de silicio actualmente utilizadas en muchas aplicaciones espaciales, el profesor Timothy Fisher, Ingeniero meccánico y aeroespacial de la Universidad de los Angeles de California, indica que el “Diamante tiene una serie de ventajas potenciales para su uso en el espacio exterior” (Spacedaily, 2001).

2. Ambiente geológico

El diamante se encuentra en la naturaleza en depósitos minerales primarios relacionados con las kimberlitas (rocas ultrabásicas), propiamente en cuellos o chimeneas brechoides, que según la mineralogía se subdividen en potásicas o kimberlitas Grupo I, y micáceas o kimberlitas Grupo II, y con las lamproítas (rocas volcánicas derivadas del manto ultrapotásico), y en depósitos minerales secundarios denominados placeres, que contienen minerales pesados, entre ellos diamantes. También se produce a escala industrial como diamante sintético (en este caso, deja de ser un mineral como tal) en los países que poseen la tecnología adecuada para estos menesteres (Japón y Estados Unidos, entre otros).

En el procesamiento de las rocas para la extracción del diamante sus operaciones difieren de los empleados para la mayoría de los minerales, puesto que el propósito es obtener gemas, en primera instancia, motivo por el cual las rocas no pueden molerse severamente y en varios ciclos, como se hace en la extracción de otros minerales, sino en forma moderada y con fines de facilitar la separación del diamante en bruto de la roca madre.

2.1. Características

El diamante es la tercera forma alotrópica del carbón; las otras dos son el grafito (segunda forma) y el carbón amorfo (la primera), que está compuesto por una cadena de átomos de carbono densamente concentrada que le imparte su característica fundamental de ser el mineral más duro en la naturaleza. Tiene propiedades cristalográficas especiales, como el clivaje perfecto (111) y la dureza 10 en la escala de Mohs, la más alta entre todas las sustancias naturales conocidas por el hombre. Las variedades que lo superan en cuanto a dureza son las nanovarillas de agregados de diamantes (ADNR), que se obtienen de manera sintética, y el ⁶⁰C (fullerita), que a la fecha no se ha presentado ante la International Mineralogical Association (IMA, por su sigla en inglés) para la validación del nombre y ser considerada otro espécimen mineral (Barthelmy, 2007).

A esta propiedad física de su dureza (10 en la escala de Mohs) se le agregan las de su menor compresibilidad (mayor que 110 GPa); su elevado índice de refracción (2.41); la altísima conductividad térmica (20.0 W/cm-K) y la extremadamente baja expansión térmica (0.0000011 /K); su alto punto de fusión (4090 °C, el más alto de todas las sustancias); su transparencia y color (desde el ultravioleta profundo hasta el infrarrojo lejano, pasando por el visible del espectro); el ser inerte químicamente a la mayoría de los ácidos y bases (excepto al nitrato potásico y la sosa fundida), además de ser uno de los pocos materiales de la naturaleza con una afinidad electrónica negativa (May, 2007).

Las propiedades de los diamantes naturales se obtienen también en los minerales sintéticos, que difieren del natural en el tamaño, el cual es menor en el industrial y en el número de quilates (Q), que suele ser inferior a 1.5 Q. Por el contrario, el industrial supera al natural en cuanto a que en el laboratorio y en planta de producción se puede “elaborar” el diamante “a la medida” de los requerimientos del usuario o cliente, en cantidades ilimitadas y en condiciones controladas, incluso superando al natural en la dureza, como se indicó antes, y en el grado de pureza (USGS, 2017).

El diamante cristaliza en el sistema cúbico y se presenta en diversas formas (figura 2), y posee otras propiedades mineralógicas, físicas, químicas, ópticas y electrónicas que se ilustran en la tabla 1.

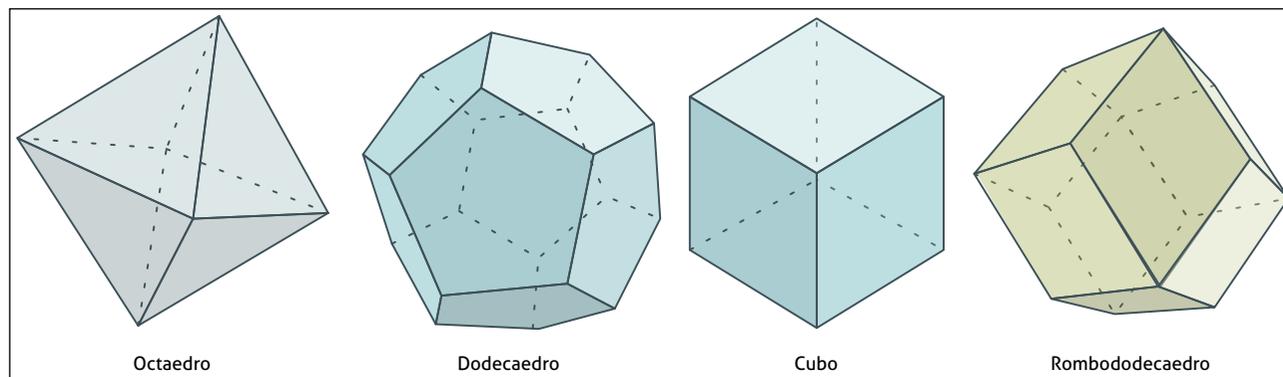


Figura 2. Formas cristalinas más conocidas del diamante

Fuente: modificado de TTe (2014)

Tabla 1. Propiedades mineralógicas, físicas, químicas, ópticas y electrónicas del diamante natural

Propiedad	Valor/atributo	Unidad de medida
Birrefringencia	Ninguna	Magnitud adimensional
Birrefringencia	Birrefringente	Diamante deformado
Brillo	Adamantino a graso	Magnitud adimensional
Clivaje	Perfecto (111)	En planos paralelos a las caras de un octaedro
Coefficiente de expansión termal	0.0000011	/K
Color común	Incoloro, amarillo claro a oscuro, marrón, blanco, azul	Magnitud adimensional
Color menos común	Verde, rosado, rojo, gris a negro	Magnitud adimensional
Conductividad térmica	20	W/cm-K
Constante dieléctrica	5.7	Magnitud adimensional
Dato óptico	Isotrópico	Magnitud adimensional
Densidad	3.52	g/cm ³
Densidad, rango	3.50-3.53	g/cm ³
Diafanidad	Transparente a translúcido, a opaco	Magnitud adimensional
Dureza, mineralogía	10	Escala de Mohs
Dureza, física	10	kg/mm ²
Electricidad	Efecto triboeléctrico	Magnitud adimensional
Fractura	Concoidal	Magnitud adimensional
Función de trabajo	Pequeña y negativa	En superficies (111)
Hábito	Cristales euhedrales o granular (anhedral a subhedral en matriz)	Magnitud adimensional
Índice de refracción óptica (a 591 nm)	2.41	Magnitud adimensional
Luminiscencia	Fluorescencia y fosforescencia	Magnitud adimensional
Macla	De contacto	(111) es plano de macla
Módulo de Young	1.22	GPa
Movilidad electrónica	2.2	cm ² /V-s
Movilidad de agujero	1.6	cm ² /V-s
Parada de energía	5.45	eV
Parámetro de choque termal	30 000 000	W/m
Radiactividad	Ninguna	Magnitud adimensional
Raya	Incolora	Magnitud adimensional

(.../...)

(.../...)

Propiedad	Valor/atributo	Unidad de medida
Relación de Poisson	0.2	Magnitud adimensional
Resistencia a la tensión	>1.2	GPa
Resistencia a la compresión	>110	GPa
Resistencia dieléctrica	10 000 000	V/cm
Resistividad	1013-1016	Ohm-cm
Temperatura de Debye	2.2	K
Tenacidad	Quebradizo	Magnitud adimensional
Transmisividad óptica (desde nm hasta infrarrojo lejano)	225	Magnitud adimensional
Velocidad del sonido	18	m/s
Velocidad saturada del electrón	27 000 000	cm/s
Velocidad saturada de agujero	10 000 000	cm/s

Fuente: Spear y Dismukes (1994), May (2007), Barthelmy (2007)

Mineralógicamente, el diamante se clasifica con el número de especie 1.3.6.1, según el sistema numérico de clasificación de Dana (Gaines *et al.*, 1997). Los otros miembros del grupo son: grafito (1.3.6.2), lonsdaleíta (1.3.6.3), caoíta (1.3.6.3) y fullerita (1.3.6.4). La lonsdaleíta es el diamante de forma hexagonal de alta presión, resultado del impacto de un meteorito contra la Tierra. De acuerdo con el tipo y nivel de impureza presente en el diamante, May (2007) clasifica los diamantes así:

- *Diamante tipo Ia.* Contiene hasta 0.3 % de nitrógeno; corresponde a la mayoría de los diamantes naturales.
- *Diamante tipo Ib.* Contiene nitrógeno en cantidades traza hasta de 500 ppm; muy raro en la naturaleza (aproximadamente 0.1 %). Casi todos los diamantes artificiales pertenecen a este tipo.
- *Diamante tipo IIa.* Exento de impurezas de nitrógeno al nivel de detección instrumental, exhibe propiedades ópticas y térmicas más altas que los comunes.
- *Diamante tipo IIb.* Extremadamente raro en la naturaleza, el cristal es un semiconductor tipo-p³ y, por general, es de color azul. Contiene boro como impureza.

Además de los anteriores, se encuentran los diamantes verdes, que adquieren este color por el bombardeo de rayos nucleares durante su crecimiento y pueden o no tener átomos de nitrógeno como impurezas. Son extremadamente raros.

Las variedades industriales del diamante son:

- *Ballas.* Masa compactada de diamantes pequeños que forma un agregado esférico.

- *Bort.* Diamante cristalizado imperfectamente de color oscuro, translúcido a opaco. En el comercio también recibe este nombre el fragmento de una gema.
- *Carbonado.* Diamante negro, opaco, sin clivaje, con gravedad específica entre 3.1 y 3.3.

2.2. Tipo de depósito

Los depósitos minerales que contienen diamantes son de origen primario y están relacionados con las rocas kimberlitas y lamproítas que los transportaron desde las profundidades del manto de la Tierra, donde se formaron, hasta la superficie (geotransporte), o de origen secundario, mediante procesos de concentración mecánica llevados a cabo en la parte externa de la corteza terrestre.

Este geotransporte está asociado con un fracturamiento profundo de la corteza, utilizado por el magma como conducto para mover los diamantes en forma sólida desde las profundidades del manto (a unos 150 km de la superficie en condiciones de bajo gradiente geotérmico), donde estos se formaban establemente (Nixon, 1995; Bulanova, 1995), hasta profundidades cercanas a la superficie (emplazamiento), donde se solidificó y se formaron las rocas denominadas kimberlitas y lamproítas.

Según los modelos geocronológicos de Richardson, Gurney, Erlank, Harris (1984) y Richardson, Erlank, Harris, Hart (1990), la edad de formación de los diamantes con inclusiones peridotíticas (diamantes peridotíticos) se encuentra en el rango comprendido entre los 3000 y 3300 millones de años (Ma), mientras que la de los diamantes con inclusiones eclogíticas (diamantes eclogíticos) entre los 990 y 1670 Ma. La geotermobarometría de los silica-

tos asociados indica que la formación de la mayoría de los diamantes tiene lugar a temperaturas comprendidas entre 1000 y 1300 °C, y presiones entre 40 y 60 kbar, que corresponden a profundidades aproximadas entre los 150 y 200 km (Boyd, Gurney y Richardson, 1985). Para algunas clases de diamantes que se caracterizan por tener inclusiones de granate con piroxeno en solución sólida, se han inferido condiciones de alta presión extrema y grandes profundidades de formación, que según Moore, Gurney, Griffin, Shimizu (1991) pueden presentarse a los 450 km.

De acuerdo con lo anterior, que reúne lo presentado por Bulanova (1995); Helmstaedt y Gurney (1995); Nixon (1995); Boyd, Gurney y Richardson (1985), y Pell (1998), el modelo genético de las ocurrencias diamantíferas primarias comprende tres partes: formación y composición del material a profundidades del manto, “geotransporte” y emplazamiento cerca de la superficie de la Tierra, las cuales se pueden resumir en los siguientes parámetros y procesos:

- *Temperaturas de formación (°C):* 1000-1300.
- *Rango de presión de formación (kbar):* 40-60.
- *Profundidades de formación (km):* 150-200. Excepcionalmente: 450.
- *Composición del material fuente de los diamantes.* Los diamantes macroscópicos se derivan de peridotitas harzburgíticas y eclogitas dentro de las regiones del manto sublitosférico, donde se presentan las temperaturas y presiones apropiadas, en tanto que la fugacidad del oxígeno permite su formación.
- *Proceso de geotransporte.* Al pasar el magma kimberlítico a través de las porciones diamantíferas del manto, toma dentro de sí a los diamantes y los transporta hasta la superficie si no son absorbidos (disueltos y asimilados) durante su ascenso.
- *Proceso de emplazamiento.* La rápida fase de pérdida de gases de CO₂ del magma cerca de la superficie produce brechas intrusivas fluidizadas (diatremas) y erupciones volcánicas explosivas (maars).
- *Edades de formación.* Diamantes eclogíticos: 990-1670 Ma; diamantes peridotíticos: 3.0-3.3 Ga (miles de millones de años).

En este modelo genético del diamante, las rocas volcánicas diamantíferas corresponden a kimberlitas y lamproíitas dispuestas en una estructura volcánica tipo maar-diatrema, donde el conducto magmático con relleno (*pipe*) tiene una forma especial que recuerda una “zanahoria”, diatrema, y la parte superior expuesta en la superficie a una “copa de champaña”, que se denomina maar (figura 3).

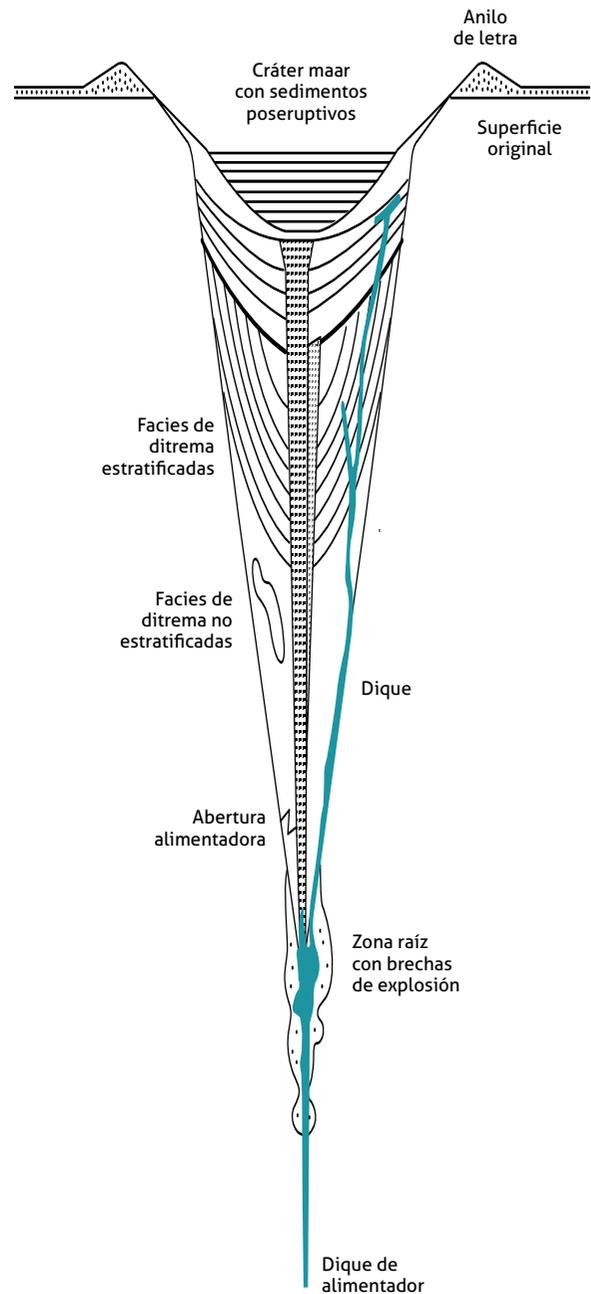


Figura 3. Modelo de un volcán tipo maar-diatrema donde se emplaza el diamante presente en las kimberlitas y lamproíitas
Fuente: modificado de Lorenz (2003)

Los maars son cráteres que tienen un diámetro hasta de 3 km de ancho y una profundidad hasta de 300 m que se forman por actividad volcánica subaérea, a partir de un amplio rango de magmas, y por erosión, que deja expuesta la diatrema rellena con altos volúmenes de material clásico que indican la producción de grandes cantidades de una fase gaseosa cuyo origen es objeto de controversia.

Las hipótesis enunciadas al respecto son las de interacción entre agua de origen meteórico y agua ascendente asociada al magma (explosión freatomagmática), propuesta por Lorenz (1973), “On the formation of maars”, y Lorenz (2003), “Maar-diatreme volcanoes, their formation, and their setting in hard-rock or soft-rock environments”; agua juvenil despedida del magma asociada con volátiles, particularmente CO₂ (Clement, 1982, *A comparative geological study of some major pipes in the Northern Cape and Orange Free State*; Clement y Reid, 1989), y ambos orígenes de agua (Jaques, Lewis y Smith, 1986).

Los tipos de depósito mineral del diamante que tienen un origen primario son dos: diamantes hospedados en kimberlitas (propriadamente en chimeneas brechoides o gargantas) y diamantes hospedados en lamproítas. La proporción volumétrica en km³ de estos últimos con respecto a los primeros es de 1 a 50, lo cual indica que el volumen de lamproítas con diamante es relativamente bajo en comparación con las kimberlitas diamantíferas (Nixon, 1995). Por otra parte, el catálogo elaborado por Janse y Sheahan (1995) de las ocurrencias de kimberlitas y del diamante a nivel mundial, indica que existen en cualquier continente y el número generalmente aceptado de ocurrencias primarias es de 5000, de las cuales 500 kimberlitas son diamantíferas, 50 se han explotado y apenas 15 son minas activas grandes.

Cox y Singer (1992) clasifican los depósitos minerales primarios con diamantes en el grupo de los depósitos relacionados con intrusiones alcalinas, específicamente en el Modelo Descriptivo de Diamantes en Conductos Magmáticos con Relleno (*Descriptive Model of Diamond Pipes*). Para este informe se seleccionó la clasificación que elaboró el British Columbia Geological Survey, en el que se describen separadamente y con la misma profundidad los dos tipos de ocurrencias primarias de diamantes que existen en la naturaleza y se explotan con fines comerciales.

2.2.1. Diamantes hospedados en kimberlitas

Las kimberlitas son rocas ultrabásicas potásicas ricas en volátiles con macrocristales (en ocasiones megacristales y xenolitos), dispuestas en una matriz de grano fino donde los diamantes ocurren como xenocristales dispersos y dentro de xenolitos diamantíferos (Pell, 1998).

Características geológicas:

- *Tipos de rocas asociadas/hospedantes Kimberlitas.* Según Mitchell (1986), estas rocas son un clan de rocas ultrabásicas potásicas ricas en volátiles (predominantemente dióxido de carbón).
- *Estructura/texturas.* Las kimberlitas son intrusiones hipoabisales pequeñas que gradan hacia arriba a brechas diatrema cerca de la superficie y rocas piroclásticas en la facies de cráter en superficie tipo maars. De ahí el nombre de la estructura maar-diatrema de los volcanes donde aparecen las kimberlitas. La textura característica es inequigranular, resultado de la presencia de macrocristales (algunas veces megacristales y xenolitos) alojados en una matriz de grano fino.
- *Rango de edad.* Entre 3.0-3.3 Ga (Bulanova, 1995) y Cuaternario (Nixon, 1995), con registro eruptivo desde el Paleoproterozoico.
- *Ambiente de formación.* Las kimberlitas ascienden rápidamente desde el manto y se emplazan como diatremas multietadios a alto nivel, en forma de cono de tobas y anillos, acompañados de diques y silos.
- *Forma del depósito.* Se presenta comúnmente con paredes laterales subverticales, de forma cónica (diatrema) e invertida “hacia abajo”, la cual puede tener zonas radicales complejas con múltiples diques y *blows*. Los contactos de la diatrema son abruptos. En superficie, las áreas varían entre 2 y 146 ha (Mwadui, Tanzania). En algunas diatremas se pueden preservar el cráter asociado y el anillo de tobas. Los conos de tobas y cráteres en la kimberlita pueden formarse sin asociarse con diatremas (por ejemplo: Saskatchewan), en tanto que las unidades estratificadas pueden tener buzamientos moderados. Las kimberlitas hipoabisales forman por lo general silos y diques.
- *Marco tectónico.* Predominantemente regiones infrayacidas por cratones arqueanos estables.
- *Mineralogía.* El mineral de mena es el diamante. Los minerales de ganga principales son olivino, flogopita, piropro y granate eclogítico, diópsido cromo, ilmenita magnesiana, enstatita, cromita, carbonatos y serpentina. Los subordinados son monticellita, perovskita, espinela y apatito.
- *Textura/estructura del depósito.* Los diamantes ocurren como granos discretos de origen diferente del de la kimberlita y tienden a ubicarse aleatoriamente dentro de las diatremas. Algunas facies de cráteres de las kimberlitas se encuentran enriquecidas en diamantes en relación con su diatrema debido al expulsado de los finos.
- *Alteración.* Serpentinización en numerosos depósitos, silicificación y blanqueado a lo largo de los contactos, calcita con cuarzo y zeolitas pueden ocurrir en las fracturas.
- *Meteorización.* En climas tropicales, la kimberlita se meteoriza rápida y profundamente a un “material amarillo” que se compone sobre todo de minerales de arcilla.

lla. En climas templados es menos severa, pero siguen predominando las arcillas. Las facies en la diatrema y el cráter tienden a formar depresiones topográficas, mientras que los diques, por ser más resistentes, forman elevaciones.

Ejemplos de depósitos minerales en el mundo:

- Botsuana: Orapa pipes, Jwaneng.
- Canadá: Koala, Panda, Sable, Fox y Misery (Northwest Territories).
- Rusia: Mir, International, Udachnaya, Aikhal y Yubileynaya.
- República de Sudáfrica: Kimberley pipes, Premier pipes, Venetia.

2.2.2. Diamantes hospedados en lamproítas

Las lamproítas (Pell, 1998) son rocas máficas ultrapotásicas, caracterizadas por la presencia de olivino, leucita, richterita, diópsido o sanidina. Los diamantes ocurren como xenocristales dispersos y en xenolitos del manto dentro de los diques y piroclastitas formados por este tipo de rocas. Numerosos depósitos se encuentran dentro de las aberturas en forma de chimeneas o cráteres del volcán.

Características geológicas:

- *Tipos de rocas asociadas/hospedantes.* Las lamproítas con olivino que poseen diamantes son las rocas piroclásticas y los diques, mientras que las lavas son estériles. Las lamproítas son peralcalinas y típicamente ultrapotásicas (entre 6 y 8 % de K_2O).
- *Estructura/texturas.* Los diamantes ocurren como granos discretos de origen distinto del de la lamproíta; están distribuidos de manera dispersa y aleatoria en la matriz y en los xenolitos del manto.
- *Rango de edad.* Cualquiera, excepto el arqueano. Las lamproítas diamantíferas varían desde el Proterozoico hasta el Mioceno.
- *Ambiente de formación.* Las lamproítas con olivino se derivan del manto litosférico metasomatizado y generalmente se emplazan en cráteres tipo maar-diatrema, a alto nivel.
- *Marco tectónico.* Estas rocas son postectónicas y ocurren cerca de los márgenes de los cratones arqueanos, en los cinturones móviles del Proterozoico acrecionados y adyacentes al cratón.
- *Mineralogía.* Mineral de mena es el diamante. Los minerales de ganga principales son olivino, flogopita, richterita, diópsido, sanidina, y los subordinados son

priderita, wadeíta, ilmenita, cromita, perovskita, espinela, apatito y granate variedad piropo. Vidrio volcánico y xenocristales de olivino derivados del manto, granate variedad piropo y cromita pueden también presentarse en estas rocas.

- *Textura/estructura del depósito.* Textura piroclástica caracterizada por la presencia de fenocristales o matriz constituida por olivino forsterítico, flogopita rica en Ti y pobre en Al y tetraferroflogopita.
- *Alteración.* Se reconoce alteración a barita, analcima, cuarzo, zeolita, carbonatos y serpentina + magnetita.
- *Meteorización.* Minerales de arcilla, predominantemente la esmectita, son los productos de este proceso geológico.

Ejemplos de depósitos minerales en el mundo:

- Australia: Argyle y Ellendale (Western Australia).
- Brasil: Coromandel. Las kimberlitas en esta región son estériles (Tompkins y Gonzaga, 1989) y también las lamproítas (Janse y Sheahan, 1995).
- Costa de Marfil: Bobi.
- Estados Unidos: Prairie Creek (Arkansas).
- India: Majhgawan.
- Zambia: Kapamba.

2.2.3. Placeres de diamante

El segundo origen de los depósitos de diamante corresponde a la concentración por procesos superficiales que Cox y Singer (1992) reseñan con el nombre de *Descriptive Model of Diamond Placers*, que se tradujo como Modelo Descriptivo Placeres de Diamante. Para depósitos aluviales con diamante el número de depósitos a nivel mundial es difícil de estimar, ya que en la bibliografía existente “una ocurrencia de diamante aluvial” puede referirse tanto a una simple gema como a un placer de diamante grande o a cualquier depósito entre estos extremos; sin embargo, se estima en 4000 (Janse y Sheahan, 1995). Para este informe se seleccionó el modelo descriptivo de Cox y Singer (1992), por ser específico y exclusivamente para los diamantes. Otras clasificaciones, como la del British Columbia Geological Survey, incluyen a los diamantes en el conjunto de los minerales pesados que tienen los placeres, como casiterita, cromita, wolframita, minerales del grupo del platino (MGP), oro, pirocloro y rutilo.

Características geológicas:

- *Tipo de depósito sedimentario.* Arenas de río, gravas y gravillas, y conglomerados indicativos de los tipos de

roca que alojan los minerales de mena del depósito primario.

- *Texturas*. Clástica de grano grueso.
- *Rango de edad*. Paleógeno/Neógeno a Cuaternario.
- *Ambiente de depositación*. Corrientes superficiales que drenan áreas conformadas por conductos magmáticos con relleno (*pipes*) de kimberlitas o concentraciones de diamantes en rocas metamórficas o sedimentarias. Los depósitos de diamantes tipo placeres aluviales pueden encontrarse a distancias hasta de 1000 km de la fuente mineralizada.
- *Marco tectónico*. Cratones estables. Estabilidad tectónica durante la depositación y preservación de los depósitos aluviales.
- *Mineralogía*. Diamante, diamante tipo *bort* o carbonado, diamante tipo *ballas*.
- *Textura/estructura del depósito*. Diamantes derivados de antiguos placeres ubicados en rocas sedimentarias retienen los granos de arena cementados a estriaciones o muestran indentaciones en el cristal.

Ejemplos de depósitos minerales en el mundo (Janse y Sheahan, 1995):

- Australia: placeres derivados de Argyle, de Aries, de Seppelt.
- Brasil: Río Branco, Gilbues, Tocnatis, Jequitinhonha, Diamantino, Coromandel, Juina.
- India: Kollur, Mahanadi.
- República de Sudáfrica: Vaal/Orange, Alexander Bay, Kleinzee, Buffels.
- Venezuela: Caroni, Guaniamo.

Los placeres de minerales (aluviales, marinos, eluviales, coluviales) se forman en áreas donde se reúnen favorablemente minerales resistentes al proceso erosivo, rocas fuentes, así como el agente y el transporte por agua o gravedad de los sedimentos. En los placeres aluviales el agente es el río; en los marinos, el agente erosivo son las olas del mar; en los eluviales, el agente actúa sobre el horizonte A del perfil superficial del suelo al que las aguas descendentes le han removido sus constituyentes menos durables y otras sustancias orgánicas; en los coluviales, son fragmentos de rocas y materiales debidos a procesos de remoción en masa.

Los placeres de minerales se dividen en superficiales y paleoplaceres. Los superficiales hoy se encuentran “a flor de tierra”, mientras que los paleoplaceres son placeres antiguos (de edad Jurásica a Cámbrica), con minerales cubier-

tos en la actualidad por depósitos sedimentarios, suelos o materiales diversos con vegetación o sin ella. Si el depósito ha tenido retrabajamiento durante largos periodos de tiempo se denomina alóctono, con tamaño de grano de los materiales típicamente fino; en caso contrario, autóctono y grano grueso. De acuerdo con la localización espacial de los placeres de minerales con respecto a la acumulación y el sistema fluvial, estos se dividen en tres grupos: retenido (*retained*), transitorio (*transient*) y terminal (*terminal*) (Bluck, Ward y De Witt, 2005). En el primero, los depósitos permanecen en el cratón y están separados del sistema fluvial o dispersante; en el segundo, los depósitos son alóctonos y se encuentran en los canales o cerca de estos y, en el último, los depósitos se acumulan al final del recorrido de las corrientes del drenaje actual.

Las fuentes primarias de los minerales de diamante en los placeres de minerales son las kimberlitas o lamproítas. Estos minerales pesados resistentes (minerales resistatos) a la meteorización se acumulan inicialmente en la fuente y llegan a ser enriquecidos por la acción química, en especial por la remoción física de otros minerales menos durables y de peso específico más bajo por efecto del proceso erosivo.

Otra “ocurrencia” de diamante es la variedad de diamante artificial o sintético (según la definición de mineral no se considera como tal), producido industrialmente por los países que poseen la tecnología correspondiente. Se obtiene por los métodos de alta presión-alta temperatura (HPHT, de inglés High Pressure High Temperature) por su sigla en inglés) y de depositación de vapor químico (CVD, sigla en inglés, Chemical Vapor Deposition).

2.3. Métodos de prospección

La prospección y la exploración son etapas diferentes de la investigación geológica y minera. La primera etapa es la búsqueda sistemática de mineralizaciones o depósitos minerales, por medio de métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos a escalas de muestreo 1:25 000 a 1:100 000, y la segunda es el estudio de una mineralización o depósito mineral con trabajos de campo a escala 1:10 000 o mayor, como 1:1000, acompañando estos métodos con las técnicas de perforación y del análisis de muestras en laboratorio tomadas con base en una malla de muestreo relativamente amplia. En el informe del UN. ECE-Task Force on the United Nations International framework Classification for Reserves/Resources. Solid Fuels and Mineral Commodities (2001) se describen estas etapas junto con las de reconocimiento, antes de la prospección y exploración detallada, posterior a la exploración y a nivel de estudio de prefactibi-

lidad, con lo cual se genera un marco estándar (*framework*) para todos los países en la clasificación de reservas/recursos de un depósito mineral.

En lo referente a la prospección en la búsqueda de diamante se aplica la regla de Clifford (Clifford, 1966; Janse y Sheahan, 1995), que señala básicamente que las kimberlitas con diamantes ocurren solo en archones (*Archons*), es decir, regiones cratónicas infrayacidas por basamento arqueano con edades mayores de 2.5 Ga, mientras que las lamproítas económicas ocurren en algunos protones (*Protons*), o cinturones móviles del Proterozoico, con edades

entre 1.6 y 2.5 Ga adyacentes a los archones. Los tectones están formados por cratones con edades entre 0.7 y 1.6 Ga. Los archones se distribuyen en regiones activas a potencialmente productivas de diamantes, presentes en siete continentes; una de esas regiones corresponde al Escudo de Guayana, protón desde el punto de vista del diamante, que aflora en el extremo oriente de Colombia y alberga los yacimientos de Guaniamo y Caroni en Venezuela, cerca del río Orinoco, región Patrocinio, y de Mazarumi, en Guayana. Los archones, protones y tectones se ilustran en la figura 4.

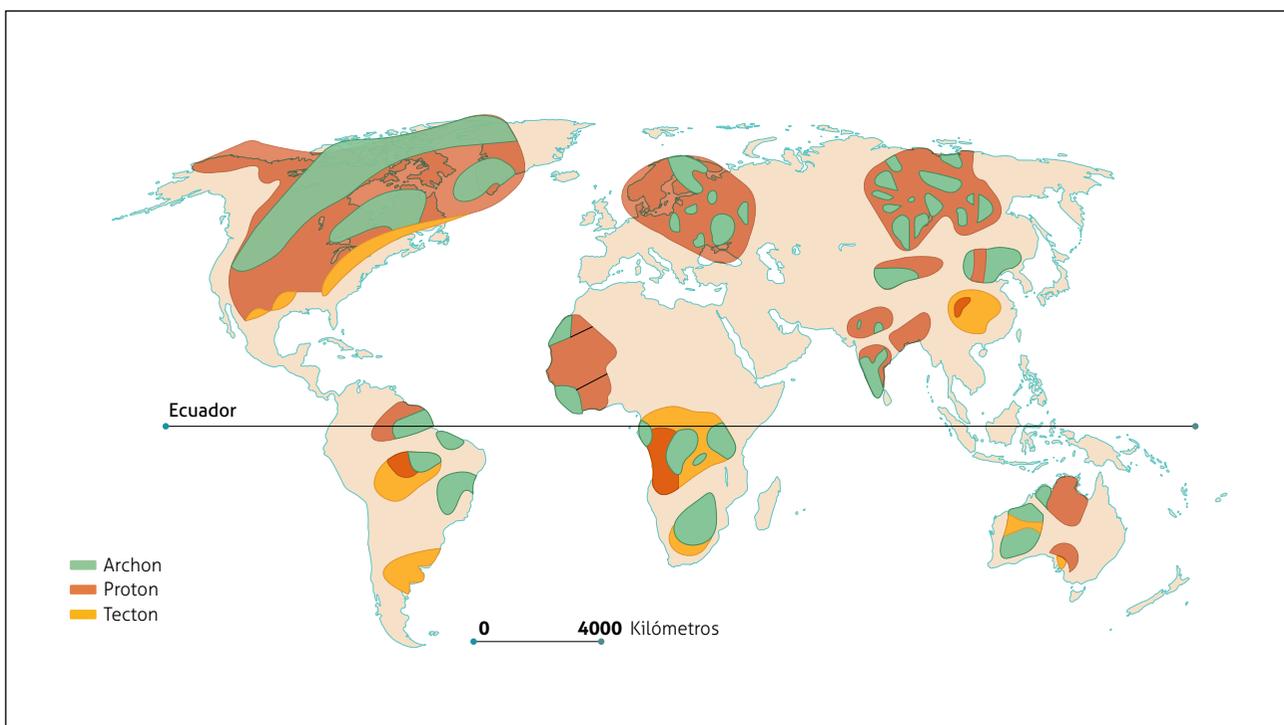


Figura 4. Mapamundi con la ubicación de los archones, protones y tectones, junto con los depósitos minerales de mayor importancia a nivel mundial

Fuente: Energy and minerals. Diamond Deposits (s. f.)

La fuente de los diamantes en Guaniamo son diques y silos de rocas tipo kimberlita de edad 1.73 ± 0.08 Ga, que indican un emplazamiento después de la orogenia Trans-Amazónica (Meyer y McCallum, 1993). Posteriormente, Kaminsky *et al.* (2000) revelan que Channer, Cooper y Kaminsky (1998) obtuvieron edades en silos de kimberlita de 730 Ma en el área de Guaniamo y dan a conocer evidencias de que la mayoría de las inclusiones en los diamantes son de paragénesis eclogítica, derivados probablemente de rocas máficas peraluminosas, formadas cerca de la base de la litosfera (temperaturas entre 1200-1300 °C).

Modelos. Las hipótesis geológicas (o modelos) para el hallazgo de nuevos depósitos minerales donde existen los diamantes en cantidades que permiten su explotación económica, o acompañando a minerales de importancia industrial, se indicaron en la sección “Tipos de depósito”.

En su aplicación, un mapa geológico regional a escala apropiada es fundamental para la delimitación de los cratones así como de los posibles archones y protones presentes en ellos; el establecimiento de los modelos de mineralizaciones que hay que prospectar (kimberlitas o lamproítas o placeres), y la definición de las fases de exploración geo-

química y geofísica. Los estudios de los registros mineros, en particular una pormenorizada y sólida caracterización geotectónica (Helmstaedt y Gurney, 1995), son fundamentales y deben ser previos al desarrollo en campo de los levantamientos geoquímicos y geofísicos.

En una revisión de los controles estructurales en el emplazamiento de las kimberlitas, lamproítas e intrusivos relacionados efectuada por (White, De Boorder y Smith, 1995), se señalan las siguientes características en las conclusiones de su artículo:

- Las kimberlitas, lamproítas y rocas intrusivas alcalinas están asociadas preferencialmente con estructuras de basamento profundo que se extienden hasta el manto. Estas estructuras pueden formar corredores del tipo falla/fractura, zonas móviles o pertenecer a *grabens* lineales (aulacógenos).
- Las kimberlitas diamantíferas ocurren donde existe una relación entre lo que suprayace y la corteza antigua (arqueano), que subyace dentro de un área de litosfera anormalmente gruesa. Por su parte, las lamproítas diamantíferas ocurren donde el basamento antiguo ha sido retrabajado durante el Proterozoico temprano.
- Los conductos magmáticos rellenos (*pipes*) están asociados con estructuras corticales desarrolladas dentro de los corredores mayores o zonas móviles, dispuestos en forma ortogonal u oblicua a la orientación principal de los *grabens* lineales o a las intersecciones fractura y falla, que no están influenciadas directamente por estos corredores.
- Los intrusivos están acompañados por actividad tectónica extensional o transcurrente, posterior por lo regular al periodo de mayor *rifting* oceánico o continental.

En las fases de prospección y exploración de los depósitos minerales con diamantes no existe sustituto del levantamiento geológico cartográfico a la escala apropiada (ya sea con fines de selección, reducción o delimitación del área mineralizada) con la ayuda de fotografías aéreas y de un excelente mapa imagen. Dado que el diamante es un xenocrystal dentro de las kimberlitas y lamproítas estas rocas son el objetivo fundamental de la cartografía en las etapas de prospección y exploración, con el objetivo de encontrar la fuente del diamante.

Una roca tipo kimberlita se define desde la geoquímica como una roca ígnea con un bajo contenido de Al_2O_3 , con ausencia de Na_2O , cantidades moderadas de K_2O y altas concentraciones de CO_2 , y desde la petrografía como una roca porfirítica ultrabásica que, por su composición mine-

ralógica, se subdivide en potásicas o kimberlitas grupo I y micáceas o kimberlitas grupo II. Los megacristales del grupo I constan de olivino; ilmenita con Mg, flogopita, piropero con Ti y pobre en Cr; cromita pobre en Ti, en una matriz con olivino, perovskita, \pm flogopita, apatito, monticellita, espinela con (Mg, Cr, Ti, cromita y magnetita), serpentina con Fe y calcita, mientras que los del grupo II consisten en flogopita y olivino en una matriz de flogopita, diópsido, espinela con (cromita, magnetita), perovskita, fosfatos con elementos de tierras raras, titanatos de K-Ba, ilmenita con Ti y calcita (Mitchell, 1986; Robb, 2005; Evans, 1987). Los principales tipos de alteración son serpentización, calcificación y cloritización.

Las kimberlitas suelen ocurrir en campos hasta de cien intrusiones individuales, formando agrupamientos donde la distancia entre ellos es mínima (a veces se explotan con un solo tajo abierto [*open pit*] varios de estos intrusivos), para lo cual se citan como ejemplo las ocurrencias en la nación de Lesotho (Evans, 1987). Las kimberlitas que componen cada campo pueden exhibir diferencias notables entre sí en lo petrológico, lo mineralógico, así como en el contenido de xenolitos y de diamantes, lo que da lugar, en la etapa de exploración, al hallazgo de numerosas kimberlitas comunes o estériles.

El origen de estas diferencias es causa de controversia científica, pues no se ha explicado aún. Para determinar la diferencia entre kimberlitas estériles y diamantíferas durante las etapas de prospección y de exploración se han refinado las técnicas de elementos traza en minerales indicativos, química de minerales, técnicas geoquímicas y geofísicas.

Entre los minerales indicativos están los granates de piropero-cromo y las cromitas con alto contenido en Cr (Griffin y Ryan, 1995), que se emplean para determinar el gradiente geotérmico, la presión y la profundidad de la placa litosférica (150 a 250 km). Estos resultados se optimizan con el empleo de los elementos traza, tales como el Ni para determinar las temperaturas (geotermómetro), el Cr para las presiones (geobarómetro) y la presencia de los granates empobrecidos (*depleted*), que se caracterizan por tener bajos contenidos de Zr, Ti y especialmente Y.

La impronta geoquímica de estos depósitos señala que las kimberlitas comúnmente tienen valores altos de Ti, Cr, Ni, Mg, Ba y Nb (Pell, 1998) tanto en las muestras de roca como en los suelos residuales que las suprayacen (detectables en muestras tomadas en los concentrados de batea). Dado que no se diferencia de la proveniente de otras rocas alcalinas, se recurre a la química de minerales (ensayo vía húmeda, espectrometría de masa-plasma acoplado induc-

tivamente, rayos X, entre otros métodos), con el fin de dilucidar si la kimberlita donde yacen estos minerales es diamantífera o estéril.

La presencia de piropo y granate eclogítico, diópsido con Cr, picroilmenita, cromita y, en menor grado, olivino, en materiales superficiales (suelos, sedimentos activos, limos, entre otros) es un indicador de la existencia de kimberlitas diamantíferas (Pell, 1998). Asimismo, los granates tipo piropo bajos en Na (granates G10), granates eclogíticos enriquecidos en Na, ilmenitas magnesianas y las cromitas donde los contenidos en Cr son altos y los de Mg moderados a altos, son indicativos de kimberlitas diamantíferas. A su vez, estas rocas producen variaciones locales en los tipos de suelos, los cuales se tornan amarillos, que pueden reflejarse en los tipos de vegetación y detectarse con el procesamiento digital de imágenes de satélite.

En resumen, los discriminantes geoquímicos clave para establecer el potencial diamantífero en las rocas son tres: potencial peridotítico (con dos criterios) y granates eclogíticos (Gurney y Zweistra, 1995). En el primer caso, la existencia de una población de granate peridotítico, rico en cromo y bajo en calcio, es el criterio más importante, seguido de la presencia de las subpoblaciones de cromita, de las cuales la principal es el campo de la cromita con alto Cr_2O_3 , de medio a alto MgO y menos del 0.6 % de TiO_2 . El tercero consiste en considerar de manera preferencial el contenido de Na de los granates eclogíticos, que posee problemas de interpretación cuantitativa, y tomar en cuenta que algunas eclogitas diamantíferas son extremadamente ricas en diamante, mientras que otras pueden tener un contenido de diamante bastante bajo.

A nivel instrumental geoquímico es de amplio uso el espectrómetro infrarrojo portátil, que opera en el rango de la onda corta del infrarrojo (*short wave infrared range*) del espectro electromagnético para el análisis de especies minerales y vegetales, conocido comercialmente con el nombre de Pima™ field spectrometer (Spectral International Inc., s. f.). Este equipo se ha empleado en el reconocimiento en campo de los minerales de alteración y mineralogía de las kimberlitas, sean diamantíferas o estériles (Spectral International Inc., s. f.).

Las técnicas geofísicas (terrestres y aéreas) se utilizan ampliamente para localizar las kimberlitas; todas ellas, sin embargo, no permiten establecer los contenidos de diamante. Los levantamientos con magnetómetro (terrestre y aerotransportado) son comunes en la exploración, puesto que las kimberlitas pueden manifestarse como altos o bajos magnéticos. En las regiones ecuatoriales las anomalías se

caracterizan por una impronta dipolar magnética, aunque a veces no exhiben contraste con las rocas adyacentes.

Pell (1998) indica que en geofísica se utilizan los métodos eléctricos (resistividad, frecuencia muy baja) y electromagnéticos para detectar los conductos magmáticos con relleno (*pipes*) en levantamientos terrestres y aéreos. Estas técnicas son útiles donde las partes superiores del conducto magmático con relleno están meteorizadas, por lo cual se generan zonas ricas en arcillas y conductivas, con respuestas que reflejan notables contrastes con las rocas adyacentes. Y también las gravimétricas terrestres para identificar y delinear estos conductos cuando las otras técnicas no dan una impronta clara. Por ejemplo, donde las kimberlitas están meteorizadas o se encuentran cubiertas por gruesas secuencias de sedimentos volcánicos o materiales provenientes del cráter, generalmente se obtienen respuestas negativas de gravedad y, donde está fresca la roca, valores de gravedad positiva que se pueden interpretar como una anomalía.

En la prospección de los diamantes en las lamproítas se parte de la base de que estos depósitos son más escasos que los presentes en kimberlitas. Las lamproítas son lamprófitos de origen volcánico o hipoabisales, con textura porfirítica; geoquímicamente son rocas ultrapotásicas, peralcalinas y perpotásicas; con altos contenidos de K_2O , TiO_2 , Ba (>5000 ppm), bajos contenidos de CO_2 y altas concentraciones de P_2O_5 , F (>3000 ppm) y zirconio, y generalmente exhiben una mineralogía en la que los minerales característicos son flogopita, tetraferroflogopita y olivino-richterita, acompañados de diópsido, leucita y sanidina (Robb, 2005; Evans, 1987; Mitchell, 1986).

La presencia de minerales indicativos pesados se usa ampliamente en la búsqueda de las lamproítas diamantíferas. El mineral indicativo es la sanidina, más que la leucita, porque es el más común en estas rocas, y el Cr, como elemento traza, así como piropo, granate eclogítico, cromoespinela, flogopita rica en Ti, richterita K-Ti, forsterita, perovskita (Pell, 1998). La impronta geoquímica en lamproítas señala que se asocian con anomalías de Ni, Co, Ba y Nb en las muestras de suelos. Su dispersión es baja en razón de que estas rocas se meteorizan fácilmente y, por lo regular, ocurren en depresiones. El empleo de la química de minerales ayuda a separarlas de las respuestas causadas por otras rocas. En geofísica se utilizan las mismas técnicas señaladas en la búsqueda de las kimberlitas, y se obtiene un comportamiento ante la señal relativamente similar (Pell, 1998). La esmectita derivada por meteorización produce anomalías por su resistividad negativa.

La prospección de los depósitos de placeres de minerales y residuales se hacía anteriormente con escasa planificación y relativo éxito; en la actualidad se aplican en especial las técnicas geofísicas y geoquímicas, acompañadas de la cartografía geológica. Estas técnicas son efectivas en vista de que las áreas inexploradas con yacimientos grandes a “flor de tierra” prácticamente no existen, debido a varias razones: los métodos cada vez más refinados de la teledetección aplicados a la búsqueda de depósitos minerales los han detectado; la expansión de la frontera agrícola los ha puesto al descubierto, y la ampliación de las redes de comunicaciones ha facilitado su hallazgo. Por tanto, los que restan exigen el empleo de técnicas que permitan su detección donde el acceso a zonas remotas (“puntos muertos”) es difícil o reconocer si forman parte de zonas de reserva ambiental.

De acuerdo con Marshall y Baxter-Brown (1995), los principios básicos en la exploración de los placeres aluviales con diamante son los siguientes: geomorfología regional y la historia geológica del área que se va a explorar; la existencia de controles estructurales (ejes de solevantamiento, movimientos de placas en la vertical y horizontal); el marco tectónico (*archon* o protón y su posición con respecto al cratón: interno, marginal o externo); modificaciones posdeposición (por el viento, recubrimientos o soterramientos, denudación, erosión, fallamiento); paleotopografía y sedimentología; disposición de los materiales en los canales o paleocanales, geomorfología fluvial específica, entre otros.

Otras técnicas de exploración de placeres empleadas son los sensores remotos (imágenes de satélite, imágenes de radar, fotografías aéreas, radar penetrativo del terreno, Slar, Landsat), y las técnicas geofísicas eléctricas y electromagnéticas, puesto que las magnéticas y sísmicas han fallado en la detección de esta clase de depósitos diamantíferos.

En territorios cubiertos por glaciares, como en la región denominada Norte Ruso o al norte de Canadá, donde ocurren diamantes en depósitos glaciares y glaciofluviales, se han detectado tres tipos de halos según la relación que tienen con la fuente primaria: distancia corta, larga y desprendidos (Golubev, 1995).

Los halos a distancia corta se forman en la porción basal de la tilita en la inmediata vecindad del conducto magmático con relleno (*pipe*) y suelen ser de pequeña extensión (menor o igual a 3 km). Halos secundarios de esta clase también ocurren en los sedimentos glaciofluviales en las facies de las corrientes superficiales. Los de larga distancia se encuentran en los sedimentos glaciofluviales de valles, *eskers* y zonas de vertido de materiales (*spillways*), y la mayor concentración de minerales indicativos ocurren

entre los 10 y 15 km de la fuente donde está la kimberlita. En los desprendidos el halo ha perdido toda relación con la fuente primaria, tiene altas concentraciones de minerales pesados, y solo sirve para indicar la presencia o ausencia de la kimberlita.

En los placeres marinos o costeros se usan principalmente las técnicas geofísicas de sísmica somera y sonar de apertura lateral, junto con el análisis de los sedimentos activos recogidos de la plataforma continental, para caracterizar el piso del mar e identificar y delimitar el área donde se presentan los diamantes (Moon, Whateley y Evans, 2006). En los depósitos situados en la parte baja del río Orange, que desemboca en el océano Atlántico (Sudáfrica), la sísmica estuvo acompañada de levantamientos de resistividad eléctrica (Jacob, Bluck y Ward, 1999). Generalmente, estos placeres ocurren entre las zonas de rompientes de olas y los 150 m de profundidad o en las playas aledañas.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

La explotación de las kimberlitas y lamproítas diamantíferas se lleva a cabo, principalmente, por el método de minería subterránea, sistema de hundimiento del bloque (*block caving*), por medio del cual estos grandes fragmentos son arrancados y luego transportados en camiones hasta el área de reducción del tamaño, que se encuentra dentro de las instalaciones subterráneas (Madehow.com, 2017). En el área de trituración, como segunda etapa, se lleva a cabo este proceso de manera limitada con el fin de evitar la destrucción completa de la roca y, por ende, de los diamantes que puedan existir con características de convertirse en gema.

Concluidas estas dos etapas, se procede a la tercera actividad, que consiste en la separación del diamante de los materiales acompañantes por medio de la gravedad, lo cual se realiza en una batea donde se depositan las rocas trituradas en una solución acuosa, junto con otras sustancias que sirven para desunir los materiales ligeros de los minerales pesados, entre los que se encuentra el diamante. Una vez que se precipitan en el fondo de la batea se extraen los diamantes, acompañados de otras impurezas.

Existen otros métodos modernos en los que se emplean medios separadores, como el de mortero poco espeso (*slurry*), preparado con polvo de hierro y sílice, que pasa por uno de los tres medios: tanque cónico con agitación interna, rueda ascensor o hidrociclones, de lo cual se obtiene un concentrado compuesto por diamantes y algunas impurezas.

La cuarta etapa, denominada del engrasado, consiste en recubrir un área plana o mesa con gel de petróleo y poner sobre ella el concentrado para extraer los diamantes que quedan adheridos a la superficie, luego de remover las impurezas con agua. En las instalaciones modernas se utilizan rayos X para identificar, localizar y retirar los diamantes de la mesa. La última fase corresponde a la de cortado y tallado, a donde se llevan las gemas para engastarlas o venderlas como piedras preciosas. Los restantes diamantes, que no superaron la rigurosa prueba de los criterios de gema, se recogen para su venta con fines industriales.

En las explotaciones de los depósitos marinos de Namibia se emplean buques especialmente acondicionados para la extracción del diamante de la plataforma continental en mar abierto hasta profundidades de 200 m, los cuales están equipados de cabezas mineras (excavadoras y succionadoras submarinas), tamices, plantas de separación (basadas en la densidad) y de recuperación de diamantes, por lo cual se les suele denominar “minas flotantes” (Moon, Whateley y Evans, 2006).

2.5. Recursos, reservas y comercio

Los datos sobre recursos y reservas de los diamantes se refieren en particular a la variedad industrial, dado que las gemas son el resultado de otras cualidades que exhiben, de manera particular, los cristales de diamante. Por ese motivo, existen dos grandes mercados del diamante: el relacionado con las gemas y el industrial. En el primero, no se considera al diamante un bien mineral comercial (*commodity*), al estilo de los metales o de las rocas industriales que se transan en un mercado libre y abierto, sino como una gema donde operan reglas del mercado en su modalidad de altamente concentrado, tanto en lo espacial (en pocas ciudades se efectúa la compra y venta de las gemas) como en lo organizacional, donde una sola compañía (De Beers, fundada en 1888 en Johannesburgo, Sudáfrica) controla gran parte de su comercialización (Schoner, 2004).

En septiembre del 2012, en Rusia, científicos de Novosibirsk del Instituto de Geología y Mineralogía de la rama siberiana de la Academia de Ciencias de Rusia, desclasificó información acerca de que en la zona del cráter Popigai existe el yacimiento más grande del mundo de diamantes de impacto. El director del Instituto mencionado, el científico Nikolai Pokhilenko dijo: Con enormes reservas de diamantes bajo el cráter que contiene “Los recursos de super duros diamantes contenidos en las rocas de Popigai cripto-explosión estructura, son, por un factor de diez más grandes que el mundo es que todas las reservas conocidas.

Estamos hablando de miles de millones de quilates, para la comparación.

Actuales reservas conocidas en Yakutia se estiman en mil millones de quilates”. y afirmó que hay suficientes diamantes en el yacimiento para abastecer las necesidades mundiales de 3000 años (Gemología, 2012). Esto podría alterar el mercado de los diamantes industriales, presumiblemente, haciéndolos más abundantes y menos costosos, pero en la actualidad la mayoría de los diamantes industriales son sintéticos. Muchos de los diamantes en Popigai contienen cristales de lonsdaleíta, una forma alotrópica del carbono que tiene una red hexagonal. Estas piedras son 58 % más duras que los diamantes ordinarios puros. (Wikipedia.com, 2017b). Según el académico Pokhilenko, “el valor de los diamantes de impacto se añade por sus características inusuales abrasivos y el tamaño de grano grande. Esto amplía considerablemente el alcance de su uso industrial y lo hace más valioso para la industria / en la metalurgia, en la producción de semiconductores eficientes, etc.” (Gemología, 2012).

El campo se mantuvo en secreto y sin explotar por el hecho de que en ese momento el país estaba construyendo una planta para la producción de diamantes sintéticos, y por la dificultad de acceso, ya que se encuentra a 2000 km al norte del Transiberiano (Wikipedia.com, 2017b).

En el mercado del diamante industrial se reemplazan las calidades de gema por las propiedades de dureza y conductividad del calor, entre otras, motivo por el cual a estos diamantes se les llama clase *bort* o *ballas*. A continuación se ilustran las reservas mundiales de diamantes industriales según el US Geological Survey correspondiente al periodo 1996-2016 (tabla 2), así como las reservas en el 2016 (figura 5).

Tabla 2. Reservas de diamantes industriales por países

País	Reservas (millones de quilates)				
	1996	2001	2006	2011	2016
Australia	500	90	90	110	210
Botsuana	130	130	130	130	130
Congo		150	150	150	150
Rusia	40	40	40	40	100
Brasil	5	5			
China	10	10	10	10	
Zaire	150				
Suráfrica	70	70	70	70	70
Otros	80	80	85	85	90
Total	985	575	575	595	750

Millones de quilates (Q), 1996-2016

Fuente: USGS (2017)

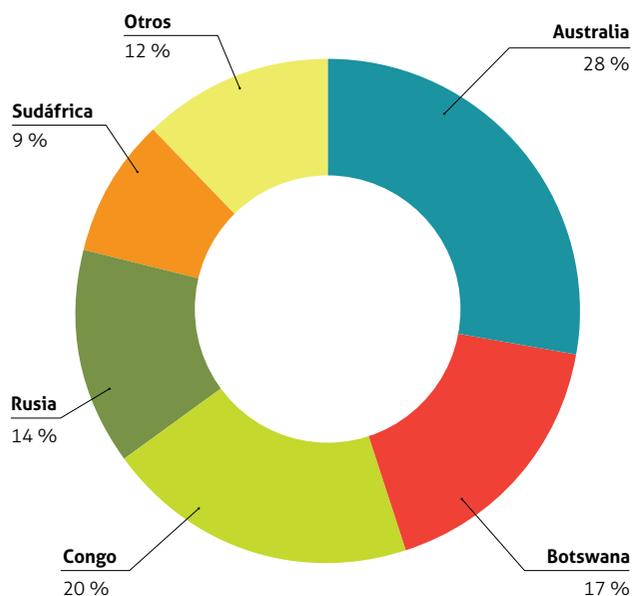


Figura 5. Representación de las reservas de diamante por países
Millones de quilates

Fuente: USGS (2017)

Al observar la cifra de las reservas base para el 2016 sobresalen los datos que posee Australia, que lo ubican en el primer lugar a nivel mundial, seguido de Congo y Botswana, con un 65 % de las reservas mundiales. De acuerdo con las cifras de las reservas base internacionales y la producción mundial estimada de diamante industrial en el 2016, igual a 57 millones de quilates (tabla 3), se puede afirmar que resultan adecuadas para atender las demandas del planeta durante los próximos 16 años. Por lo corto del tiempo, se llevan a cabo varios proyectos de gran envergadura de exploración de diamante en Canadá, Australia, Brasil y en los países “diamantíferos” de África (Janse y Sheahan, 1995), con el fin de incrementar este periodo; se espera conocer entre uno y cinco hallazgos significativos en lo que resta de esta década.

Más adelante se muestra el conjunto de países que producen diamante industrial de fuente natural, y se suministran los totales por concepto de gemas y diamantes sintéticos. El análisis se construye al diamante industrial en el periodo 1996-2016: la producción de este material alcanzó su pico máximo hacia el 2006 y ha ido disminuyendo paulatinamente hasta los niveles de hace veinte años.

Entre los países que producen diamante de fuente primaria, los cuatro más grandes en el 2016, que cubren el 84 % de la producción mundial, son Rusia con el 32 %, Australia con el 23 %, Congo con el 19 % y Botswana con un 11 % (figuras 6 y 7).

Tabla 3. Producción minera mundial de diamante, por países

País	Producción (millones de quilates)				
	1996	2001	2006	2011	2016
Australia	23	15	25	10	13
Botswana	5	5	8	7	6
Congo	ND	14.2	24	22	11
Rusia	9	11.7	15	15	18
Suráfrica	5.5	6.5	9	5	4
Brasil	0.9	0.6	ND	ND	ND
China	0.9	0.9	1	1	ND
Zaire	13	ND	ND	ND	ND
Zimbabue	ND	ND	ND	ND	2
Otros	0.7	2.1	3	4	3
Total	58	56	85	64	57

Millones de quilates (Q), periodo 1996-2016; ND: no disponible

Fuente: USGS (2017)

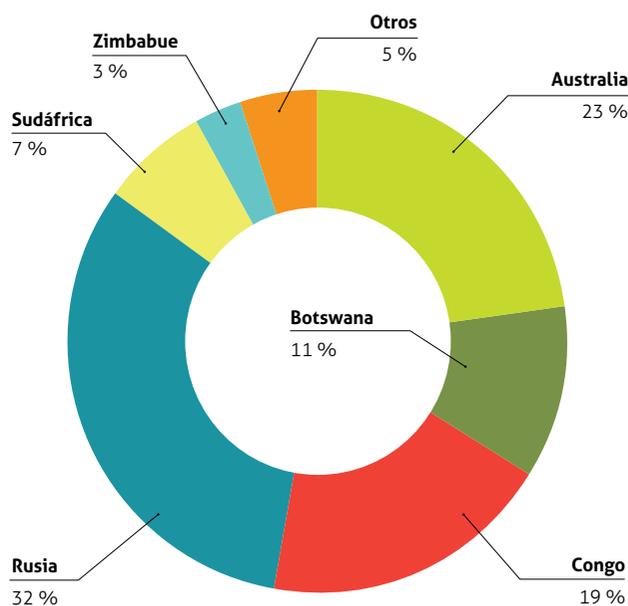


Figura 6. Participación de la producción mundial de diamantes en el 2016

Fuente: USGS (2017)

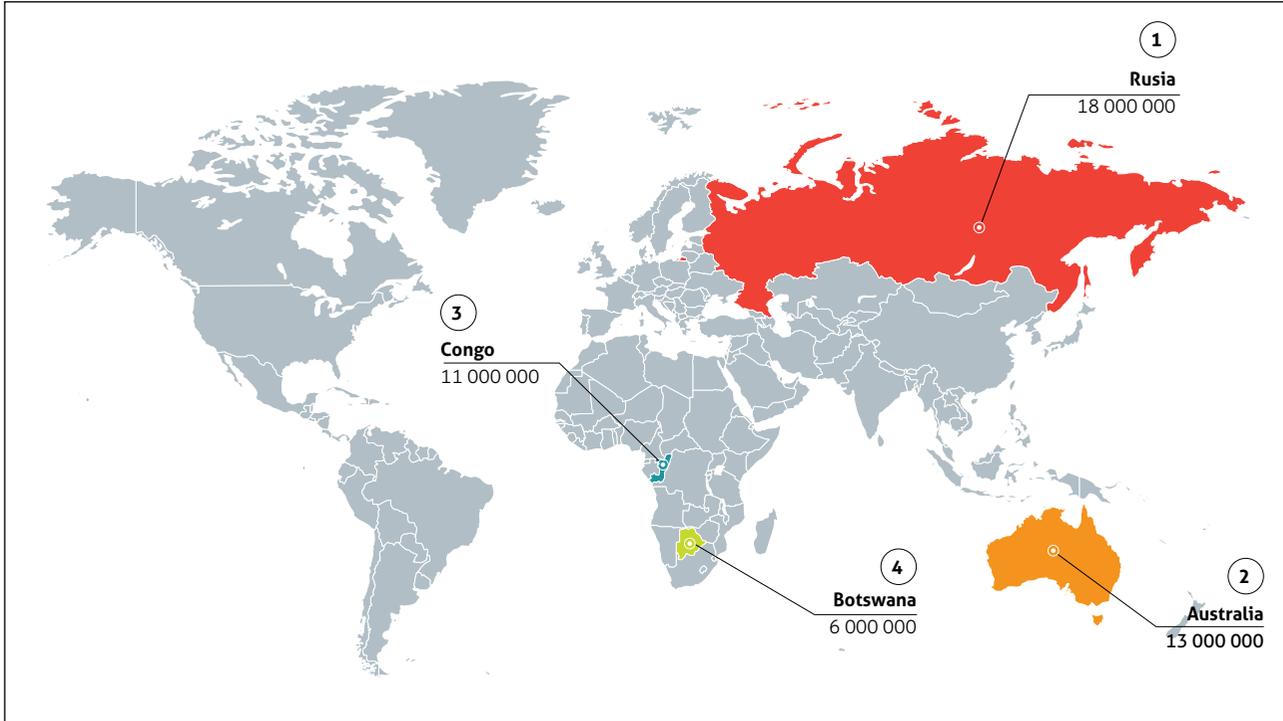


Figura 7. Principales países productores de diamantes en el 2016

Fuente: USGS (2017)

2.6. Perspectivas

Las perspectivas sobre las fuentes de los recursos continuarán basándose en los países líderes, tanto en reservas como en la producción minera: Congo (Kinshasa), Australia, Rusia y Sudáfrica. A partir de 1995 la actividad exploratoria de países líderes en estos menesteres, como Canadá, Sudáfrica, Australia y Brasil, se ha incrementado ostensiblemente con el fin de aumentar la cantidad de reservas y en previsión de lo limitada que está la cifra de reservas base para atender el consumo mundial. Estos esfuerzos se acompañan también de lo hecho por Zimbabue y Tanzania en el campo de los depósitos secundarios en medio marino.

La producción la sigue dominando el mercado de los equipos de perforación y de las herramientas de corte, afilado y pulido, donde el diamante natural conserva su nicho de consumo. A lo anterior se suma otro factor a su favor: su ingreso firme en el mercado de las TIC en las variedades de las nanotecnologías y en aprovechamiento pleno de sus propiedades físicas en cuanto a conductividad térmica y demás.

El diamante industrial se mantendrá en producción porque acompaña a la gema en proporción de 10 a 1, pero a la larga esta cifra poco importa, ya que a la fecha no se ha descrito explotación minera alguna que arroje en los dese-

chos mineros el diamante que no cumple con los criterios para clasificarse como gema. Por último, el reciclaje de la gema del diamante será el último proceso que emprenda la civilización humana, y lo que actualmente se realiza con los diamantes industriales cada vez pierde terreno ante los bajos precios, la abundancia y la elaboración “a la medida” de los producidos en las plantas-laboratorio.

Los precios del diamante (figura 8) durante los años 1960-2015 tiene un crecimiento continuo en el periodo 1960-2000; para el periodo 2000-2010 crece casi un 80 % al pasar de USD \$15 100/Q a USD \$24 500/Q, para luego continuar incrementando de manera controlada hasta finales del 2015 (Statista.com, 2017).

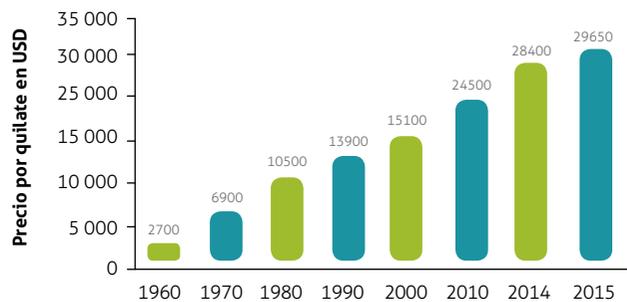


Figura 8. Precios del diamante industrial en el mercado de Estados Unidos

Fuente: Statista.com (2017)

Ante este comportamiento, es posible anticipar la trayectoria del precio del diamante industrial en lo que resta de la segunda década del siglo XXI y la permanencia de este mineral en la franja de los USD \$30 000/Q o más en el mismo lapso. Además, en el establecimiento de la trayectoria del precio se requiere tener en cuenta, entre otros factores, la tendencia a corto y mediano plazo, las oscilaciones cíclicas del mercado y las fluctuaciones a corto plazo, así como también los elementos que influyen en la determinación de los precios de mercado, que fundamentalmente son cinco: la demanda, la oferta, la relación entre la oferta y la demanda, la elasticidad de la oferta y la demanda, al igual que los precios relativos. Esta labor se hace más com-

pleja si se tiene en cuenta que en el caso de los minerales se encuentran imperfecciones de los mercados que dan lugar a un mal funcionamiento del sistema de precios.

3. Diamante en Colombia

La primera ocurrencia comprobada de diamantes en Colombia se debe a Romero, Schultz y Chávez (1996) y la reportan en la quebrada Alba Rosa, afluente del caño Guapayito, que desemboca en el río Guainía, en el departamento del Guainía, al centro-oriente del país (figura 9).



Figura 9. Localización geográfica del prospecto de diamante en Colombia

Fuente: Romero, Schultz, y Chavéz (1996)

3.1. Geología regional

El nivel de conocimiento actual en Colombia sobre la geología regional de las mineralizaciones de diamante alcanzaba, hasta 1996, el estado de prospectividad sustentado en la referencia sobre placeres de diamantes que se hizo en el Informe del Proyecto Cooperativo Ingeominas-USGS en sus publicaciones dadas a conocer en 1986 (USGS-Ingeominas, 1986). En el libro de *Recursos minerales de Colombia*, (Ingeominas, 1987) y en el *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*, Mutis Jurado (1983) no se consideró al diamante entre los temas desarrollados. En el estudio *Mineral Resource*

Assessment of Colombia, realizado mediante memorando de entendimiento entre Ingeominas y el USGS, con resultados publicados en el *Informe del Proyecto Cooperativo USGS-Ingeominas* (1986), que se hizo “teniendo en cuenta los diferentes tipos de depósitos más que la ocurrencia de un mineral en particular”, se refieren el Dominio N.º 30, sin indicar terreno geológico en Colombia, y el N.º 33, Vichada, del terreno Meta-Vichada, en el cual se puede encontrar el siguiente tipo de depósito: “Placeres de Diamantes”, y que hacen alusión a los depósitos conocidos de “río Caroní (Venezuela)” y a “Placeres del Terciario de Venezuela”, respectivamente (tabla 4).

Tabla 4. Dominios y terrenos geológicos con potencial de placeres de diamantes

Dominio*		Tipo de depósito más probable*	Terreno(s) geológico(s)**	Ambiente litológico
30	Roraima	Placeres de diamantes (6.2)	No indicado	La fuente son capas conglomeráticas de la formación Roraima
33	Vichada	Placeres de diamantes (6.2)	Meta-Vichada	Posibles placeres de diamantes retrabajados en sedimentitas Terciarias al W de afloramientos cristalinos

* USGS-Ingeominas (1986)

** Ingeominas-USGS (1986)

Fuente: USGS-Ingeominas (1986)

En un número de la revista *Geología Colombiana* de 1996 aparece el artículo mencionado, sin hacer referencia a este informe del Proyecto Cooperativo y sin dar a conocer tampoco que su hallazgo confirmaba el pronóstico efectuado en 1986, relacionado con la existencia de placeres de diamantes en el Dominio N.º 30, donde se encuentra el área de la quebrada Alba Rosa.

El Dominio N.º 33, Vichada, descrito en este Informe del Proyecto Cooperativo, abarca parte del terreno Meta-Vichada-Guaviare, extremo nororiental en límites con Venezuela, al norte, y Brasil, al sur. En este terreno el ambiente litológico de interés al norte lo constituye la Formación Roraima, de edad Paleoproterozoico, que se encuentra representada por las siguientes litologías: conglomerado basal, arenisca conglomerática, *shale* oscuro, cuarzoarenitas, arcillolitas.

De acuerdo con la ubicación de la quebrada Alba Rosa, el diamante en Colombia, en el caso de los placeres de minerales descritos por Romero, Schultz y Chávez (1996), corresponde a un prospecto que se encuentra geológicamente en la denominada Provincia Litosférica Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA), descrita por Gómez *et al.* (2006) en la breve evolución geológica de Colombia del *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*.

Según Gómez *et al.* (2006), la PLCPA “hace parte del escudo Guayanés, el autóctono gondwánico, alrededor del cual se produjo nucleación cratónica por amalgamación, hacia el occidente, de diferentes fragmentos del supercontinente Laurentia, en su deriva relativa hacia el noreste con respecto a Gondwana, p 2”. Según estos autores, las rocas metamórficas identificadas como “PP-ma” facies anfibolita-granulita y las rocas plutónicas “MP-Pf” de composición félsica constituyen el basamento de la Amazonia y de los Llanos Orientales colombianos.

3.2. Geología local

Utilizando el esquema de clasificación de los tipos de depósitos del USGS, se clasifica como secundario del tipo placeres de diamantes y a continuación se describe el único prospecto conocido hasta la fecha en Colombia, siguiendo ese esquema.

Prospecto: Placeres de diamantes de caño Guapayito (Romero, Schultz y Chávez, 1996).

En la quebrada Alba Rosa (figura 9), del caño Guapayito, afloran rocas que “podrían hacer parte de la Formación Roraima. El área de estudio podría ser localizada dentro del cratón, más específicamente archón de Patrocinio”

(Romero, Schultz y Chávez, 1996, p 115). La referencia original sobre los cratones en Suramérica de Janse y Sheahan (1995) se refiere a esta gran región con el nombre de protón del cratón Guayana, donde están ubicados los depósitos de Guaniamo y Caroni en Venezuela, y Mazaruni de Guayana, todos secundarios, correspondientes a placeres fluviales. Los diamantes del prospecto de la quebrada Alba Rosa de caño Guapayito han ingresado a esta clasificación como parte del protón mencionado.

Ambiente geológico:

- *Tipo de depósito sedimentario.* El depósito diamantífero se encuentra en el abanico aluvial de la quebrada Alba Rosa y comprende volúmenes de gravas con diamantes que reposan sobre rocas compactas, diabasas o arcillas de tono verdeazulosas. Las dos presentaciones de las gravas están mineralizadas, pero la segunda es la más notoria.
- *Textura.* Las gravas “casi siempre son angulares, denotando poco transporte y probablemente un origen más lateral que longitudinal. Los guijarros presentan dimensiones que varían entre 20 y 40 mm”. (Romero, Schultz y Chávez, 1996 p 115). Estos materiales están recubiertos por sedimentos de tamaño fino y arenas finas que exhiben estratificación cruzada, acompañadas de limolitas, arcillolitas y lentes de material orgánico.
- *Rango de edad.* No indicada en el estudio. Se deduce para los placeres una edad del Cuaternario, y para las rocas que conforman el área los autores del estudio indican que son parte de la Formación Roraima, de edad Paleoproterozoico.
- *Ambiente de depositación.* Abanico aluvial de poco transporte, gravas de espesor medio y poco considerable, con ausencia de selección, dirección lateral predominante y ambiente sedimentario torrencial.
- *Marco tectónico.* Se localiza en la Región Patrocinio del cratón o archón de Guayana, según Janse y Sheahan (1995) dentro de la Provincia Litosférica Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA) de Gómez *et al.* (2006).

Descripción del depósito:

- *Minerales constituyentes.* En las gravas se encuentran los diamantes y los siguientes minerales: olivino (variedad forsterita), granate (variedad piropo, más abundante, y almandino), ilmenita, esfena, con epidota y

limonita. En los materiales de recubrimiento, además de los anteriores, con excepción de olivino —que está ausente—, se presentan biotita, brookita y rutilo.

- *Origen.* La presencia de los minerales asociados del olivino (variedad forsterita) y del granate (variedad piropo) indica un “origen a partir de magmas peridotíticos de tipo I herzolito, característicos del manto superior” (Romero, Schultz y Chávez, 1996, p 120).
- *Minera.* Los diamantes son de tres tipos: la variedad bien cristalizada entre 15 y 25 %; el netamente cristalizado, translúcido y opaco, y la variedad *borts*, en mayor porcentaje que los dos anteriores. (Romero, Schultz y Chávez, 1996, p 116).
- *Textura/estructura del depósito.* Clástica de grano medio a grueso, poco transporte, en drenajes meándricos y con rupturas. El material de recubrimiento es de tamaño fino y tiene estratificación cruzada.

3.3. Situación actual de la minería

En Colombia el diamante se extrae en forma artesanal, directamente de la quebrada Alba Rosa “por los dueños de los socavones”, a los cuales los autores del estudio se refieren como mineros, quienes, a su vez, cedieron las muestras (treinta diamantes) para los análisis correspondientes (Romero, Schultz y Chávez, 1996). Se reportan once títulos vigentes para piedras preciosas según el catastro minero.

3.3.1. Potencial

Hasta la fecha no se han divulgado las reservas relacionadas con el diamante. En razón de la existencia de diamantes en Colombia, coincidentes con el Dominio N.º 30 Roraima, la prospectividad del país en lo referente al diamante es alta, la cual se puede convertir en un yacimiento grande si Colombia desarrolla un programa de investigación minera, prospección y exploración en el área de este dominio, partiendo inicialmente con teledetección para el reconocimiento de las geoformas de tipo maar-diatrema, los paleocanales y otros rasgos geotectónicos, acompañada de geofísica aerotransportada para detectar contrastes litológicos. Una vez analizada toda la información, se desarrollan los proyectos según los modelos de mineralización deducidos y con más alta probabilidad de contener depósitos diamantíferos. Su origen se adelantaría una vez se conocieran los prospectos minerales en la etapa de exploración detallada.

El cuadro metalogénico regional que incide sobre la potencialidad de Colombia, en lo que respecta al diamante, indica lo siguiente: en Venezuela, en el aluvión del

río Quebrada Grande, afluente del río Guaniamo, depósito diamantífero que cubre un área de 15 km de largo por 6 km de ancho, los depósitos de placer han producido desde su descubrimiento en 1968 más de 15 000 000 de Q (Channer, Egorov y Kaminsky, 2001). El origen del diamante en Guaniamo proviene de kimberlita diamantífera; las inclusiones de los diamantes son de paragénesis eclogítica y la edad corresponde al Precámbrico.

En Brasil los depósitos significativos provienen del cratón archón San Francisco, al extremo centro-oriente del país, y del cratón protón Guaporé, al centro del país, con edades variadas: los intrusivos son del Cretáceo y dos eventos tectónicos mayores: entre 1600-1200 Ma y entre 450-750 Ma, mientras que las de los sedimentos van desde el Proterozoico inferior al Cuaternario (Tompkins y Gonzaga, 1989).

Al relacionar este marco metalogénico con Colombia se puede proponer que, por su vecindad con Guaniamo, en Venezuela, el origen del diamante colombiano proviene de kimberlitas; sin embargo, por encontrarse en el Dominio N.º 30, Roraima, no se descarta su asociación con los depósitos diamantíferos de Brasil, que se caracterizan por estar relacionadas con eventos fluvio-glaciales que los distribuyeron en algunas áreas y por largos trayectos, como en la región de Coromandel, o con intrusiones de kimberlitas diamantíferas, como las que ocurren en el protón Guaporé. En los depósitos de Brasil se tiene en cuenta el quilate, dado que los diamantes que superan los 100 Q se encuentran preferencialmente en Coromandel.

3.3.2. Comercio

No existe información oficial sobre producción de diamantes en Colombia en los informes sobre producción minera nacional. Por tanto, los volúmenes de producción de diamante en Colombia se desconocen y, de existir, provienen como resultado del registro “particular” por parte de los mineros de los socavones de la quebrada Alba Rosa, caño Guapayito, departamento del Guainía.

No existe información oficial sobre producción fuente primaria de diamante en Colombia. De este modo, la demanda nacional de diamantes se satisface totalmente mediante importaciones que se realizan fundamental-

mente en dos presentaciones: diamantes industriales y no industriales.

A continuación se muestra el comportamiento de las exportaciones en total de Colombia en los últimos siete años según los registros de regalías (figura 10) (UPME, 2017).



Figura 10. Exportaciones totales de diamantes Periodo 2010-2016 (kg)

Fuente: (UPME, 2017)

Las perspectivas internacionales del diamante son favorables en la actualidad, lo cual ha movido a los países a efectuar exploraciones exhaustivas. Colombia, al tener un prospecto detectado, puede hacer la prospección inicial del Dominio N.º 30 Roraima, según lo indicado.

4. Aspectos ambientales y sustitutos

En el registro que Lenntech (2007) tiene del carbón en su portal, manifiesta que no se han reportado efectos ambientales negativos del carbón elemental, lo cual se puede ampliar al diamante, que es carbón elemental puro. Otras formas del carbón y sus efectos ambientales nocivos no son imputables al diamante.

Los sustitutos para el diamante industrial de origen natural provienen de los carburos de silicio, del aluminio fusionado y del nitrido de boro. Y para todos ellos, proviene del diamante sintético, que abarca el 90 % de las aplicaciones industriales.

Referencias

- American Gem Society. (2017). Jewelry Buying Guide. *American Gem Society*. Disponible en <https://www.americangemsociety.org/en/jewelry-buying-101>
- Barthelmy, D. (2007). *Dana Classification*. Disponible en <http://webmineral.com/danaclass.shtml>
- Bluck, B., Ward, J. y De Witt, M. (2005). Diamond Mega-placers: Southern Africa and the Kaapval Craton in a Global Context. *Geological Society Special Publications*, 248, 213-245.
- Boyd, F., Gurney, J. y Richardson, S. (1985). Evidence for a 150-200 km thick Archean Lithosphere from Diamond Inclusion Thermobarometry. *Nature*, 315, 387-389.
- Bulanova, G. (1995). The formation of diamond. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 1-23.
- Channer, D., Cooper, R. y Kaminsky, F. (1998). The Guaniamo Diamond Region, Bolivar State, Venezuela: a new kimberlite province. *7th International Kimberlite Conference* (pp. 144-146). Cape Town.
- Channer, D., Egorov, A. y Kaminsky, F. (2001). Geology and structure of the Guaniamo Diamondiferous kimberlite sheets, south- west Venezuela. *Revista Brasileira de Geociencias*, 31(4), 615-630.
- Clement, C. (1982). *A comparative geological study of some major pipes in the Northern Cape and Orange Free State*. Cape Town: University of Cape Town.
- Clement, C. y Reid, A. (1989). The origin of kimberlite pipes: an interpretation based on a synthesis of geological features displayed by southern African occurrences. *Geological Society of Australia. Special Publication*, 14, 632-644.
- Clifford, T. (1966). Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. *Earth and Planetary Science*, 1(6), 421-434.
- Cox, D. y Singer, D. (1992). *Mineral Deposit Models*. Washington: United States Geological Survey (USGS).
- Energy and minerals. Diamond Deposits. (s. f.). *Depósitos de diamantes*. Disponible en <http://earthsci.org/mineral/mindep/diamond/diamond.html>
- Evans, A. (1987). *An introduction to ore geology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Felice, M. (2013). Material of the month: Aggregated diamond nanorods- carbon strength examined. *Materials World Magazine*. Disponible en <http://www.iom3.org/materials-world-magazine/feature/2013/jun/04/material-month-aggregated-diamond-nanorods-carbon>
- Gaines, R., Skinner, H., Foord, E., Mason, B. y Rosenzweig, A. (1997). *Dana's new mineralogy*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Golubev, Y. (1995). Diamond exploration in glaciated terrain: a Russian perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 265-275.
- Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. et al. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Griffin, W. y Ryan, C. (1995). Trace elements in indicator minerals: Area selection and target evaluation in Diamond exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 311-337.
- Gurney, J. y Zweistra, P. (1995). The interpretation of the major element compositions of mantle minerals in diamond exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 293-309.
- Helmstaedt, H. y Gurney, J. (1995). Geotectonic controls of primary diamond deposits: Implications for area selection. *Journal of Geochemical Exploration*, 53, 125-144.
- Hemley, R., Yan, C. y Chen, Y. (2005). Growing diamond crystals by chemical vapor deposition. *Elements*, 1(2), 105-108.
- Spacedaily. (2001). *Turning diamond film into solar cells*. Disponible en <http://www.spacedaily.com/news/solarcell-01b.html>
- Ingeominas. (1987). *Recursos minerales de Colombia*. Tomo 1. Metales preciosos. Metales metálicos. Bogotá.
- Ingeominas-United States Geological Survey (USGS). (1986). *Mapa de terrenos geológicos de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Jacob, R., Bluck, B. y Ward, J. (1999). Tertiary-age diamondiferous fluvial deposits of the lower orange river valley, Southwestern Africa. *Economy Geology*, 94(4), 749-758.
- Janse, A. y Sheahan, P. (1995). Catalogue of world wide diamond and kimberlite occurrences: A selective and annotative approach. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 73-111.
- Jaques, A., Lewis, J. y Smith, C. (1986). The kimberlites and lamproites of western Australia. *Geological Survey of Western Australia Bulletin*, 132.
- Kaminsky, F., Zakharchenko, O., Griffin, W., Channer, D. y Khatryan-Blinova, G. (2000). Diamond from the Guaniamo area, Venezuela. *The Canadian Mineralogist*, 38, 1347-1370.
- Lenntech. (2007). *Carbon – C*. Disponible en www.lenntech.com/Periodic-chart-elements/C-en.htm
- Lorenz, V. (1973). On the formation of maars. *Bull Volcanology*, 137(2), 183-204.
- Lorenz, V. (2003). Maar-diatreme volcanoes, their formation, and their setting in hard-rock or soft-rock environments. *Geolines*, 15, 72-83.
- Madehow.com. (2017). *Diamond*. Disponible en <http://www.madehow.com/Volume-2/Diamond.html#ixzz0jA0NbAa9>
- Marshall, T. y Baxter-Brown, R. (1995). Basic principles of alluvial Diamond exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 277-292.

- May, P. (2007). *Principle properties of diamond*. University of Bristol. Disponible en <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/diamond/diamprop.htm>
- Meyer, H. y McCallum, M. (1993). Diamonds and their sources in the Venezuelan portions of the Guyana shield. *Economy Geology*, 88(5), 989-998.
- Mitchell, R. (1986). *Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology*. Nueva York: Plenum Press.
- Moon, C., Whateley, M. y Evans, M. (2006). *Introduction to mineral exploration*. Hong Kong: Blackwell Publishing.
- Moore, R., Gurney, J., Griffin, W. y Shimizu, N. (1991). Ultra-high pressure garnet inclusions in monastery diamonds: trace element abundance patterns and conditions of origin. *European Journal of Mineralogy*, 3(2), 213-320.
- Mutis Jurado, V. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Nixon, P. (1995). The morphology and nature of primary diamondiferous occurrences. *Journal of Geochemical Exploration*, 53(1-3), 41-71.
- Pell, J. (1998). *Kimberlite-hosted diamonds, in Geological Fieldwork 1997*. Paper 1998-1, British Columbia Ministry of Employment and Investment.
- UN. ECE. Committee on Sustainable Energy. (2001). Report: Economic Commission for Europe, Committee on sustainable energy, 11th session. Disponible en <http://repository.un.org/handle/11176/343566?show=full>
- Richardson, S., Erlank, A., Harris, J. y Hart, S. (1990). Eclogitic diamonds of proterozoic ages from cretaceous kimberlites. *Nature*, 346, 54-56.
- Richardson, G., Gurney, J., Erlank, K. y Harris, J. (1984). Origin of diamond in old enriched mantle. *Nature*, 310, 198-202.
- Robb, L. (2005). *Introduction to ore-forming processes*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Roffman, S., Lieber, V. y Solow, L. (2017). Natural Industrial Diamonds. Disponible en <http://www.lieberandsolow.com/industrial-diamonds.html>
- Romero, F., Schultz, R. y Chávez, T. (1996). Ocurrencias diamantíferas de la quebrada Alba Rosa, caño Guapayito, Guainía (Colombia). *Geología Colombiana*, 20, 113-122
- Schoner, J. (2004). *Diamond cut history*. Disponible en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond_cut_history.png
- Spear, K. y Dismukes, J. (1994). *Synthetic Diamond Emerging CVD Science and Technology*. Nueva York: Wiley.
- Spectral International Inc. (s. f.). *Full Range/High Resolution Field Portable Spectroradiometers for Remote Sensing*. Disponible en http://www.spectralevolution.com/portable_spectroradiometer_remote_sensing.html
- Statista.com. (2017). Evolución del precio del diamante por quilate de 1960 a 2016 (en dólares). Disponible en <https://es.statista.com/estadisticas/636000/precio-del-diamante-por-quilate/>
- Tompkins, L. y Gonzaga, G. (1989). Diamonds in Brazil and a proposed model for the origin and distribution of diamonds in the coromandel region, Minas Gerais, Brazil. *Economy Geology*, 88(3), 591-602.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). *Boletín estadístico de minas y energía. 2012-2016*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf
- United States Geological Survey (USGS). (2006). *Diamond, Industrial*. Disponible en <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diamond/diamomyb05.pdf>
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Industrial Diamond Statistics and Information*. Disponible en <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diamond/>
- United States Geological Survey (USGS)-Ingeominas. (1986). *Evaluación de los recursos minerales no combustibles de Colombia*. Bogotá.
- White, S., De Boorder, H. y Smith, C. (1995). Structural controls of kimberlite and lamproite emplacement. *Journal of Geochemical Exploration*, 53, 245-264.
- Wikipedia.com. (2017a). Synthetic diamond. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Synthetic_diamond
- Wikipedia.com. (2017b). Cráter Popigai. Disponible en https://es.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A1ter_Popigai
- Yan, C., Mao, H., Li, W., Qian, J., Zhao, Y. y Hemley, R. (2004). Ultrahard diamond single crystals from chemical vapor deposition. *Physica Status Solidi*, 201(4), 25-27.
- Yan, C., Vohra, Y., Mao, H., y Hemley, L. (2002). Very high growth rate chemical vapor deposition of single-crystal diamond. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 523-525.
- Pie, M. (2014). *Platonic solids.jpg*. Disponible en https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Platonic_solids.jpg&oldid=221707673



Diamante
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC