



Siderita  
Servicio Geológico Colombiano  
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

# Hierro

Carlos Ulloa Melo

**Citación:** Ulloa, C. (2019). Hierro. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El hierro es el cuarto elemento más abundante de la corteza terrestre y es el más usado, con el 95 % en peso de la producción mundial de metal; se emplea principalmente en la producción de acero “una aleación de hierro con otros elementos metálicos y no metálicos”.

Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3000 a.C., y se sabe que antes de esa época se empleaban adornos de hierro. Los griegos ya conocían hacia el 1000 a.C. la técnica, de cierta complejidad, para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico.

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro (y, de hecho, todas las aleaciones de hierro fabricadas hasta el siglo XIV d.C.) se clasificarían en la actualidad como hierro forjado.

Los artesanos del hierro aprendieron a fabricar acero calentando hierro forjado y carbón vegetal en recipientes de arcilla durante varios días, con lo que el hierro absorbía suficiente carbono para convertirse en acero auténtico.

Después del siglo XIV se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

La producción moderna de acero emplea altos hornos que son modelos perfeccionados de los usados antiguamente. Desde la década de 1960 funcionan varios minihornos que emplean electricidad para producir acero a partir de chatarra. Sin embargo, las grandes instalaciones de altos hornos continúan siendo esenciales para producir acero a partir de mineral de hierro (InfoAcero, s.f).

## 1. Usos

Debido a que el hierro presenta diferentes propiedades físicas, pueden obtenerse diversos productos, según sea tra-

tado en las siderúrgicas, como hierros dulces, hierros de fundición y aceros dulces, que se subdividen a su vez según el contenido de carbono (medido como % de C en peso), en acero bajo en carbono (< 0.25 %), medio en carbono (0.25 % a 0.55 %) y alto en carbono (> 55 %) (Garcés, 1995).

Los productos obtenidos en las siderúrgicas tienen innumerables usos, que van desde los más sencillos utilizados domésticamente como agujas, tornillos, puntillas, martillos, llaves de diversos calibres, etc.; también se utilizan en herramientas milimétricas, herramientas de la pequeña industria y de la industria pesada; en la construcción de puentes, grandes edificaciones, transporte individual (bicicletas, patines, motos), y en productos de gran volumen como barcos, camiones, aviones, trenes, etc.

El hierro, con sus múltiples aleaciones, ha sido indispensable en el desarrollo y el bienestar de la humanidad, y ha cumplido un papel preponderante en las eras industriales, atómica y actualmente la de la informática, ya que se utiliza en componentes de celulares, computadores, cohetes y satélites, etc.

En general, el uso del hierro como componente esencial de diversas aleaciones es indispensable en el desarrollo de la humanidad, debido a su abundancia y a las técnicas para combinarlo con otros elementos.

## 2. Ambiente geológico

El hierro se encuentra en diferentes ambientes y periodos geológicos. Se conocen yacimientos en el Precámbrico, el Paleozoico, el Mesozoico y el Cenozoico, en ambientes de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Los minerales de hierro presentes en ambientes magmáticos son el producto de la cristalización de materiales de roca líquida, tanto en depósitos en forma de capas — producto del asentamiento de los minerales pesados que se cristalizan para formar concentraciones ricas en hierro—, como en depósitos de hierro en forma de diques. La producción de este tipo de depósito representa entre el 3 y el 5 % de la producción mundial.

También se presentan los depósitos de hierro de contacto metamórfico cuando rocas ígneas plutónicas, de composición ácida a intermedia, atraviesan rocas calizas. Otro mecanismo en el depósito de hierro ocurre cuando soluciones calientes, ricas en hierro, se hospedan en rocas químicamente compatibles para ser reemplazadas, como las calizas, donde el hierro que se forma corresponde a siderita u óxidos.

Los principales y más grandes depósitos de hierro en el mundo son de origen sedimentario, depositados en ambientes marinos con influencia volcánica —principalmente en el Precámbrico— y marinos por precipitación química en el Paleozoico, el Cretáceo y el Terciario. También hay depósitos menores por enriquecimiento superficial, que corresponden al 85 % del hierro explotado y producido en el mundo.

### 2.1. Características

El hierro es el metal de transición más abundante en la corteza terrestre y el cuarto de todos los elementos. Se encuentra formando parte de numerosos minerales: cerca de trescientos lo contienen como componente esencial; pueden presentarse como yacimientos que pueden agruparse en óxidos (magnetita y hematita), hidróxidos (goethita), carbonatos (siderita), sulfuros (pirita y marcasita, pirrotina) y silicatos.

*Magnetita* ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Color negro, fuertemente magnético, contiene el 72.4 % de hierro, raya negra sobre porcelana, dureza y peso específico 5.18 g/cm<sup>3</sup>, lustre metálico, brillante, quebradiza, cristaliza en el sistema isométrico. Se presenta en forma de masas granuladas, granos sueltos y a veces en forma de cristales. Los principales yacimientos de este mineral se encuentran en el Precámbrico, en las formaciones de hierro bandeado y en los yacimientos de segregación magmática.

*Hematita* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Color que varía entre parduzco, rojizo, gris y negro; virtualmente no magnético, con contenido de hierro del 70 %, raya marrón-rojo parduzca sobre porcelana, lustre metálico a mate, opaca, cristaliza en el sistema hexagonal, peso específico 5.2 a 5.3 g/cm<sup>3</sup> y dureza de 6 en la escala de Mohs.

Se conoce también como oligisto; cuando tiene textura oolítica se denomina hematita oolítica. Es común en los yacimientos de reemplazo asociados a magnetita, y es constituyente secundario en las formaciones de hierros asociados a goethita.

*Goethita, limonita o hematitas parda* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Corresponde a una mezcla de hidróxidos de hierro, color amarillo a castaño oscuro, raya marrón o amarillo parduzco, comúnmente blanda y terrosa; puede ser dura y brillante, no magnética. Su contenido de hierro está cercano al 60 %. Limonita es el término general que se da a la parte terrosa impura de la goethita. Es el constituyente principal de los yacimientos originados en procesos de superficie o cerca de ella.

*Siderita* ( $\text{FeCO}_3$ ). Color blanco amarillento a gris verduzco, raya blanca, lustre vítreo y nacarado, cristaliza en el sistema hexagonal; densidad de 3.8 g/cm<sup>3</sup>, dureza entre 3.5 y 4 en la escala de Mohs. Contenido de hierro del 48.3 %, tiene proporciones de  $\text{MnCO}_3$  y  $\text{CaCO}_3$ . Se presenta en gran cantidad de yacimientos de origen hidrotermal y sedimentario. En zonas de oxidación se transforma en limonita.

*Pirita* ( $\text{FeS}_2$ ), *marcasita* y *pirrotina* ( $\text{Fe}_1\text{-Xs}$ ). Color amarillo, con lustre metálico. La pirrotina es débilmente magnética. Rocas con superficie de oxidación de pirita y pirrotina dan lugar a depósitos de óxidos de hierro que pueden ser explotados localmente. Las pirritas han sido explotadas como yacimientos en Estados Unidos y en el distrito de Michipicoten, en Canadá.

También las pirritas y la pirrotina, después de haber sido tostadas para la recuperación de azufre, dejan como subproducto el “Blue Billy”, utilizado para la obtención de hierro (Garcés, 1995).

*Chamosita* ( $\text{MgFeAl}_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{14}(\text{OH})_8$ ). Color que varía entre verde, amarillo claro, verde gris a negro; grano fino, translúcida, raya verde-grisáceo, lustre vítreo terroso, no magnética, con un contenido de hierro del 42 %. Es el mayor constituyente de las capas de hierro oolítico.

### 2.2. Tipo de depósito

En las clasificaciones de los yacimientos de hierro se tienen en cuenta aspectos geológicos, afines con su génesis, sobre todo en lo relacionado con mecanismos sedimentarios, ígneos, metamórficos, de alteración y época de los eventos. Asimismo se contempla lo relacionado con aspectos económicos, como la cantidad de mineral para ser explotado, tonelaje y ubicación.

Las clasificaciones de los depósitos de hierro se basan en los aspectos anteriores; en la actualidad existe gran variedad de estas. Sin embargo, las clasificaciones de Smirnov, Lingren, Bateman (1957) y Stanton tienen vigencia en muchos aspectos. Para el presente documento se tomaron

en cuenta las clasificaciones mencionadas y los conceptos de Guilbert y Park (1985), Edwards y Atkinson (1985), Ulloa (1987) y Garcés (1995). Los depósitos de hierro se han agrupado de la siguiente manera:

### 2.2.1. Depósitos de origen sedimentario

Los depósitos de hierro de origen sedimentario son los de mayor tamaño y constituyen del 85 al 90 % del hierro explotado y consumido en el mundo. La mayoría de las reservas de hierro en el mundo corresponden a las formaciones de hierro bandeado y, en menores proporciones, a las capas de hierro.

#### 2.2.1.1. Formaciones de hierro bandeado (Fhb)

El hierro proveniente de las Fhb constituye la mayor reserva de hierro en el mundo y se encuentra distribuido alrededor de los océanos Atlántico e Índico y, en menor proporción, en el Pacífico. Los mayores distritos se encuentran en Brasil, Venezuela, Estados Unidos, Canadá, Sudáfrica, Rusia, India y Australia (figura 1).

La edad de las Fhb está restringida al Precámbrico, en el Arqueano, Proterozoico y en el Fanerozoico (Edwards y Atkinson, 1985). En el Arqueano medio (3500-3000 Ma), se encuentran depósitos en el Escudo de las Guyanas y en el Escudo de Liberia, en África; en el Arqueano tardío se encuentran en los bloques del Escudo de Yilgum en Australia (Goodwin, 1973).

El Proterozoico inferior (2500 a 1900 m.a.) corresponde al periodo de mayor depósito de hierro de tipo Fhb en el mundo, probablemente en un ambiente de amplias cuencas en subsidencia lenta en ambientes de aguas poco profundas. Los principales depósitos son Lago Superior en Estados Unidos y Canadá; Labrador Through en Canadá; Krivoy Rog en Rusia; Transvaal Basin en Sudáfrica; Montañas McKenzie (Noroeste Canadá); Minas Gerais en Brasil, Carajas en Brasil, Guyana Venezolana; Singh Hum (India) y Hamersley en Australia (Arndt y Ganino, 2012), (Edwards y Atkinson, 1985).



**Figura 1.** Localización de las Fhb en el mundo durante el pre-Cámbrico

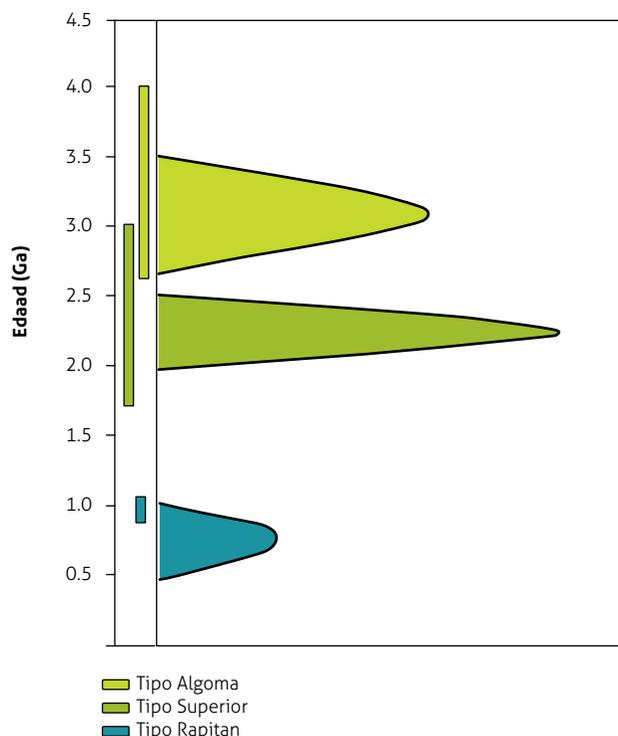
1. Minas Gerais- Cuadrilátero Ferrífero (Brasil), 2. Carajas- (Brasil), 3. Guyana Venezolana, 4. Lago Superior (Estados Unidos), 5. Labrador Through (Canadá), 6. Liberia (África), 7. Krivoy Rog (Ucrania) y 8. Hamersley (Australia), 9. Singh Hum (India), 10. las montañas McKenzie (Noroeste Canadá). y 11. Transvaal Basin en Sudáfrica

Fuente: Goodwin (1973); Edwards y Atkinson (1985); Arndt y Ganino (2012).

A finales del Proterozoico y comienzos del Fanerozoico ocurrió el último evento de depósitos de Fhb, de menores proporciones que en los periodos del Arqueano y el Proterozoico inferior (figura 2).

La mineralogía de las Fhb es compleja y contiene varios componentes que incluyen magnetita, hematita, limonita, siderita, caolinita, talco variedad psilomelano y chert ferruginoso, los cuales se listan en la tabla 1, donde se indican los componentes precipitados originalmente y sus equivalentes metamórficos. Las Fhb, después de los procesos metamórficos, se enriquecieron por procesos supergénicos, aumentando las concentraciones de hierro. Los principales minerales producto de dicho proceso son hematita, martinita y goethita.

El término Fhb se emplea para referirse a bandas o láminas ricas en hierro (óxidos, carbonatos o silicatos de hierro), separados por bandas de *chert*, *shale* y dolomita. Las bandas ricas en hierro, por lo general, van de pocos milímetros a varios centímetros de espesor. La definición que más aceptación ha tenido por varios autores es la de Lunar (1977), quien las define como “Capas de hierro que corresponden a una sedimentación química, en bandas o láminas delgadas que contienen 15 % o más de hierro de origen sedimentario y comúnmente pero no necesariamente láminas de *chert*”.



**Figura 2.** Abundancia estimada de formaciones de hierro a través del tiempo geológico

Fuente: Arndt y Ganino (2012).

**Tabla 1.** Componentes precipitados de las Fhb y sus equivalentes metamórficos

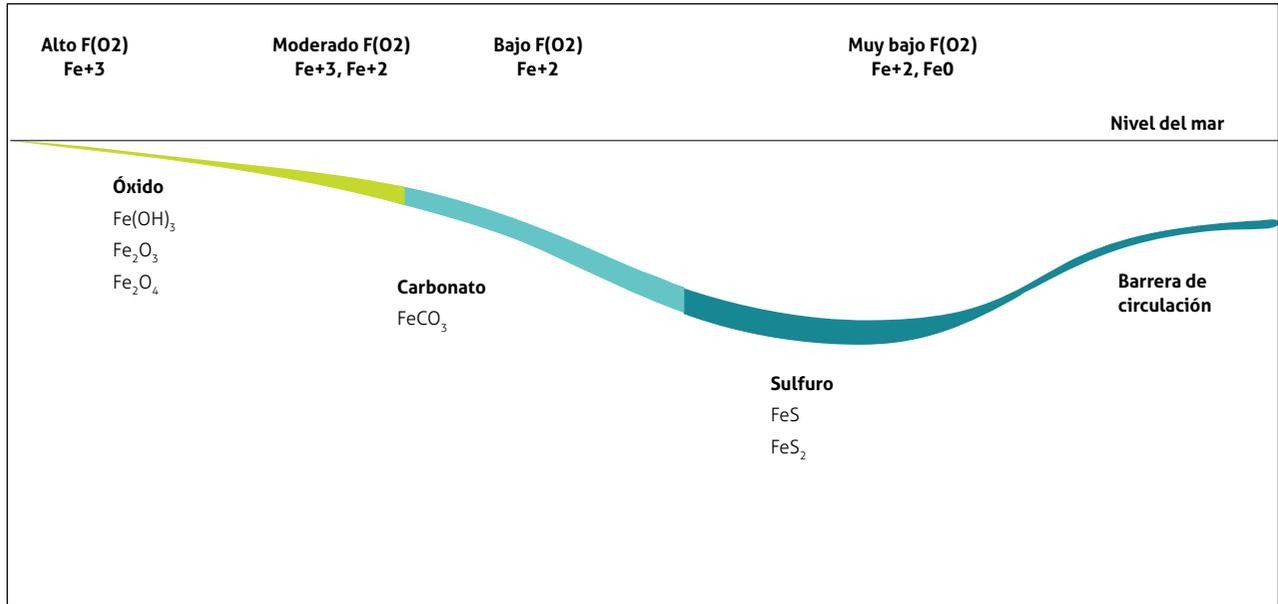
Compuesto	Precipitado inicial inferido	Observado ahora	
SiO <sub>2</sub>	Amorfo	<i>Chert</i>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Amorfo Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	Hematita	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ·nH <sub>2</sub> O hidromagnetita	Magnetita	
FeCO <sub>3</sub>	Siderita	Siderita	
Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Silicato ferroso amorfo	Fe <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) greenalita	Fe <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> minesotaita
		Fe <sub>7</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub> grunerita	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> fayalita
Sulfuro Fe	FeS	FeS <sub>2</sub>	
Silicato Na-Fe	Gel silicato Na-Fe	Riebekita, psilomelana, <i>chert</i>	

Fuente: Garrels, Perry y Mackenzie (1973)

Los depósitos de Fhb son de gran tamaño; se extienden a lo largo de centenares de kilómetros, tienen espesores de cientos de metros y el tenor promedio de hierro es del 30 %, y del 45 % de SiO<sub>2</sub>. A estos yacimientos les han sido dados diferentes nombres, según el país en donde se exploten: itabiritas (Brasil), jaspíritas (Australia) y taconitas (Estados Unidos y Canadá) (Guilbert y Park, 1985).

Las Fhb se han depositado en diferentes profundidades marinas (figura 3). Lunar (1977) definió varias fases que

dependen de la profundidad en la que ocurrió el depósito en el mar, y postuló que los óxidos de hierro (magnetita y hematita) necesitaban alta oxigenación y se depositaron en áreas cercanas a la costa; los carbonatos, como la siderita, necesitaban moderada a baja oxigenación y se depositaron en profundidades intermedias, y los sulfuros, con baja oxigenación, se depositaron en los fondos marinos (Guilbert y Park, 1985).



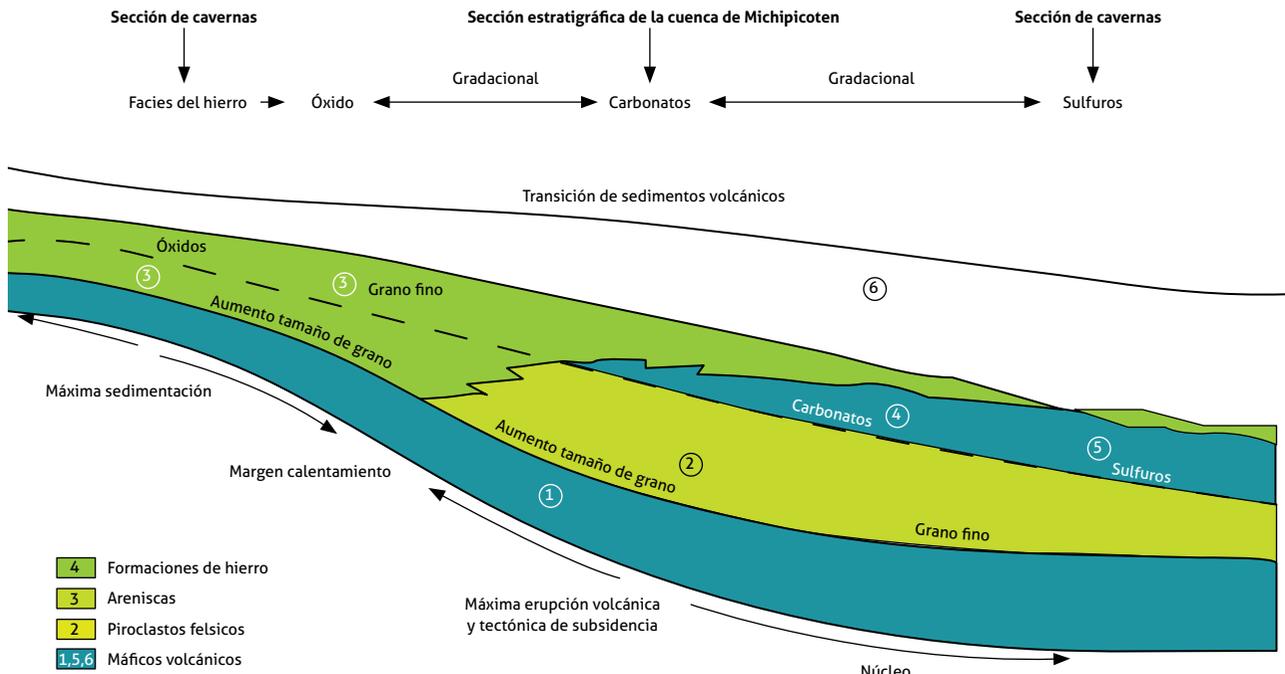
**Figura 3.** Modelo deposicional de los compuestos de hierro según su profundidad (James, 1954)

Fuente: tomado de Ohmoto, Watanabe y Yamaguchi (2006)

Este modelo ha servido para la reconstrucción estratigráfica de la cuenca de Michipicoten en Canadá (Goodwin, 1973; Guilbert y Park, 1985), como se aprecia en la figura 4.

Los depósitos de Fhb, desde el punto de vista geológico y económico, han sido subdivididos en dos tipos princi-

pales: Algoma y Superior (Guilbert y Park, 1985); (Cox y Singer, 1992), depósitos tipo Rapitan, localizados en las montañas McKenzie al noroeste de Canadá, son un tipo menor asociado con depósitos glaciares del Neoproterozoico (Arndt y Ganino, 2012).



**Figura 4.** Esquema de depósitos de Fhb de acuerdo con su profundidad e influencia volcánica

Fuente: Goodwin (1973), Guilbert y Park (1985)

2.2.1.2. Formaciones de hierro bandeado de tipo Algoma

Se refiere a las Fhb depositadas en el Arqueano en ambientes vulcano-sedimentarios, con influencia exhalativa, en cinturones verdes, generalmente en ambientes de sedimentación rápida de turbiditas y en espesas acumulaciones volcánicas. Algunas veces se hallan asociados a depósitos de sulfuros masivos de tipo Kuroko y de Au tipo Homestake (Cox y Singer, 1992).

La mineralogía de las Fhb tipo Algoma corresponde a magnetita, hematita y siderita, y contexturas de lavas almohadilladas, tobas félsicas y aglomerados pobremente sorteados (Cox y Singer, 1992).

En el esquema de la sección estratigráfica de la cuenca de Michipicoten se observa la zona de transición de sedimentos volcánicos en profundidades medias, correspondiente a carbonatos, pasando a zonas profundas donde predominan los sulfuros. En profundidades bajas predominan los óxidos, bajo la influencia de erupciones volcánicas y subsidencia tectónica (Goodwin, 1973).

Este tipo de depósito ha sido explotado en las minas de Hadan al sur del lago Kirland y Chertman en el distrito de Temahome, en Ontario; Helen y Soudan en Minesota; Zimbabue en Sudáfrica; Guyana en Venezuela, y Kilgart en Australia.

2.2.1.3. Formaciones de hierro bandeado de tipo Superior  
Estas formaciones se depositaron en el Proterozoico temprano, en ambientes de aguas marinas poco profundas, comúnmente en la parte continental, en cuencas intracraónicas. Las Fhb y las rocas huéspedes contienen texturas sedimentarias típicas de aguas poco profundas de regiones tectónicamente estables. Las Fhb tipo Superior se encuentran asociadas a manganeso sedimentario, el cual puede aparecer estratigráficamente cerca a los depósitos de Fhb interbandeado. Las mineralizaciones de Fhb Superior, por lo general, son hematita, magnetita, siderita y granos finos de cuarzo. Las Fhb han sufrido metamorfismo, lixiviación y alteración, lo que ha contribuido al enriquecimiento de minas, pasando de poco a alto contenido de hierro (mayor del 55 %).

Los principales depósitos de este tipo, ilustrados en la figura 1, se encuentran en la región del lago Superior entre Canadá y Estados Unidos, Cuenca Hamersley del oeste de Australia, Transvaal en Sudáfrica, el “Cuadrilátero Ferrífero” en Brasil, Krivoy Rog en Ucrania y el Singhbhum en India (Arndt y Ganino, 2012).

El tonelaje de las Fhb es de grandes magnitudes: en Brasil, las reservas pueden ascender a  $11000 \times 10^4$  t con

contenido de hierro del 40 al 69 %; en Sierra de Carajas ascienden a unas  $2.4 \times 10^9$  t (Singer, 1979). Cabe resaltar que en Sudamérica los yacimientos de Fhb son de gran magnitud en Venezuela (Arqueano tipo Algoma) y en Brasil (Proterozoico tipo Superior).

Estos yacimientos son de gran importancia para Colombia debido a su proximidad y ambiente geológico, ya que los de Venezuela se encuentran en el Escudo de Guyana, que aflora en Colombia. Por ello, se realizará una breve descripción de dicho yacimiento.

2.2.1.4. Yacimientos tipo Algoma en Venezuela

En Venezuela los yacimientos de mineral de hierro de interés económico se encuentran ubicados en la región de Guyana, entre los estados de Bolívar y el Delta de Amacuro, en el área denominada distrito ferrífero de Guyana, con un ancho aproximado de 120 km y 450 km de largo, al sur de la confluencia de los ríos Orinoco y Caroní (Asimet, 2005) (figura 5).

Geológicamente, los yacimientos de Fhb de Venezuela se encuentran al norte del Escudo de Guyana, en la provincia de Imatacá (Formación Imatacá), cuyas rocas tienen edades de 3600 a 2400 Ma (Arqueano) y están constituidas por metasedimentos, neises, anfibolitas, migmatitas, esquistos, esquistos anfibólicos, cuarcitas y cuarcitas ferruginosas (formaciones de hierro).

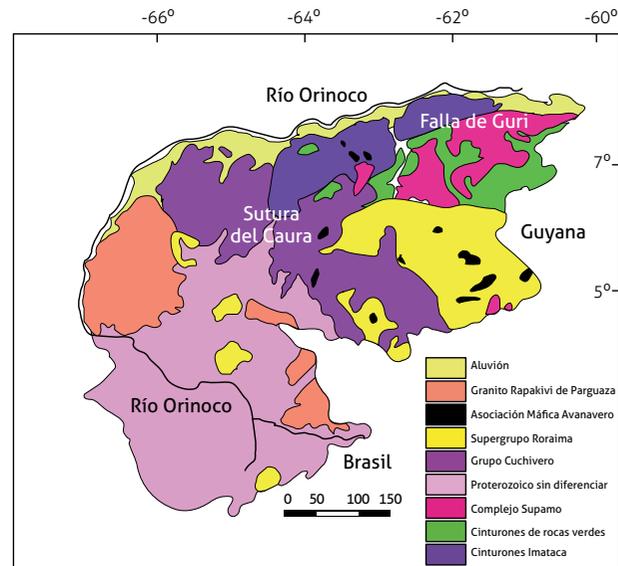


Figura 5. Ubicación de las provincias Precámbricas en el escudo de Guyana, Venezuela

Fuente: Linares y Arraiz (2015)

Se han reportado reservas probadas de 3644 billones de toneladas (> 55 % Fe total), reservas probables de 3223

billones de toneladas y reservas posibles de 8711 billones de toneladas (Bravo, 2013).

Existen básicamente dos tipos de menas: las de corteza o costra con espesores de 1 a 50 m, ocasionalmente 100 m, y las friables y finas (Asimet, 2005b). Los principales yacimientos están localizados en el cuadrilátero de Bolívar, donde se encuentran los yacimientos de Cerro Bolívar, Las Pailas, Altamira, Grupo Redondo, Toribio, Arimagua, Cerro Frontera, distrito de San Isidro, con las minas de San Isidro, Los Barrancos, San Joaquín y María Luisa.

El yacimiento de Cerro Bolívar es una colina de 11 x 5 km; posee dos tipos de mena: mena de costra compuesta por granos de hematita, segmentados por goethita, y menas friables, que corresponden a agregados porosos de granos de hematita y goethita (Asimet, 2005b).

El distrito ferrífero de San Isidro, conformado por concentración residual de óxidos e hidróxidos de hierro, con menas de costra y finas, tiene reservas totales de alto tenor de 524 millones de toneladas, distribuidas en 348 millones en San Isidro, 38 en Los Barrancos, 38 en Las Pailas y 100 en San Joaquín.

La composición promedio de las menas de alto tenor, mayor del 55 %, es la siguiente:

- Fe: 64 %
- SiO<sub>2</sub>: 3.10 %
- Al: 1.75 %
- Desde unas ppm al 3.6 %

Venezuela, por intermedio de las empresas Corporación Venezolana de Guyana y Ferrominera Orinoco, explota y produce finos, gruesos y *pelets* para la industria nacional y para la exportación (Asimet, 2005b). Con base en las reservas totales de depósitos probables y posibles, tiene alrededor de 1.7 millones de toneladas que pueden suplir la demanda futura del metal por más de un siglo.

#### 2.2.1.5. Yacimientos tipo Superior en Brasil

En Brasil existen dos áreas con Fhb: una al sur, en el estado de Minas Gerais, denominada Cuadrante de Fierro Minas Gerais, y otra al norte, en el estado de Carajas, en Marabó y São Félix do Xingu (figura 6). Las reservas de las dos áreas están estimadas en 50 billones de toneladas, con un promedio del 53 % de hierro; por mezclas y beneficio ascienden a un 65%.

*Yacimiento de Carajas.* Forma parte del sistema norte de hierro de Brasil, situado en el estado de Pará en Marabó y São Félix do Xingu; cuenta con instalaciones portuarias en

Ponta de Madeira, a 9 km de São Luís en el océano Atlántico, y con un sistema ferroviario de trocha ancha para el transporte del mineral (Asimet, 2005a).



**Figura 6.** Localización geográfica de las Fhb en Brasil

1. Depósito de Carajas. 2. Cuadrante ferrífero de Minas Gerais.

Fuente: Arndt y Ganino (2012)

El proyecto Carajas tardó siete años en implementarse (1980-1987), durante los cuales los niveles de capacidad de producción fueron variando de 15 millones de toneladas/año en 1986, a 25 millones de toneladas/año en 1987 y a 200 millones de toneladas/año en el 2000 (Asimet, 2005a).

Los yacimientos de Carajas se encuentran en el Proterozoico temprano, asociados a filitas, esquistos micáceos, cuarcitas, areniscas cuarcíticas, calizas, dolomitas de la Formación Carajas, del grupo Grao Pará. En el área también aflora la Formación Parauapebas, compuesta por rocas volcánicas básicas, de color verduzco y flujos porfídicos.

Las reservas estimadas en la mina de Carajas son 16 billones de toneladas, con un contenido promedio del 66.5 % de Fe; del 1.0 % de SiO<sub>2</sub>; del 1.4 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y del 1.1 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Las mineralizaciones han sido divididas en duras, semiduras, molidas, blandas y canga (Guilbert y Park, 1985). A finales del 2012 contaba con cerca de 7270 m de reservas probadas y probables (Barbosa, 2015).

El término canga corresponde a una brecha conglomerática con alto contenido de hierro, con fragmentos de

hematita, itabirita, cemento limonítico o hematítico y otros constituyentes lateríticos, con alto contenido de aluminio y fósforo, con espesores hasta de 400 m.

*Yacimientos de Minas Gerais.* Los yacimientos de Minas Gerais están ubicados en el estado de Belo Horizonte, y se denominaron Cuadrante de Hierro de Minas Gerais, con reservas estimadas aproximadamente en 14 billones de toneladas, con un contenido promedio del 56 % de hierro y por métodos de beneficio llegan al 65 % (Asimet, 2005a). Los principales minerales son hematita, limonita e itabirita (Guilbert y Park, 1986).

En el cuadrante se encuentran las minas Alegría, Morro Agudo, Carrego de Meia, Andrade, Congonhas, Feijao, Pico e Itabirita Mutuca, las cuales transportan el mineral de hierro por ferrocarriles de trocha ancha hasta el puerto de Tubarao en Victoria, estado de Espírito Santo, en el cual operan seis plantas de pelletización, algunas en *joint venture* con compañías italianas, españolas, coreanas y japonesas.

Las reservas geológicas y proyecciones de producción de las principales minas del estado de Minas Gerais se observan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Reservas geológicas y proyecciones de producción de minas en Minas Gerais

Mina	Reservas geológicas (t)	Proyección/producción (t)
Tamandua	327 millones	2012: 14 millones
Capitao de Mato	154 millones	2007: 9 millones
Capao Xavier	169 millones	2008: 6.5 millones
Las Minas	1 billón	
Pico	550 millones	

Fuente: modificada de Asimet (2005a)

Las minas del cuadrante poseen plantas de beneficio con procesos de trituración, apantallamiento, hidroclasificado, ciclamiento y filtrado, y producen principalmente hierro en bruto de alto grado, *pelets* y *sínter*, utilizando procesos de reducción directa, altos hornos, plantas de producción de *sínter* y *pelets* finos (Asimet, 2005a).

La compañía Samarco Mineração S. A. produce *pelets* para alto horno y envía su producción a plantas en el Medio Oriente, el Caribe, el Sudeste Asiático y Canadá, y *pelets* concentrados a plantas de Holanda y Japón.

La mina de fábrica cerca de Congonhas y Feijao, en las inmediaciones de Belo Horizonte, dirige su producción de mineral de hierro al mercado por el puerto de Tubarao, de tal forma que el 60 % va a Alemania y el resto a

Europa, Norteamérica, Asia, el Caribe y el Medio Oriente. La mina Columba produce hierro por reducción directa, enviándolo con destino a Argentina, a través del río Paraná (Asimet, 2005a).

Brasil y Colombia, durante las décadas del ochenta y del noventa, efectuaron estudios de factibilidad para el intercambio de hierro por carbón coquizable, sin que hasta el momento se hayan concretado convenios.

#### 2.2.1.6. Estratos de hierro (ironstones) (Eh)

Los estratos de hierro Eh se presentan en forma de capas sedimentarias intercaladas con diferentes tipos litológicos de origen marino a continental, como lutitas, arenitas y calizas. Los Eh son más jóvenes que las Fhb y se conocen depósitos del Ordoviciano y Siluriano en Estados Unidos; Jurásicos en Inglaterra, Lorena (Francia) y norte de Alemania, y Terciarios en Colombia y Venezuela. La mineralogía de las Eh corresponde a goethita, hematita, siderita, chamosita y, en menor proporción, pirita, glorita y magnetita.

El contenido de hierro en los Eh en Estados Unidos va del 35 al 38 % en áreas sin enriquecimiento, y del 50 al 60 % en áreas enriquecidas secundariamente. En Europa, en Lorena, va del 30 al 35 %; en Colombia, en Paz de Río, llega al 45 %.

El origen de los Eh no está claramente definido; sin embargo, numerosos autores se han adherido al concepto clásico (por ejemplo, Bierg y Karrenberg, 1942; Correns, 1946, citados en Wopfner y Schwarzbach, 1976), según el cual se postula que el hierro derivado de áreas terrestres lateríticas fue erodado y transportado por ríos, en parte como soluciones meteorizantes, pero principalmente en estado coloidal y en forma de absorción.

El hierro transportado en esta forma hacia la cuenca se deposita en regiones de áreas marinas poco profundas, a cierta distancia de la costa, aproximadamente en la zona de contacto entre arenas y lodos. Según Wopfner y Schwarzbach (1976) el clima parece desempeñar un papel importante en la génesis de los Eh, si se tienen en cuenta los procesos penecontemporáneos de la formación de lateritas, erosión y depósitos en climas áridos a templados. Este concepto parece corroborado en los trabajos de Klemic, James y Eberlein (1973), y Taylor (1969, citado en Lemoalle y Dupont, 1973).

Los Eh parecen corresponder a una sedimentación química que, por acción del transporte y las olas, origina formas químicamente muy heterogéneas de limonita (hematita, chamosita) y siderita, principalmente (Klemic, James y Eberlein, 1973).

El tamaño de los yacimientos de Eh es menor que las Fhb y el espesor de los mantos es de pocos metros, de

1.50 a 9 m en Estados Unidos; de 0.10 a 7.50 m en Lorena (Francia) y de 0.40 a 7 m en Paz de Río (Colombia). La textura de los Eh es generalmente oolítica y se distinguen dos tipos: Clinton y Minet; los primeros en Estados Unidos y los segundos en Alsacia y Lorena, en Francia.

#### 2.2.1.7. Yacimientos de Clinton en Estados Unidos

Los yacimientos Eh en Clinton, Estados Unidos, corresponden a cuatro mantos de hierro oolítico de 1.50 a 9 m de espesor, de los cuales dos han sido explotados. Se han diferenciado dos tipos de yacimiento: uno duro de depósitos enriquecidos con un contenido del 36 % y uno blando que no se encuentra en superficie, y corresponde a una concentración residual del primero con un contenido de hierro del 50 al 60 %.

Los oolitos tienen un núcleo de cuarzo recubierto por capas sucesivas de óxidos de hierro. Las reservas del yacimiento están calculadas en 1900 millones de toneladas y le siguen en importancia a los yacimientos de Fhb en el Lago Superior (Garcés, 1995).

#### 2.2.1.8. Depósitos de Lorena (Francia)

Estos depósitos corresponden a limolitas oolíticas intercaladas con areniscas y lutitas negras con espesores entre 0.10 a 7 m; los estratos son lenticulares y su contenido de hierro es del 30 al 35 %; fósforo del 1 %; sílice del 7 al 20 %, y CaO del 5 al 12 %. Los oolitos ferruginosos están constituidos por capas concéntricas de limonita, siderita, chamosita y, a veces, hematita, con una matriz lodosa, chamosita o siderita (Garcés, 1995). Actualmente estas minas se encuentran inactivas.

#### 2.2.1.9. Depósitos de placer en playas marinas

Los depósitos de placer en playas marinas por lo general reciben sedimentos de rocas metamórficas antiguas que han sufrido alteración por meteorización; posteriormente, al ser denudadas, transportan siderita, ilmenita y magnetita. Las playas que reciben estos sedimentos son muy estables durante la depositación y la preservación del depósito. Estos depósitos corresponden al Holoceno, pero puede haber en otras edades.

Los depósitos se presentan en areniscas de grano fino recubriendo playas marinas; dichos yacimientos están compuestos por ilmenita, circón y, en menor proporción, monacita, magnetita, piroxeno, anfíbol y cuarzo, que por lo general es mayor que el feldespato.

Para que los depósitos de playa sean económicamente explotables se deben tener en cuenta factores como el contenido de minerales pesados concentrados por procesos de enriquecimiento por lixiviación, el tamaño del depósito y la infraestructura de transporte.

Los depósitos de placer en playas tienen gran importancia para la producción de titanio, y de hierro como subproducto. Cabe resaltar que estos depósitos son explotados en Australia, India, Brasil y Florida (Estados Unidos) (Cox y Singer, 1992).

#### 2.2.2. Depósitos de hierro relacionados con magmatismo

Los depósitos de hierro relacionados con actividad ígnea corresponden a masas de hierro que se forman durante las diferentes fases de cristalización de un magma, ya sea máfico, intermedio o ácido, y que se hospedan en diferentes tipos de roca, en forma de láminas delgadas, láminas gruesas, masas irregulares, lentes, lopolitos, diques y cavidades.

En las primeras etapas de consolidación de un magma el hierro es parte de los minerales formados tempranamente, como la ilmenita, fijándose en las partes profundas del cuerpo principal. Otra porción de hierro hace parte de fluidos densos, acuosos y líquidos que se consolidan en diferentes tipos de roca, llegando a constituir depósitos de segregación magmática e hidrotermal.

Los depósitos de hierro relacionados con actividad ígnea solo representan entre el 1 y el 2 % de la producción mundial (Guilbert y Park, 1985); sin embargo, han sido de gran importancia para el desarrollo económico e industrial de los países que los han explotado, como Suecia, Chile, Filipinas, México, Estados Unidos y la antigua Unión Soviética.

Este tipo de depósito, teniendo en cuenta sus diferentes fases de magmatismo, ha sido subdividido en segregación magmática e hidrotermales (Guilbert y Park, 1986).

##### 2.2.2.1. Depósitos de segregación magmática

Los depósitos de segregación magmática se forman como intrusivos o como extrusivos volcánicos. Contienen entre el 4 y el 5 % de fósforo, y se distinguen entre sí porque en unos la magnetita queda muy bien definida en las rocas encajantes y en otros esta se encuentra asociada a tobas, andesitas y latitas, que indican vulcanismo extrusivo.

Los depósitos de hierro de tipo intrusivo no son muy comunes, pero se pueden citar los de Pea Ridge y Iron Mountain de Missouri, en Estados Unidos (Guilbert y Park, 1985); Graengesberg en Suecia, y Larag en Filipinas. Los de origen volcánico también son poco comunes; entre estos se encuentran El Lago en Chile, Cerro Mercado en México y Iron Mountain en Estados Unidos.

Aunque los depósitos de Pea Ridge y Savage River en Tanzania fueron descritos como intrusivos, a raíz de nuevos estudios parece que corresponden a eventos volcáni-

cos. El más importante descrito como intrusivo es Kiruma en Suecia, el cual parece que puede ser mixto, es decir, intrusivo y volcánico.

*Yacimiento de Kiruma.* El yacimiento mejor conocido y productivo del mundo ha sido estudiado por numerosos geólogos desde 1907. La gran mayoría lo ha descrito como de segregación magmática (Geijer, 1919; Frietsgh, 1973; Parak, 1975) citado en Guilbert y Park, 1985.

El distrito de Kiruma contiene numerosos depósitos de hierro; el más grande corresponde a Kiirunavaara, que es un *sill* intruido en rocas del Precámbrico, sienitas porfídicas y pórfidos cuarzosos. El yacimiento tiene 5 km de largo, 90 m de espesor y más de 900 m de profundidad. El promedio de hierro es del 62 % y ha sido explotado desde 1903. El yacimiento contiene magnetita de grano fino, algo de hematita, cantidad variable de fluroapatito y un alto contenido de fósforo, mayor del 2 %; también contiene actinolita y diópsido.

Se ha aceptado el origen del yacimiento de Kiruma como consecuencia de la segregación magmática a profundidad y luego inyecciones de magnetita líquida (Fischer's, 1950; Geijer, 1967; Philpotts, 1967; Frietsch 1968) citado en Guilbert y Park, 1985). Otros geólogos consideran que el origen es volcánico sedimentario y exhalativo, como Parak (1975), quien afirma que la sienita porfídica y el cuarzo porfídico, por un lado, y la magnetita y apatita masiva, por otro, fueron materiales extrusivos. En general, parece que los yacimientos de Kiruma obedecen a mecanismos de segregación magmática intrusiva en unos casos y, en otros, a fenómenos volcánicos.

#### 2.2.2.2. Depósitos hidrotermales

Los depósitos hidrotermales asociados a plutonismo calco-alcalino corresponden a las últimas etapas de la cristalización de un magma. De este tipo se han encontrado en muchas localidades, como Cornwall en Pensilvania, Estados Unidos; Romeral y El Tofo en Chile; Marcona y Acarí en Perú; en los Urales, Rusia; Centroamérica; Australia y Japón (Guilbert y Park, 1985).

Estos depósitos han recibido varias denominaciones: depósitos de relleno de cavidades, reemplazo metasomático, *skarn*, dependiendo de los materiales y los conductos que atraviesen, por ejemplo, brechas, diaclasas, cavernas y rocas calcáreas. Estos depósitos están controlados estratigráfica y estructuralmente; se acumulan en las proximidades de contacto entre intrusivos con diferentes tipos de roca, en zonas de fracturas, principalmente en lugares con rocas calcáreas. Los depósitos hidrotermales presentan

diferentes formas: estratiformes, lenticulares, venas masivas, zonas irregulares, principalmente en zonas de contacto del intrusivo.

*Depósitos de Romeral, Chile.* El depósito ha sido estudiado por varios geólogos chilenos. Se encuentra emplazado en el *stock* diorítico de Romeral, como una masa de magnetita elongada en sentido Norte-Sur. El cuerpo es lenticular y tiene 850 m de longitud, 258 m de ancho y 400 m de profundidad (Guilbert y Park, 1985). La magnetita contiene el 72 % de hierro y presenta pequeñas intercalaciones de actinolita, así como discontinuas venillas de apatito, calcita, clorita, andesita y otros minerales de ganga.

Las rocas metasedimentarias del Paleozoico-Mesozoico y volcánicas del Jurásico fueron intruidas y metamorfoseadas por el *Stock* Diorítico de Romeral, produciendo excelentes ejemplos equivalentes de *skarn* en rocas carbonatadas donde los fluidos son expulsados cuando el magma ha sido consolidado.

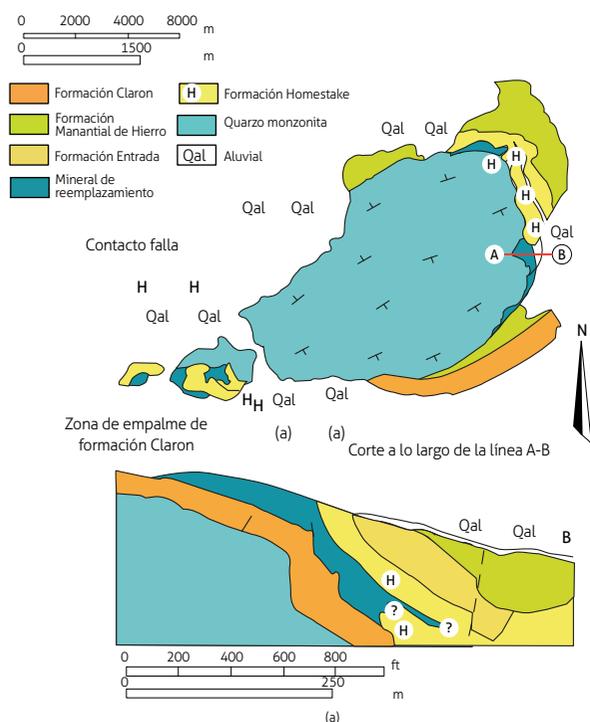
Magnetita, clinozoisita, plagioclasa, diópsido, granate, cordierita, esfena y clorita se desarrollaron en fases anhídricas; actinolita, escapolita, turmalina, clorita, epidota, micas y arcillas se originan en zonas hídricas.

Los minerales metamórficos que acompañaron a los cuerpos de magnetita indican que esta se ensambló a temperaturas entre 475 y 550 °C y a 22 kilobares (7 km de profundidad). El emplazamiento de la magnetita fue hidrotermal metasomático con efectos metamórficos (Bookstron, 1977, citado en Guilbert y Park, 1985); asimismo, el plutón de Romeral intruyó rocas Paleozoicas-Mesozoicas, las metamorfoseó y posteriormente mineralizó hidrotermalmente las rocas encajantes. La mayor parte del hierro puede ocurrir por enriquecimiento de volátiles de un magma residual.

*Iron Spring, Utah.* Los depósitos del distrito de Iron Spring, Utah, corresponden a los lacolitos Iron Mountain, Granito Mountain e Iron Parks que intruyeron la Formación Homestake. Los tres granitos contienen principalmente cuarzomonzonita y granodiorita porfídica de grano fino.

Vale la pena resaltar que en los bordes de los lacolitos se presentan tres zonas: interior, periférica y de diaclasas (Mackin, 1947 citado en Guilbert y Park, 1986). El mecanismo de emplazamiento de la magnetita parece que ocurrió en soluciones hidrotermales en los estados tardíos de la actividad ígnea. Antes de que el interior del lacolito fuera completamente cristalizado, las zonas periféricas y el techo del lacolito sufrieron agrietamiento por tensión, produciendo diaclasas. Las zonas de brecha y diaclasas (figura 7) sirvieron posteriormente de conductos de los fluidos

ascendentes y formaron depósitos por reemplazamiento, en las áreas donde las calizas cubrían el lacolito (Mackin, 1947, citado en Guilbert y Park, 1985). Estos depósitos pueden considerarse hidrotermales y por reemplazo, ya que ocurren los dos mecanismos. En Gran Bretaña la producción de hierro en la década del cincuenta dependió principalmente de la minería de depósitos de *skarn*. Actualmente, en Punpkin Hollow, Nevada (Estados Unidos), se encuentra un depósito de *skarn* magnetítico hospedado en rocas triásicas.



**Figura 7.** Mapa geológico y corte geológico del lacolito granítico Mountain, Utah

Fuente: modificada de Mackin (1947)

### 2.3. Métodos de prospección

Como en otros minerales, los estudios deben realizarse en las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada. En la etapa de *reconocimiento* se identifican las áreas con potencial de mineralización, a partir de los resultados de los estudios geológicos regionales, que incluyen comprobación de la foteointerpretación, ejecutando cartografía aérea de anomalías de color y la inspección preliminar de campo. También se ejecutan otros trabajos regionales, por ejemplo estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La *prospección* se realiza con el propósito de identificar el depósito posible blanco para la exploración, mediante

trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques), y perforaciones aisladas para medir el comportamiento de la mineralización en la profundidad. Se ejecutan trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos, electromagnéticos y geoelectrónicos preferentemente. Se deberán obtener, con carácter preliminar, las dimensiones y la morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calcularán recursos inferidos que deben utilizarse en un estudio conceptual, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

La *exploración general* permite la delineación más confiable de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreos superficiales de afloramientos, trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos magnéticos, electromagnéticos y geoelectrónicos más detallados, así como la realización de apiques y perforaciones, los cuales conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delinearán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. Se realizarán los estudios metalúrgicos preliminares, así como los estudios de prefactibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la continuación hacia la etapa detallada siguiente. Se calcularán recursos indicados e inferidos y reservas probables.

Para los depósitos extremadamente complejos hasta aquí llega la investigación, ya que la decisión que se toma es abandonar o continuar con la explotación e investigación simultáneas.

La *exploración detallada* permite la delineación tridimensional detallada de los depósitos, mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes, tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y el beneficio mineral. Se realizarán los estudios metalúrgicos a escala industrial necesarios en esta etapa y se llevarán a cabo los estudios de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán recursos medidos, indicados e inferidos, así como reservas probadas y probables.

Según el tipo de yacimiento, es posible emplear además las siguientes guías geoquímicas (Gross, Gower y Lefebvre, 1996):

- En depósitos magmáticos se utilizan: titanio, hierro, vanadio, cromo, níquel, cobre y cobalto.
- En depósitos de formaciones de hierro bandeado tipo Algoma se emplean valores altos de hierro, manganeso, níquel, oro, plata, cobre, zinc, plomo, estaño, wolframio y otros elementos menores.
- En los depósitos tipo *skarn*, por lo general enriquecidos en calcio, y hierro, se presentan valores altos en hierro, cobre, cobalto, oro, níquel, arsénico y selenio.
- En los depósitos de placer se emplean las concentraciones de oro, arsénico, hierro, estaño, titanio y circonio.

#### 2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

Los métodos de explotación para los yacimientos de hierro dependen del tipo de depósito: si son estratiformes, filonianos, isométricos o columnares. En los yacimientos sedimentarios se tiene en cuenta principalmente la inclinación de las capas y el estéril que los acompaña. En general, se emplean los métodos a cielo abierto para los yacimientos en los que las capas tienen poca inclinación y se extienden por grandes superficies, y subterráneos para el caso en que las capas se encuentran muy inclinadas.

En los yacimientos de hierro de origen magmático y metamórfico, por presentarse en masas y filones con diferentes inclinaciones y espesores, se emplean métodos subterráneos de cámaras y pilares por bloques y cámaras por subniveles.

Los métodos de beneficio del mineral de hierro, para que alcance las características físico-químicas o metalúrgicas para alimentar los altos hornos son: triturado, tamizado, mezcla, lavado, agitación, separación de medios pesados, espiral, separación magnética húmeda de alta intensidad y conos de Reichet.

La trituración consiste en darle al mineral un tamaño apropiado para ser cargado en el alto horno, con tamaños entre 6 y 30 mm de grano grueso; los finos de menos de 6 mm son generalmente aglomerados mediante sinterización, o a veces regraneados y peletizados.

En la mezcla los métodos más usados son los de apilamiento, los cuales consisten en el agrupamiento en capas de mineral, donde cada capa representa el mineral con características comunes, de tamaño y composición química. El mineral se retira mediante grúas, excavadoras, cargadores frontales y otros. El mineral retirado de las pilas resulta como una mezcla uniforme.

En el lavado se aprovechan la gravedad y el tamaño del mineral para separarlo de la ganga silicosa más fina y liviana, en forma de cuarzo y arcilla; luego se lleva a lava-

doras especialmente diseñadas que se encargan de agitarlo intensamente mediante paletas que en combinación con el flujo contrapuesto de agua remueven la sílice fina, dejando un producto residual muy rico en hierro.

La peletización se efectúa principalmente con minerales de bajo tenor para aumentar su contenido de hierro hasta el 60 % y para obtener un mineral homogéneo. Asimismo en la peletización se muelen los minerales pobres para obtener partículas finas de hematita o magnetita, se separan de la ganga por medios magnéticos y luego se aglomeran formando pequeñas bolas (*pellets*), con gran resistencia para ser utilizados directamente en los altos hornos.

Los productos que se obtienen a la salida del mineral de hierro de las minas (mineral crudo) se utilizan en forma de finos, conglomerados y concentrados (Lum Horn). El Lum Horn está constituido por mineral de tamaño superior a 6 mm de diámetro (1/4 de pulgada) (Garcés, 1995); por Sinter Food, mineral fino de tamaño superior a malla 100, y por Pellet Food, mineral a peletizar de tamaño menor a 100  $\mu$ m.

Los productos que se emplean en las plantas de beneficio se denominan gruesos o finos, según sea el tamaño mayor o menor de 6 mm. Según el contenido de P, los minerales de hierro se clasifican en tipo Bessemer, si contienen de 0 a 0.45 % de P, y tipo no Bessemer si contienen un mayor porcentaje (Garcés, 1995).

*Metalurgia.* El hierro, como producto utilizable, debe pasar de mineral de hierro a lingote o hierro esponja y, posteriormente, a hierro colado, hierro forjado o acero. El mineral de hierro se puede fundir con coque o gas, como elementos reductores y como combustibles, y se utiliza la caliza para la eliminación de sílice, alúmina y otras impurezas.

En la industria siderúrgica se emplean los procesos integrados y semintegrados. El sistema integrado o de sinterización tiene en cuenta la calidad del mineral de hierro, la reducción en el consumo de coque y la caliza. Por este sistema se aprovechan por aglomeración los finos del mineral de hierro, carbón y caliza.

La muestra constituida por el sinter, la caliza, el carbón y el hierro se carga en el alto horno, el cual funciona con el sistema de inyección de oxígeno y *fuel oil*, y por reacciones químicas se reduce el oxígeno del hierro y otras impurezas, obteniéndose el arrabio bruto y la escoria.

Al salir del alto horno el arrabio líquido se transporta a un mezclador y se vierte en convertidores donde se le adicionan cal y ferroaleaciones para eliminar impurezas y producir diferentes tipos de aceros. El acero líquido se vierte posteriormente para obtener lingotes de sección rectangular y cuadrada, para producir aceros planos y no planos.

En Colombia el proceso semintegrado lo utilizan: Grupo Diaco (Sidelpa), Sidemuña, Sideboyacá, Siderúrgica de Occidente, Sidenorte, Acasa y Acerías de Sogamoso. Dichas empresas funden la chatarra en hornos eléctricos, añadiéndole ferromanganeso, ferrosilíceo, ferromolibdeno y ferrosilicomanganeso para la obtención de diferentes clases de aceros, en especial barras redondas, platinas, varillas corrugadas, perfiles livianos, ángulos, cuadrados y alambro.

Las siderúrgicas semintegradas consumen chatarra y ferroaleaciones en su gran mayoría importadas. Parte del ferróniquel proviene de Cerro Matoso. Colombia no cuenta con infraestructura y tecnología para suplir toda su demanda, por lo cual es necesario importar productos semielaborados y elaborados.

### 2.5 Recursos, reservas y comercio

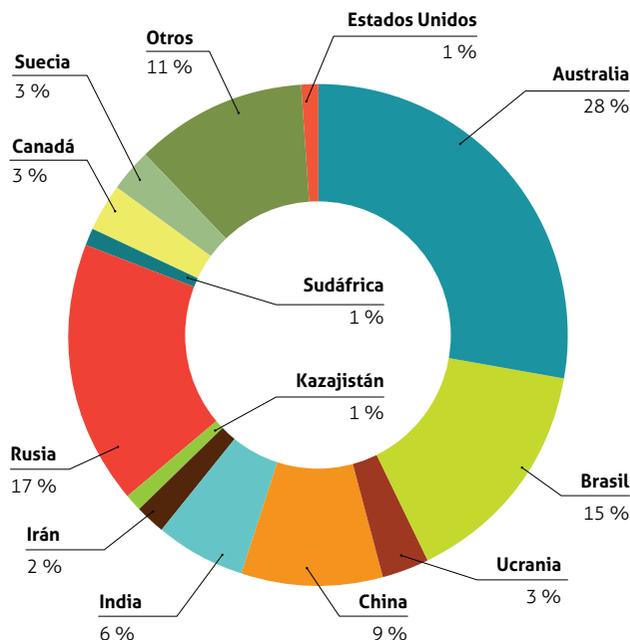
**Recursos, reservas.** Los recursos totales superan los 800 mil millones de toneladas de mineral de hierro, con un contenido de hierro mayor a los 230 mil millones de toneladas (USGS, 2017). Las reservas estimadas en el 2016 son de 170 mil millones de toneladas, con un contenido de hierro mayor a los 82000 mil millones de toneladas. En la tabla 3 se observa el comportamiento de las reservas durante los últimos 20 años; con este panorama y a los ritmos actuales de producción, estas reservas alcanzarían para más de 100 años.

**Tabla 3.** Comportamiento de las reservas entre 1996-2016

País	Reservas (millones de toneladas)				
	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	3800	2100	2100	2100	790
Australia	10000	11000	8900	17000	23000
Brasil	6500	4800	16000	16000	12000
Canadá	4600	1100	1100	2300	2300
China	3500	7800	7000	7200	7200
India	3300	1800	4200	4500	5200
Irán			1000	1400	1500
Kazajistán		4500	3300	1000	900
Mauritania	200	400	400	700	
México			400	400	
Rusia	12700	14000	14000	14000	14000
Sudáfrica	2500	650	650	650	770
Suecia	1600	2200	2200	2200	2200
Ucrania	8000	12000	9000	2100	2300
Venezuela			2400	2400	
Otros	25800	10000	6200	6000	9500
Total	82500	72350	78850	79950	81660

Fuente: USGS (2017)

Australia aporta aproximadamente el 30 % de las reservas, seguida de Rusia, Brasil y China; estos cuatro países representan el 67 % del total de reservas del mundo (figura 8).

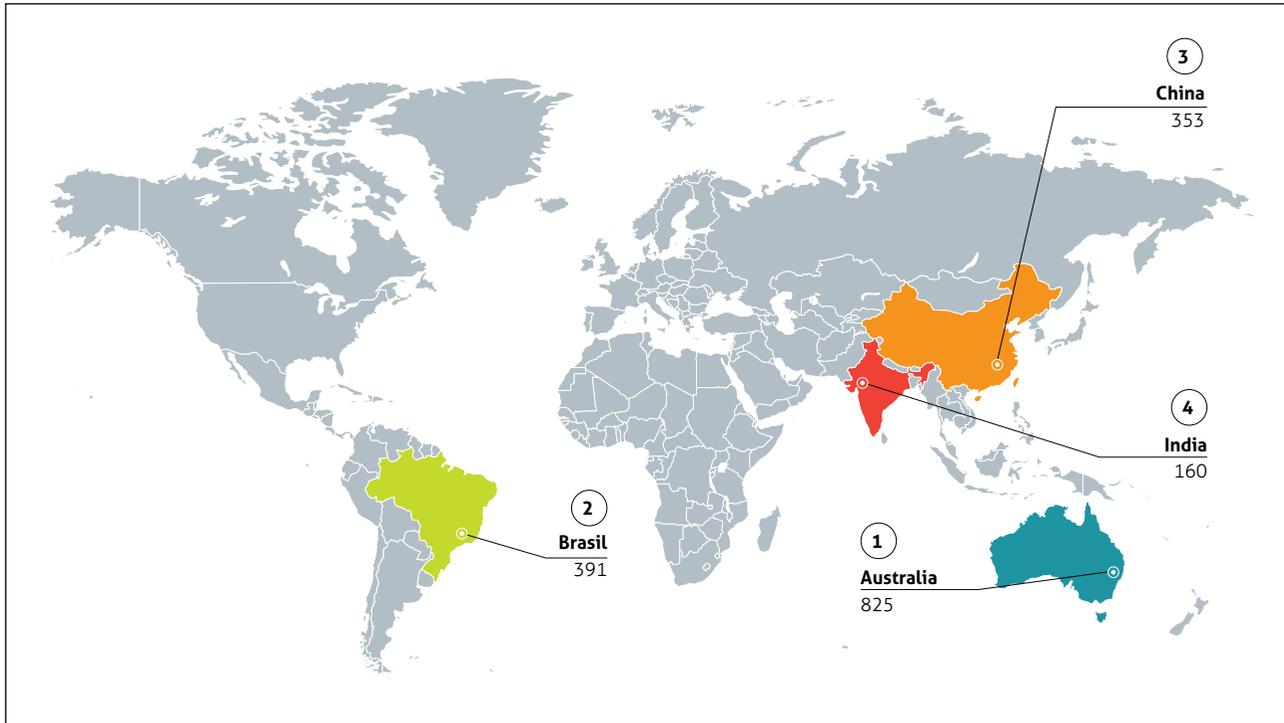


**Figura 8.** Participación en las reservas de mineral de hierro por país, 2016

Fuente: (USGS, 2017)

**Comercio.** Históricamente la industria del hierro ha estado vinculada a la demanda de productos de acero. En sus inicios, la industria siderúrgica mundial se desarrolló para satisfacer el consumo interno de los Estados, con bajos niveles de intercambio comercial y con un suministro muy cercano a fuentes de materias primas como el mineral de hierro y el coque.

Después de la Segunda Guerra Mundial, la demanda de mineral de hierro y otras materias primas generó en los países industrializados distintas estrategias de abastecimiento. A mediados de la década del noventa emerge China, con un vertiginoso crecimiento, provocando un profundo impacto en la industria mundial del acero y en el mercado mundial del mineral de hierro. En la figura 9 se observan los principales productores de hierro para el 2016.



**Figura 9.** Principales países productores de hierro  
 Datos en millones de toneladas

Fuente: USGS (2017)

En la tabla 4 se presenta la evolución de la producción mundial de mineral de hierro entre 1996 y el 2016 para los principales países productores. China se destaca por el gran crecimiento registrado en su producción, pues en este periodo de veinte años multiplicó por seis su producción. Adicionalmente, Australia y Brasil también muestran un incremento sostenido de sus producciones en este lapso.

En la actualidad, de acuerdo con la información preliminar del 2016, Australia aporta el 37 % de la producción mundial de mineral de hierro, seguida por Brasil con el 18 % y China con el 16 %, lo que significa que solamente tres países concentran el 70 % de la producción mundial (figura 10).

En relación con los precios del mineral de hierro, estos dependen en gran medida de la situación del mercado internacional del acero, destacándose su crecimiento de 25.6 a 99.4 USD\$/t en el periodo 2000-2011, para luego descender a 84.0 USD\$/t en el 2015, según los respectivos reportes anuales del United States Geological Survey (USGS).

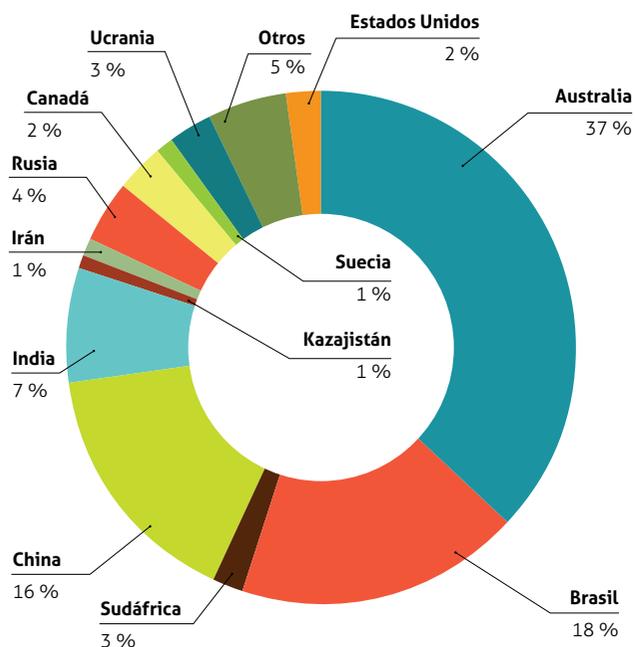
La producción mundial de acero tiene un comportamiento similar al del mineral de hierro, con un crecimiento sostenido como consecuencia del incremento de la demanda en diferentes países, dentro de los cuales se destaca China. La evolución de las producciones de arrabio y acero crudo entre los años 1996 y el 2016 se muestra en la tabla 5.

**Tabla 4.** Producción histórica de mineral de hierro, 1996-2016

País	Producción (millones toneladas)				
	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	60	60	54	54	41
Australia	143	160	270	480	825
Brasil	185	200	300	390	391
Canadá	38	35	33	37	48
China	250	220	520	1200	353
India	60	72	150	240	160
Irán			20	30	26
Kazajistán		15	15	24	21
Mauritania	12	10	11	11	
México			13	14	
Rusia	78	88	105	100	100
Sudáfrica	32	35	40	55	60
Suecia	22	20	24	25	25
Ucrania	45	55	73	80	58
Venezuela			20	16	
Otros	108	75	43	50	120
Total	1033	1045	1691	2806	2228

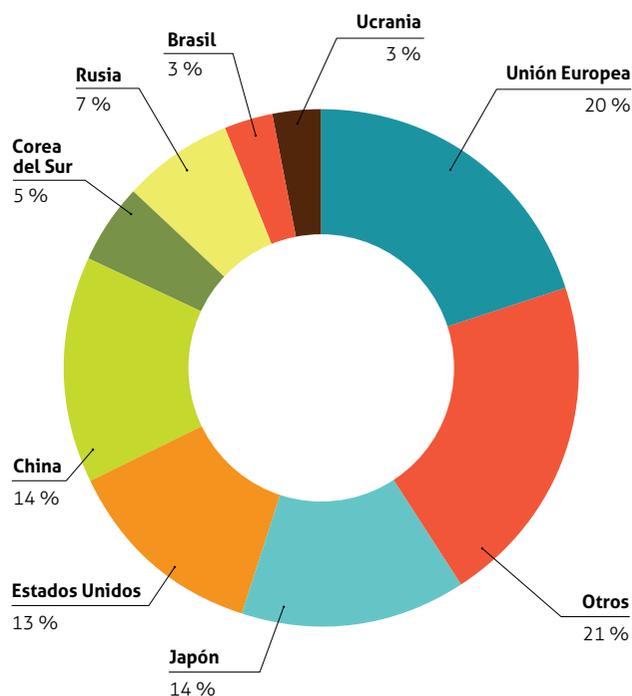
° estimada

Fuente: USGS (2017)



**Figura 10.** Participación por países en la producción mundial de mineral de hierro, 2016

Fuente: USGS (2017)



**Figura 11.** Participación por países en la producción mundial de acero crudo, 1996

Fuente: USGS (2017)

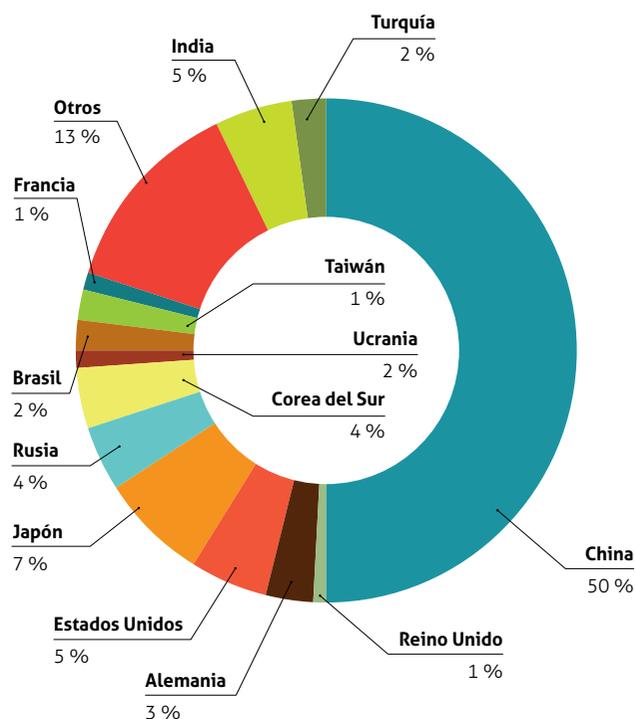
**Tabla 5.** Producción mundial de arrabio y acero crudo, 1996-2016

Año	Arrabio	Acero crudo
1996	508	726
2001	573	828
2006	858	1200
2011	1100	1500
2016	1150	1600

\* estimada; datos en millones de toneladas

Fuente: USGS (2017)

De acuerdo con estos registros, tanto la producción mundial de acero crudo como la de arrabio se ha duplicado en los últimos veinte años. La participación de los principales países productores de acero crudo ha variado sustancialmente entre 1996 y el 2016. En las figuras 11 y 12 se muestran los porcentajes de participación para los casos de 1996 (726 millones de toneladas) y el 2016 (1600 millones de toneladas), respectivamente. Llama la atención el incremento significativo que ha tenido China, pasando del 12 al 50%.



**Figura 12.** Participación por países en la producción mundial de acero crudo, 2016

Fuente: USGS (2017)

*Producción latinoamericana.* La producción de mineral de hierro y acero crudo en América Latina también ha evolucionado gradualmente, sin presentar grandes cambios en los últimos años. En la tabla 6 se muestra la evolución del mineral de hierro entre el 2005 y el 2015, y en la tabla 7 la de acero crudo entre el 2005 y el 2015. En ambos casos se destaca el papel preponderante de Brasil, que para el caso de mineral de hierro, en el 2015, representa el 90 % de la producción latinoamericana, seguido de Chile con el 3 %; y para el caso del acero crudo, en el 2015, Brasil representa el 59.1 % de la producción latinoamericana, seguido de México con el 32 %.

**Tabla 6.** Producción de mineral de hierro en América Latina por países, 2005-2015

País	Peso bruto		
	2006	2010	2015
Brasil	318619	372000	422547
Chile	7897	10490	15431
Colombia	644	77	366
México	9615	13998	14441
Perú	7566	8957	7321
Venezuela	22100	14331	8251
Total	366441	419853	468357

° estimada; datos en millones de toneladas

Fuente: World Steel Association (2016)

**Tabla 7.** Producción de acero crudo en América Latina por países, 2005-2015

País	2006	2010	2015
Brasil	30901	32948	33256
Chile	1607	1011	1112
Colombia	1211	1208	1211
México	16447	16870	18225
Perú	896	880	1082
Venezuela	4864	2207	1345
Total	55926	55124	56231

Datos en millones de toneladas

Fuente: World Steel Association (2016)

De acuerdo con el informe anual del 2016 del World Steel Association, la producción latinoamericana de acero crudo en el 2015 fue 63000000 t. Los principales productores fueron Brasil (59.1 %), México (32.4 %), Venezuela (2.3 %) y Chile (1.9 %), que representaron el 95 % de la producción.

El consumo de acero en América Latina (tabla 8) puede considerarse muy bajo, a excepción de Trinidad y Tobago, México, Chile, Venezuela, Argentina y Brasil, al

compararlo con los países europeos. El factor anterior debe ser tenido muy en cuenta en las políticas económicas del área si se quiere salir del estancamiento socioeconómico, ya que las industrias siderúrgica y metalmeccánica contribuyen en gran parte a generar trabajo y comodidades a los habitantes de los países en desarrollo.

**Tabla 8.** Consumo per-cápita de acero crudo en América Latina, 2006-2015

País	2006	2010	2015
Argentina	129.7	127.8	138
Brasil	108	146	113.8
Chile	107.2	160.9	179.1
Colombia	77.6	68.3	93.6
Costa Rica	116.3	124.1	201.6
Ecuador	90.1	97.4	123.2
México	228.8	174.1	227.1
Panamá	98.6	125.7	140.7
Perú	59.7	96.4	130.2
Trinidad y Tobago	413.6	257.5	248.8
Venezuela	145.8	96.1	73
Total	1575.4	1474.3	1669.1

Datos en kg

Fuente: World Steel Association (2016)

## 2.6. Perspectivas

El hierro y el acero han aumentado su producción de manera sostenida en las últimas décadas, impulsada por el consumo en China. Es así como en 1996 se produjeron 1000 millones de toneladas de conglomerados y aglomerados de hierro, y para el 2016 la producción alcanzó los 1500. La producción de acero creció de 750 millones de toneladas en 1996 a 1600 millones de toneladas en el 2016.

En la tabla 4 es posible apreciar el crecimiento sostenido de la producción de hierro y acero. Los principales productores son Estados Unidos, Australia, Brasil, Canadá, China, India y Estados Unidos, los cuales forman parte de los países más industrializados en el mundo. Las perspectivas para un futuro inmediato serán iguales, a no ser que se descubran nuevos yacimientos de gran magnitud, lo cual es poco probable debido a que estos ya han sido detectados por diferentes medios de exploración geológica.

En lo que respecta a América Latina, la producción de acero crudo se ha mantenido estable en la última década con una producción aproximada de 61000 millones de toneladas.

Los principales productores de concentrado y aglomerados son Brasil, Chile, Colombia y México; los principales productores de acero crudo son Argentina, Brasil, Chile, México y Venezuela, en este orden. Colombia se encuentra entre los países que producen acero de manera residual.

La tendencia constante de la producción latinoamericana contrasta con la tendencia del incremento mundial; la producción de hierro y acero ha aumentado desde el 2006 hasta la fecha.

### 3. Hierro en Colombia

La explotación de hierro en Colombia se remonta al siglo XIX, cuando el alemán Jacobo Wierner estableció en Pacho (Cundinamarca) una incipiente ferrería en 1823, la cual produjo pequeñas cantidades de hierro hasta la mitad de ese siglo.

Técnicos ingleses que trabajaron en Pacho fundaron y construyeron altos hornos rudimentarios en las localidades de Samacá (Boyacá) y La Pradera (Cundinamarca), produciendo pequeñas cantidades de hierro en las décadas del y el sesenta del siglo XIX.

En 1880, en el caserío de La Pradera, una compañía nacional montó un alto horno con capacidad de 8 t diarias, lo cual dio buenos resultados. Posteriormente la compañía se ensanchó y adquirió un alto horno importado de Inglaterra, con capacidad de 40 t diarias. La compañía nacional procesó mineral de hierro hasta las postrimerías del siglo XIX.

A principios del siglo XX se inició en Amagá (Antioquia) la metalurgia del hierro, aprovechando un pequeño yacimiento de mineral de hierro localizado en dicha población.

En 1923 se fundó la Compañía Colombo-Americana, la cual trató de aprovechar los yacimientos de La Calera (Cundinamarca), pero debido a la calidad y la cantidad de mineral de hierro la compañía fracasó.

En la década del cuarenta el señor Corradine fundó la Ferrería de Pacho (Cundinamarca), aprovechando los yacimientos de esta localidad y procesando además chatarra de hierro. La ferrería funcionó hasta principios de la década del ochenta.

La producción de hierro y acero en el país en forma industrial comenzó con la creación de la empresa Acerías de Paz del Río, la cual inició la producción de aceros en la década del cincuenta. Esta siderúrgica se abastece de los yacimientos de hierro oolítico descubiertos en 1942, el

carbón de Paz de Río (minas de La Chapa), Samacá y las calizas de Belencito.

Hasta hace pocos años la ferrería de Pacho y la compañía Colar (Cundinamarca) procesaron pequeñas cantidades de mineral de hierro proveniente de Pacho, Pericos y pequeños yacimientos en la región de El Guavio (Cundinamarca).

Las siderúrgicas Simesa y Fundiciones Técnica (Futec), de Medellín; Metalúrgica de Boyacá (Metalboyacá); Siderúrgica del Muña (Simuña); Metalúrgicas del Norte (Sidunor); Acerías Bogotá y Siderúrgica del Pacífico (Sidelpa), procesan chatarra de hierro y acero.

#### 3.1. Geología regional

En Colombia existen unidades litológicas con ambientes de depósito similares a los descritos de otras partes del mundo, en las Provincias Litosféricas Continental Mezoproterozoica Grenvilliana y Continental Proterozoica (Gómez *et al.*, 2006).

Las principales manifestaciones y yacimientos de hierro se encuentran en capas de hierro (*Iron Formation*) que se encuentran localizadas en la cordillera Oriental, en los departamentos de Boyacá y Casanare. Prospectos de hierro por segregación magmática se presentan principalmente en la Sierra Nevada de Santa Marta, Perijá y la cordillera Central; depósitos por reemplazo se hayan especialmente en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. En la región de escudo al suroriente de la población de Mitú se encuentra un prospecto de gran magnitud de capas de hierro bandeado.

#### 3.2. Geología local

Los yacimientos, los prospectos y las manifestaciones de hierro en Colombia se encuentran localizados en la cordillera Oriental, la Sierra Nevada de Santa Marta, la cordillera Central, y en la Amazonía en Mitú; de estas solamente está en explotación Paz de Río.

Teniendo en cuenta la génesis y el potencial de los yacimientos y los prospectos de hierro, estos se pueden clasificar en:

##### 3.2.1. Sedimentarios

En Colombia se conocen yacimientos y prospectos 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), y formaciones de hierro bandeado en la Amazonía colombiana y placeres de playas marinas (tablas 9-11 y figura 13).

**Tabla 9.** Depósitos de estratos de hierro en Colombia (Ironstone)

No.	Unidad geológica	Localidad	Autor
1	Terciario Superior	Mitú (entre el río Apaporis y Mitú)	Ulloa (1979)
2	Terciario de Paz del Río	Paz de Río, Boyacá. Mina Activa	Alvarado (1943), Hubach (1952), Mariño (1976)
3	Terciario Borde Llanero (Arenisca del Limbo)	Sabanalarga, Casanare	Camacho, Nigrinis y Ulloa (1972)
4	Formación Conejo y Urinaco	Cúcuta	

Fuente: Ulloa (1987)

**Tabla 10.** Hierro bandeado en Colombia

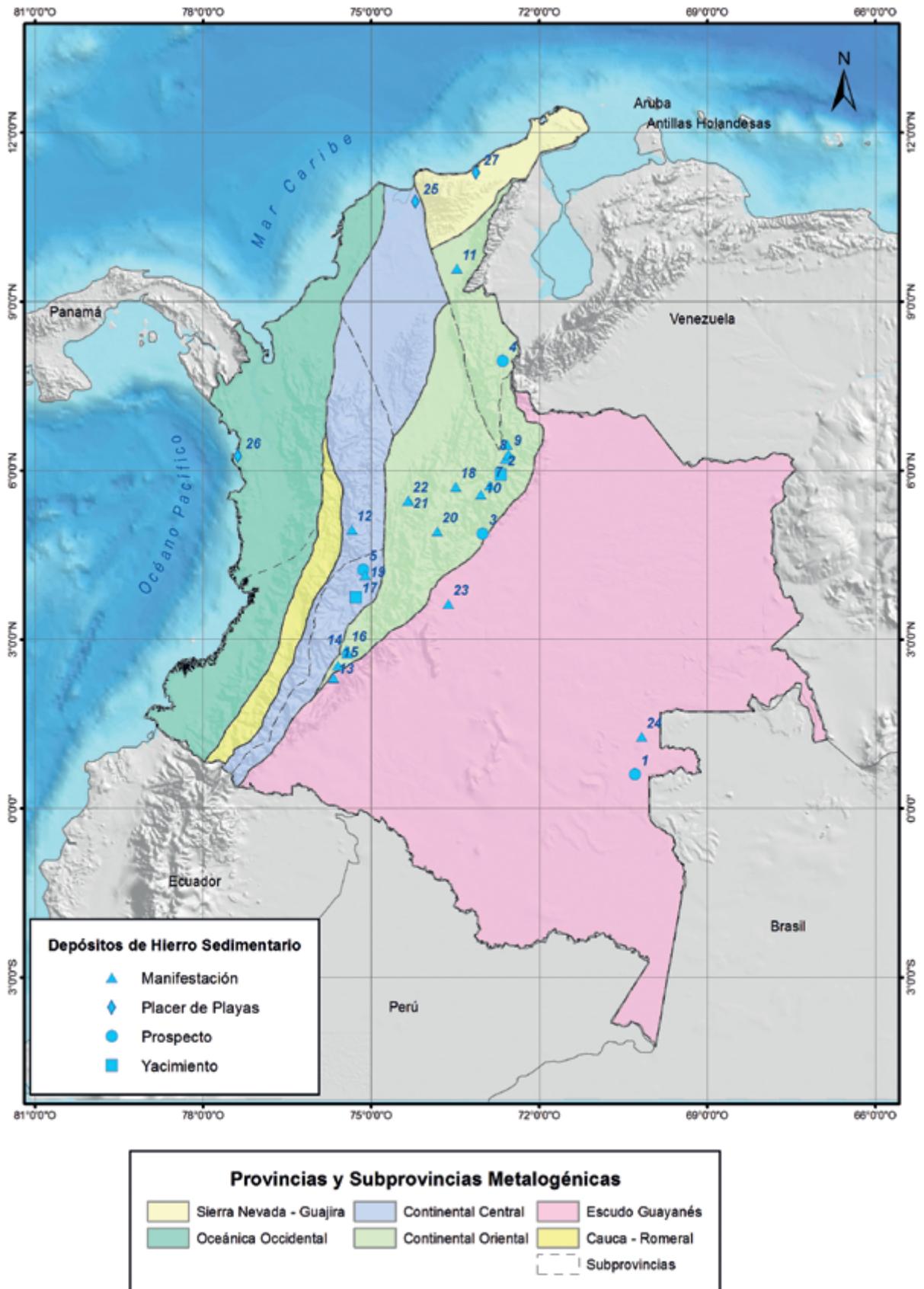
No.	Unidad geológica	Localidad	Autor
5	Cretáceo Valle del Magdalena	Valle de San Juan y San Luis (Tolima)	Buitrago (1975)
6	Terciario de Paz de Río (Arenisca de Socha)	Boavita, Boyacá	Mariño (1976)
7	Terciario de Paz De Río (Formación Concentración)	Belencito, Boyacá	Mariño (1976)
8	Terciario de Paz de Río	Jericó, Boyacá. Sativanorte, Boyacá.	Mariño (1976)
9	Terciario de Paz de Río	San Mateo, Boyacá	Mariño (1976)
10	Terciario de Paz De Río (Formación Concentración)	Pesca, Boyacá	Mariño (1976)
11	Cuaternario	Jagua de Ibirico, Cesar	Restrepo (1959)
12		Casablanca, Tolima	
13	Terciario Valle Alto Magdalena	Agrado, Huila	Buitrago (1975)
14	Terciario Valle Alto Magdalena	Palermo, Huila	Buitrago (1975)
15	Terciario Valle Alto Magdalena	Tesalia, Huila	Buitrago (1975)
16	Terciario Valle Alto Magdalena	Palermo, Huila	Buitrago (1975)
17	Cretáceo Valle del Magdalena	Coyaima, Tolima	Buenaventura (1975)
18	Formación Arcabuco	Villa de Leyva, Boyacá	Ujueta (1960)
19	Formación Gualanday	San Luis, Tolima	Buitrago (1975)
20	Formación Arenisca de Cacho	Guatavita, Cundinamarca	Hubach (1953)
21	Formación Paipa	Yacopí, Cundinamarca	Gil (1975)
22	Formación Paipa	Yacopí, Cundinamarca	Tchanz, Buenaventura y Jimeno (1970)
23	Aluvial	Meta, Río Guaviare	Vesga (1972)
24	Terciario Vaupés	Mitú	Galvis y Gomez (1998)

Fuente: Ulloa (1987)

**Tabla 11.** Placeres de playas marinas en Colombia.

No.	Unidad geológica	Localidad	Autor
25	Arenas de playa (Costa Atlántica)	Ciénaga y Galerazamba: Puerto Colombia (Magdalena, Atlántico)	Tchanz, Buenaventura y Jimeno (1970)
26	Arenas de playa (Costa Pacífica)	Bahía Solano	Galvis (comunicación verbal)
27	Arenas de playa (Costa Atlántica)	Quebrada del Hierro, parte norte de la Sierra Nevada de Santa Marta - Cartagena	Alfonso y González (1990)

Fuente: Ulloa (1987)



**Figura 13.** Depósitos de hierro sedimentario en Colombia (formaciones de hierro bandeado, capas de hierro y depósitos de playas marinas)  
Fuente: tabla 9, 10 y 11, tomado de (Ulloa, 1987); Salinas *et al.*, 1999).

3.2.1.1. Estratos de hierro (*Iron stones*)

En Colombia se han encontrado estratos de hierro oolítico (figura 14) en la cordillera Oriental, en Sabanalarga (Casanare), Paz de Río (Boyacá), Cúcuta (Norte de Santander), y en la Amazonía colombiana en Mitú (Vaupés).

Los estratos de hierro corresponden a areniscas cuarzosas con oolitos de hierro y se encuentran en las unidades litoestratigráficas del Terciario: Paz de Río, en las Formaciones Areniscas de Socha, Arcillas de Socha y Concentración; Sabanalarga, en la Formación Areniscas del Limbo; Cúcuta, en la Formación Conejo y Urinaco, y Mitú, en el Terciario Superior; De estas solamente las de las Formaciones Concentración (Paz de Río), Areniscas del Limbo (Sabalarga) y Terciario Superior (Mitú) presentan espesores mayores de 2 m, y se extienden por más de 12 km, en dirección del rumbo, con porcentajes mayores al 29 % de hierro. Solamente Paz de Río se puede considerar un yacimiento; las demás se clasifican como prospectos.

*Yacimiento de Paz de Río (Boyacá).* La región de Paz de Río está situada en la parte centrorientales de la cordillera Oriental de Colombia (figura 15), en el departamento de Boyacá, en el distrito minero de Paz de Río (UPME, 2005).

El yacimiento de hierro está localizado en el flanco oriental del sinclinal de Betétiva, afectado por las fallas regionales de cabalgamiento de Soapaga al occidente y de Betétiva al oriente. Las capas de la estructura presentan inclinaciones entre 10° y 70°.

Petrográficamente se ha observado que la parte inferior corresponde a una arenisca oolítica-ferruginosa y la parte media a superior a una arenisca oolítica, hematítica. En las secciones delgadas se observa una textura oolítica, con oolitos que van de redondos a elípticos que alcanzan 2 mm, y bandas concéntricas alrededor del núcleo. La matriz está constituida por siderita, clorita y minerales arcillosos, apatito e hierro microcristalino. Como minerales principales se encuentran hematita, goethita-limonita 70 %, siderita 20 %, glauconita 6 %, apatito y clorita 3.5 %.

La capa con hierro oolítico presenta variaciones químicas en sentido vertical y areal en varias localidades; sin embargo, el promedio obtenido en el sector de Buenos Aires-El Salitre, con base en 12 perforaciones (Reyes y Valentino de Reyes, 1976), es el siguiente: SiO<sub>2</sub>, 8.29 %; Fe, 47.28 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5.2 %; Mn, 2.23 %; P, 1.03 %; CaO, 1.76 %; Mg, 0.76 % y Si, 0.10 %. Este promedio puede considerarse representativo para el yacimiento.

De esta área existen varios estudios cartográficos, tectónicos y mineros, entre los cuales se pueden citar Sarmiento y Alvarado (1944); Restrepo (1975) y Ulloa (1979).

La capa de hierro oolítico se encuentra intercalada con arcillas en la base de la Formación Concentración, en el conjunto denominado Arcillas del Salitre (Reyes y Valentino de Reyes, 1976). La capa oolítica tiene espesores entre 4 y 7 m y se extiende en el sentido del rumbo por 25 km.

La glauconita se observa en granos redondeados distribuidas entre oolitos y dentro de estos el cuarzo en el núcleo, en algunos casos reemplazado por carbonato (Rodríguez *et al.*, 1979).

El yacimiento de Paz de Río cuenta con una buena infraestructura física, de tipo eléctrico, de comunicaciones (Internet, teléfono), de carreteras con buenas especificaciones y con una línea férrea para el transporte del mineral. En sus cercanías reposan yacimientos de caliza y carbones coquizables de muy buena calidad, factores que han contribuido favorablemente al desarrollo del yacimiento.

La minería actualmente se lleva a cabo de manera subterránea. La planta siderúrgica de Belencito se encuentra comunicada con la planta de acopio de Paz de Río por una línea férrea. La metalurgia se hace en altos hornos con capacidad superior a 500 t diarias; también cuenta con hornos eléctricos para la producción de aceros especiales.

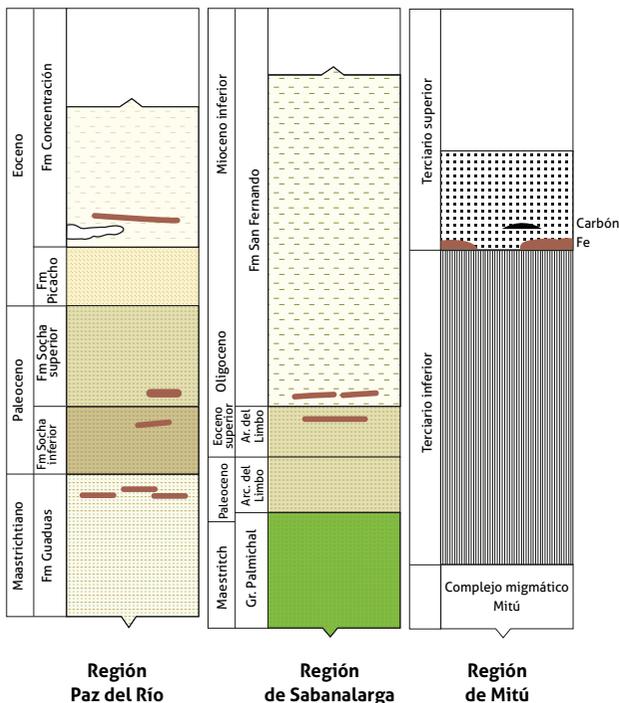
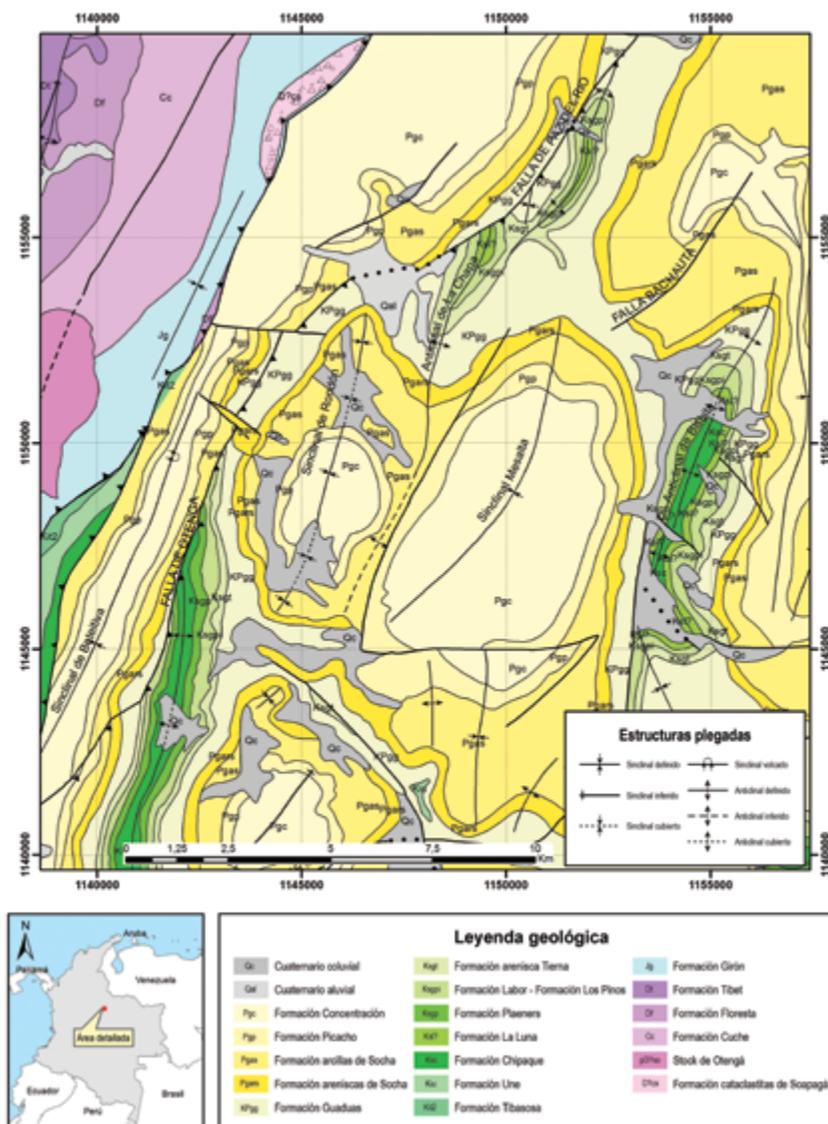


Figura 14. Columnas estratigráficas generalizadas de las áreas con estratos de hierro oolítico en Colombia

Fuente: modificada de Ulloa (1979)



**Figura 15.** Mapa geológico de la región de Paz de Río

Fuente: Ulloa *et al.* (1998)

Las reservas del yacimiento fueron calculadas en 300 millones de toneladas de mineral, de las cuales más de 100 millones en reservas probadas y probables (Reyes y Valentino de Reyes, 1976). En el 2001 se estimó en 31710 kt, con explotación de 690 kt por año (UPME, 2005).

*Prospecto de Sabanalarga (Casanare).* El prospecto de hierro oolítico se encuentra localizado en la parte centro-oriental de la cordillera Oriental de Colombia, en el municipio de Sabanalarga (Casanare), el cual se comunica con Bogotá mediante las vías Bogotá-Guateque-San Luis de Gaceno-Sabanalarga y Bogotá-Villavicencio-Sabanalarga.

En esta área se han realizado trabajos cartográficos, geológicos y de prospección; entre estos están los de Camacho, Nigrinis y Ulloa (1972) y Ulloa (1979).

En el área de Sabanalarga afloran las unidades Palmichal, del Cretáceo-Terciario, Arcillas del Limbo, Areniscas del Limbo y San Fernando, del Terciario (figura 16).

La capa de hierro oolítico se encuentra en la Formación Areniscas del Limbo, constituida por tres conjuntos: el inferior, de 120 m de areniscas conglomeráticas; el medio, de 27 m de arcillolitas, y el superior, de 17 m de areniscas cuarzosas. El estrato de hierro está ubicado unas veces al tope del nivel inferior y otras en el conjunto medio, con un espesor entre 2 y 3 m.

La capa de hierro se ha observado por unos 15 km, en el flanco del Anticlinal de Silbadero y en el flanco occidental del sinclinal de Botijero; sin embargo, solamente en el flanco occidental del Anticlinal de Silbadero presenta espesores entre 2 y 3 m, así como los mayores valores de hierro (figura 16).

Los análisis químicos de muestras de canal de 12 afloramientos tomados en el flanco occidental del Anticlinal del Silbadero dieron los siguientes promedios: Fe, 28.73 %; P, 0.6 %; SiO<sub>2</sub>, 44.32 %; MgO, 0.38 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3.72 %, y CaO, 1.68 % (Camacho, Nigrinis y Ulloa, 1972).

El promedio de Fe y Si de 12 muestras de pozos efectuados en el mismo flanco indican que el contenido de hierro es inferior al 30 % y la sílice mayor al 40 % (Camacho, Nigrinis y Ulloa, 1972). Se observa que al suprimir los 60 cm inferiores el promedio de Fe sube al 32 % y la sílice disminuye al 29 %.

Los análisis petrográficos de varias muestras indican que la capa con oolitos de hierro presenta textura oolítica con fragmentos subredondeados de cuarzo y oolíticos, y cemento chamosítico-siderítico. Como minerales principales se tienen: cuarzo (65 %), oolitos de hierro (20 %) y cemento ferruginoso (15 %). El cuarzo es de 0.65 a 1 mm subredondeado. Por otra parte, los oolitos redondeados se presentan en tamaños de 0.9 a 1.5 mm en capas concéntricas de limonita y chamosita de dos clases: la primera, dentro de los oolitos alterados a goethita, y la segunda, como parte del cemento diseminado y en minúsculos granos dentro de los oolitos.

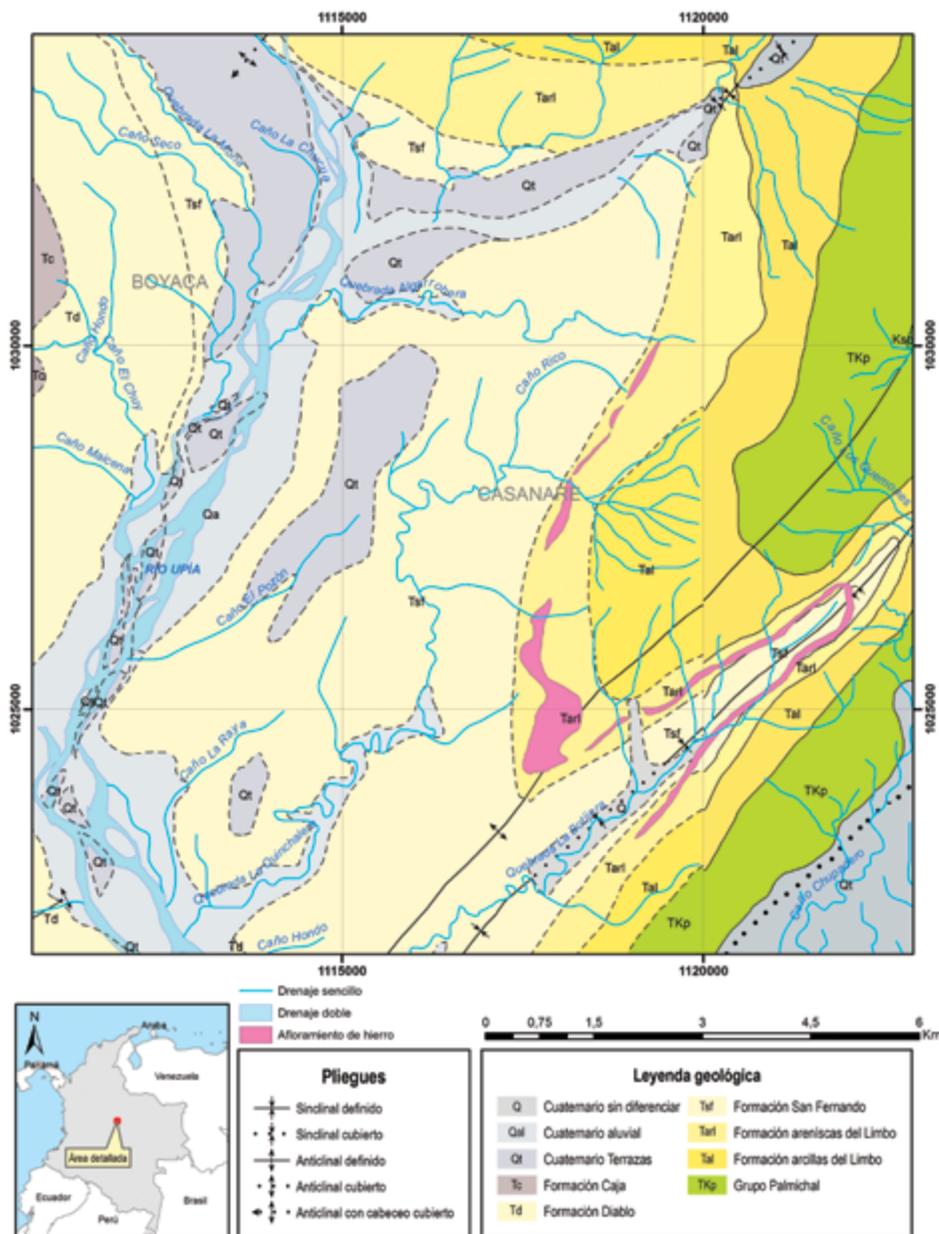


Figura 16. Mapa geológico de Sabanalarga

Fuente: Torres *et al.* (2013) y Camacho, *et al.* (1972)

Las reservas, teniendo en cuenta una extensión de 6.5 km, 300 m de ancho, un espesor de 3 m, una inclinación promedio de la capa de 40°, dio un estimativo de 25984000 t; si se toma solamente un espesor de 2 m, que son los de mayor contenido de hierro, las reservas serían de 17000000 t (Cruz, 1971).

El área cuenta con buena infraestructura eléctrica, de comunicaciones (teléfono, Internet) y de vías; sin embargo, no cuenta en sus cercanías con yacimientos de calizas ni carbones coquizables, como en el caso de Paz de Río.

En estudios recientes los análisis químicos de muestras de canal de cinco afloramientos, tomados en el flanco occidental del Anticinal del Silbadero, señalan promedios: Fe, 40.61 %; P, 1.96 %; SiO<sub>2</sub>, 34.89 %, y TiO<sub>2</sub>, 0.11 % (Gilart *et al.*, 2007).

*Prospecto de Mitú (Vaupés).* La región de Mitú está ubicada en la Amazonía colombiana en el Vaupés; se encuentra comunicada con los principales centros urbanos del país por vía aérea y con los poblados cercanos mediante vía fluvial. De esta área, y en relación con el hierro oolítico, solamente se conoce el trabajo de Galvis y Gómez (1998) y Ulloa (1979). En la región de Mitú afloran las unidades Complejo Migmatítico de Mitú, Formación Piroparaná y rocas sedimentarias del Terciario Superior (figura 17).

El Complejo Migmatítico de Mitú está compuesto por paraneis y cuarzós, ortoneis básico, rocas graníticas con variaciones de latita-diorita y metavolcánicas.

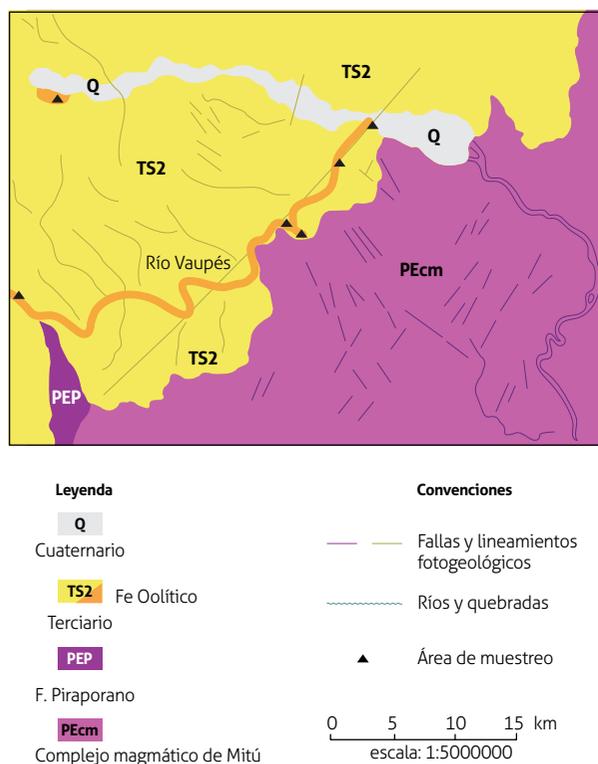
El Terciario Superior reposa discordantemente sobre el Complejo Migmatítico de Mitú y está compuesto, en la parte inferior, por conglomerados con clastos de areniscas, areniscas arcillosas, granitos y rocas metamórficas, y en forma discordante una capa de hierro oolítico. En la parte media a superior está formado por arcillolitas, areniscas y, ocasionalmente, mantos de lignito de poco espesor (Galvis y Gómez, 1998). Tectónicamente, el área no se encuentra afectada por pliegues y fallas, y los estratos aflorantes presentan solamente ligeros repliegues.

La capa de hierro oolítico se ha seguido por un tramo de 45 km desde Mitú, aguas arriba del río Vaupés, y por una quebrada afluente de este; se ha observado en forma horizontal sobre un granito del Complejo Migmatítico de Mitú, con espesores entre 2 y 3 m. El análisis químico de 6 muestras tomadas en la parte superior del estrato en varios sectores dio como resultado un 39.95 % de hierro y, en una muestra de canal, un 52.98 %. Esto puede indicar cambios significativos en el contenido de hierro en superficie, lo cual hace evidente que el hierro ha sido lixiviado y transportado, dejando la roca con menor concentración de dicho mineral.

Solamente se estudió una muestra al microscopio, lo cual indica que los oolitos tienen textura pisolítica predominante y presentan bandas concéntricas de limonita, cemento de hematina bordeando en algunos casos los pisolitos, u oolitos. También se observaron pseudomorfs, probablemente de carbonato, los cuales fueron lixiviados y solamente queda el hueco.

Los minerales principales están constituidos por pisolitos y oolitos hematíticos (60 %), cemento hematítico-limonítico (30 %) y huecos (3 %). Los pisolitos y oolitos varían de tamaño entre 1.08 y 2.5 mm. Los pisolitos y oolitos son concéntricos y a la mayoría no se les ha observado núcleo formado por hematita bandeada.

El prospecto de hierro de Mitú puede ser el más grande del país, teniendo en cuenta su extensión de más de 45 km de longitud, 2 a 3 m de espesor y promedio de hierro entre 40 y 53 %; sin embargo, es necesario confirmar si la longitud de la capa de hierro es continua, conocer su amplitud y confirmar con más muestras y análisis químicos su contenido de hierro y minerales principales. Presenta el inconveniente de que no cuenta actualmente con infraestructura vial y se encuentra muy distante de los centros urbanos importantes del país.



**Figura 17.** Mapa geológico del área de Mitú, que muestra el trazo de la capa de hierro oolítico

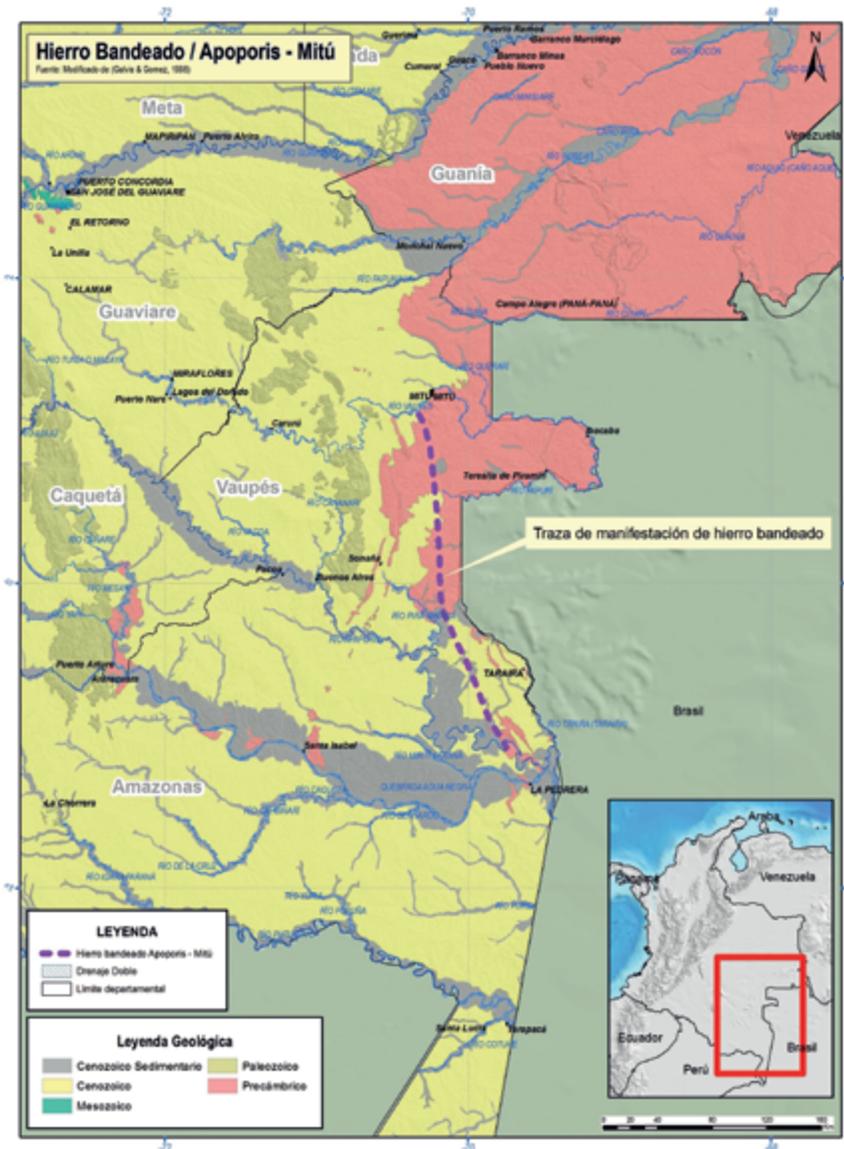
Fuente: Ulloa (1979)

3.2.1.2. Formaciones de hierro bandeado (Fhb)

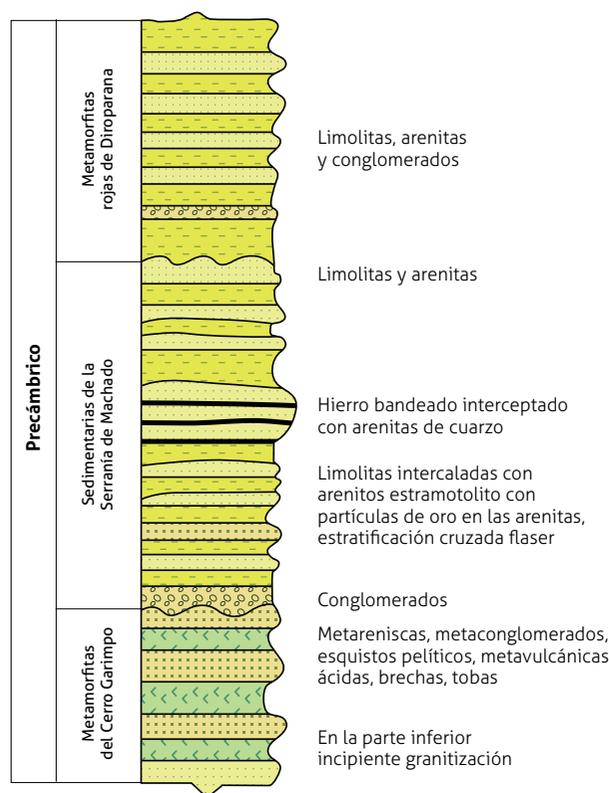
La presencia de Fhb en Colombia solamente se sospechó cuando se encontraron disturbancias magnéticas en la región de Mitú, durante el desarrollo del proyecto llevado a cabo por Amoco Oil Company. Geólogos de dicha compañía encontraron acumulaciones residuales de hierro de gran espesor en las riberas del río Vaupés, aguas arriba de Mitú, y en la cuenca del río Paca, y mineralizaciones de hierro primario bandeado en afloramientos en un meandro abandonado del río Apoporis, denominado lago Apoporis. Más tarde, durante trabajos exploratorios llevados a cabo por la misma compañía, se encontraron mineralizaciones primarias de hierro y residuales en las vecindades del río Tigüí, y residuales en el caño Pirobatón en el norte de Mitú (Galvis y Gómez, 1998).

De esta área, en lo relacionado con hierros bandeados, solamente se conocen los trabajos internos de la compañía COGEMA, Amoco Oil Company y la publicación de Galvis y Gómez (1998). De los trabajos antes mencionados se han extractado los principales aspectos en lo relacionado a su localización, estratigrafía, origen y potencialidad. La región con Fhb se encuentra al sur y al norte del río Apoporis, unos pocos kilómetros al sur de Mitú, con una longitud aproximada de 200 km en dirección del rumbo de los estratos (figura 18). Se desconoce el espesor de las Fhb, datos estructurales y de análisis químicos.

En el área de Mitú se han diferenciado tres unidades informales que, de más antigua a más joven, son: metamorfitas del cerro Garimpo, sedimentitas de la Serranía de Machado y sedimentos de Diroparana rojos (figura 19).



**Figura 18.** Mapa de localización del hierro bandeado del río Apoporis-Mitú  
 Fuente: modificada de Galvis y Gómez (1998)



**Figura 19.** Columna estratigráfica generalizada del área del río Apoporis, Mitú

Muestra el hierro bandeado en posición relativa. Sin escala

Fuente: elaborada con base en datos de Galvis y Gómez (1998)

**Metamorfitas del cerro Garimpo.** Están constituidas por conjuntos de metareniscas, metaconglomerados, esquistos pelíticos, esquistos talcosos y rocas metavulcánicas ácidas (tobas y brechas). Los conjuntos de metareniscas cuarzosas son los predominantes; en la parte superior de la unidad se observaron metareniscas con intercalaciones de brechas y tobas riolíticas. Las metamorfitas presentan, en la parte inferior, incipiente granitización o migmatización.

**Sedimentitas de la serranía de Machado.** Las sedimentitas de la serranía de Machado reposan discordantemente sobre las metamorfitas del cerro Garimpo; en la parte inferior están compuestas por un conglomerado polymítico, con espesores entre 2 y 15 m, con clastos de cuarzo hialino y lechoso, cuarcitas, metavulcánicas, esquistos y rocas de textura granítica. Al conglomerado le suprayacen arenitas de cuarzo con intercalaciones de limolitas y lodolitas de color gris azulado; en las arenitas se observaron ondulitas, estratificación cruzada, *boudinage* y textura fláser.

Al conjunto anterior le suprayacen arenitas de cuarzo teñidas de rojo por óxidos de hierro y un estromatolito, con formas mamilares, reticulares y tabulares. Encima del estro-

matolito se encuentra un jaspe de espesor variable. Tanto en el estromatolito como en el jaspe se observaron partículas de oro y, en las areniscas, cristales de magnetita euhedral.

Encima de los sedimentos anteriores se encontraron limolitas micáceas y, sobre estas, un conjunto de varias decenas de metros de espesor de arenitas con bandas de oligisto especular. Las bandas de hierro especular de pocos milímetros a varios centímetros de espesor están separadas por arenitas cuarzosas. La mineralización de las Fhb se observó a lo largo de la serranía de Machado por aproximadamente 40 km, su prolongación al sur a lo largo de la serranía Taraira, y en serranías menores hasta cercanía del río Vaupés (Galvis y Gómez, 1998). Encima de los niveles de Fhb se encontraron limolitas y arcillolitas de colores gris claro. Las sedimentitas de la serranía de Machado se observaron intruidas por cuerpos sieníticos y diques de diabasa.

**Sedimentitas rojas del Piroparana.** Esta unidad fue descrita por Galvis, Hugett y Ruge (1979) para designar una serie litológica compuesta por conglomerados polymíticos, areniscas arcósicas, limolitas y arcillolitas de colores rojo, púrpura, bermellón y en algunos casos verde. En el conjunto se observaron interestratificadas rocas piroclásticas y lavas de composición riolítica. El Piroparana se observó intruido por numerosos *stocks* de gabros alcalinos, sieníticos, nefelínicos, rocas graníticas y sienitas nefelínicas.

**Tectónica.** El área del río Apoporis-Mitú es muy estable tectónicamente; en ella solamente se observaron algunas complicaciones estructurales en las metamorfitas del cerro Garimpo. En la serranía de Machado se observaron monoclinales con rumbo general N40°W, con inclinaciones de 30° a 60°. En la unidad sedimentitas rojas de Piroparana se observaron horizontales.

**Mineralización.** En el conjunto de capas con hierro se observó que existen varias decenas de metros de espesor, constituidas por alternancia de arenitas de cuarzo con intercalaciones de capas de hierro de pocos milímetros a varios centímetros de espesor (figura 20), y paquetes de mineral sin bandeamiento como consecuencia de la desaparición de niveles silíceos. Al conjunto de hierro bandeado le suprayacen e infrayacen limonitas y arcillolitas de diferentes colores. El conjunto de capas con hierro se observó por una extensión de 200 a 250 km en dirección del rumbo, sin conocer si es continua o discontinua la mineralización.

**Origen.** El origen de las capas de hierro de Machado, teniendo en cuenta microformas de posible origen marino

(observadas en el microscopio electrónico); la presencia de estromatolitos silíceos, descritos en la Formación Gunflint en depósitos del lago Superior (Awrimik, 1977); estructura fláser; estratificación cruzada; *boudinage* (Galvis y Gómez, 1998), probablemente esté en depósitos marinos. Los conjuntos de hierro bandeado se encontraron interestratificados con sedimentitas, limonitas y arcillolitas sin ninguna relación con eventos volcánicos, lo cual no permite postular que los depósitos de la serranía de Machado corresponden a formaciones de hierro bandeado tipo Superior.

Las manifestaciones del cerro Machado presentan una buena perspectiva en un futuro próximo debido a su extensión y espesor; sin embargo, es necesario efectuar estudios detallados para conocer su longitud real, espesor, inclinación de los estratos y el contenido de hierro y minerales principales.

De confirmarse la extensión y el espesor de la mineralización de la región de Mitú, esta se puede convertir en el distrito minero más importante del país.



**Figura 20.** Fotografía hierro bandeado. Obsérvese la alternancia de niveles silíceos y niveles ferrosos

Fuente: Galvis y Gómez (1998)

### 3.2.1.3. Placeres de playa marina

Estos depósitos se encuentran en los departamentos del Atlántico y Magdalena, en las estribaciones noroccidentales de la Sierra Nevada de Santa Marta, en la parte norte, donde drenan al mar los ríos Don Diego y Buritaca (Alfonso y González, 1990). En estos lugares se efectuaron estudios sedimentológicos, granulométricos, mineralógicos y perforaciones con el fin de conocer las características de las arenas y su contenido de ilmenita y magnetita.

Los trabajos de granulometría y mineralogía indicaron que los sectores donde predominaban las arenas de tamaño

fino a muy fino correspondían a las áreas con mayor porcentaje de ilmenita-magnetita, y en las áreas donde predominaba el tamaño medio, disminuían los minerales mencionados.

Se tomaron muestras para análisis químicos en la parte occidental y oriental de la desembocadura del río Don Diego, las cuales fueron analizadas en laboratorios de Estados Unidos y Finlandia. Las muestras estudiadas en Estados Unidos dieron los siguientes resultados:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 33.48 %;  $\text{TiO}_2$ , 1.76 %;  $\text{SiO}_2$ , 35.41 %;  $\text{CaO}$ , 3.25 %, y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 4.28 %. Las analizadas en Finlandia se estudiaron en la Fábrica Kamira, compradora de ilmenita; los estudios dieron los siguientes resultados:  $\text{TiO}_2$ , 20.5 %-16.2 %;  $\text{CrO}_2$ , 0.034 %-0.048 %, y  $\text{V}_2\text{O}_5$ , 0.13 %-0.12 %. Estos últimos estudios concluyeron que la materia prima para la producción de dióxido de titanio no presentaba la calidad requerida.

En el área donde se encontraron las mayores concentraciones de arenas negras, correspondiente al occidente del río Don Diego, se efectuó un cálculo de recursos teniendo en cuenta topografía occidental, profundidad de 3 m, sumatoria de bandas de capas de arenas negras de 0.4 m, área total de 400 x 300 m y gravedad específica 3.9 g/cm<sup>3</sup>. Se obtuvieron recursos probables de 187200 toneladas métricas.

Teniendo en cuenta los aspectos del estudio geológico y de recursos, se infiere que las concentraciones de arenas negras encontradas superficialmente y en las perforaciones son muy pobres, quedando la probabilidad de que las arenas que se encuentran mar adentro presenten mayor concentración y tonelaje.

### 3.2.2. Depósitos relacionados con actividad ígnea

Se consideran depósitos con influencia de actividad ígnea los de segregación magmática, hidrotermales y reemplazo.

#### 3.2.2.1. Depósitos por segregación magmática

En Colombia se han reportado depósitos de hierro clasificados como de segregación magmática en áreas de dominio de rocas ígneo-metamórficas en la cordillera Central, la cordillera Oriental, el Macizo de Santander y la Sierra Nevada de Santa Marta. Las manifestaciones y los prospectos de hierro de segregación magmática se encuentran localizados en los municipios de Lérida, Río Blanco, Ataco, Valle de San Juan y Venadillo en Tolima; La Plata en Huila; Ocaña en Norte de Santander, y Buritaca y Sevilla en el Magdalena (tabla 12). Geológicamente están localizados en la Provincia Litosférica Continental Meso Proterozoica Grenvillana (tabla 12 y figura 21).

**Tabla 12.** Depósitos relacionados directamente con actividad ígnea. Segregación magmática

No	Unidad Geológica	Localidad	Autor
1	Complejo Ígneo metamórfico (Cordillera Central)	Lérida, Tolima. Manifestación Los Colorados	Buenaventura (1975)
2	Batolito de Ibagué	Rioblanco, Tolima. Manifestación Tiemblanalga	Buenaventura (1975)
3	Batolito de Ibagué	Ataco, Tolima. Manifestación el Horizonte	Buenaventura (1975)
4	Batolito de Ibagué (Formación Payande y Post-Payande)	Valle de San Juan. Manifestación el Imán	Buitrago (1975)
5	Batolito de Ibagué	Venadillo, Tolima. Manifestación: Alto El Balso; La Plata, Huila. Manifestacion El Iman	Buitrago (1975)
6	Batolito de Ibagué	La Plata, Huila. Manifestación el Imán	Buitrago (1975)
7	Ígneo de Santander	Ocaña, N. Santander. Manifestación Los Cristales y Piedra de Iman	Otero (1975)
8	Ígneo de Santander	Ocaña, N. Santander. Manifestación Piedra de Imán	Otero (1975)
9	Complejo Ígneo Metamórfico	Buritaca, Magdalena, Pico la Reina	Tchanz, Buenaventura, y Jimeno (1970)
10	Sierra Nevada de Santa Marta	Sevilla, Magdalena. Mocoa (Espíritu Santo)	Tchanz, Buenaventura, y Jimeno (1970), Mutis (1943), Reymond (1942)
11	Contacto rocas ígneas. Cordillera Central con Post- Payandé	Hobo, Huila	Buitrago (1976)

Fuente: Ulloa (1987)



**Figura 21.** Depósitos por actividad ígnea. Segregación magmática.

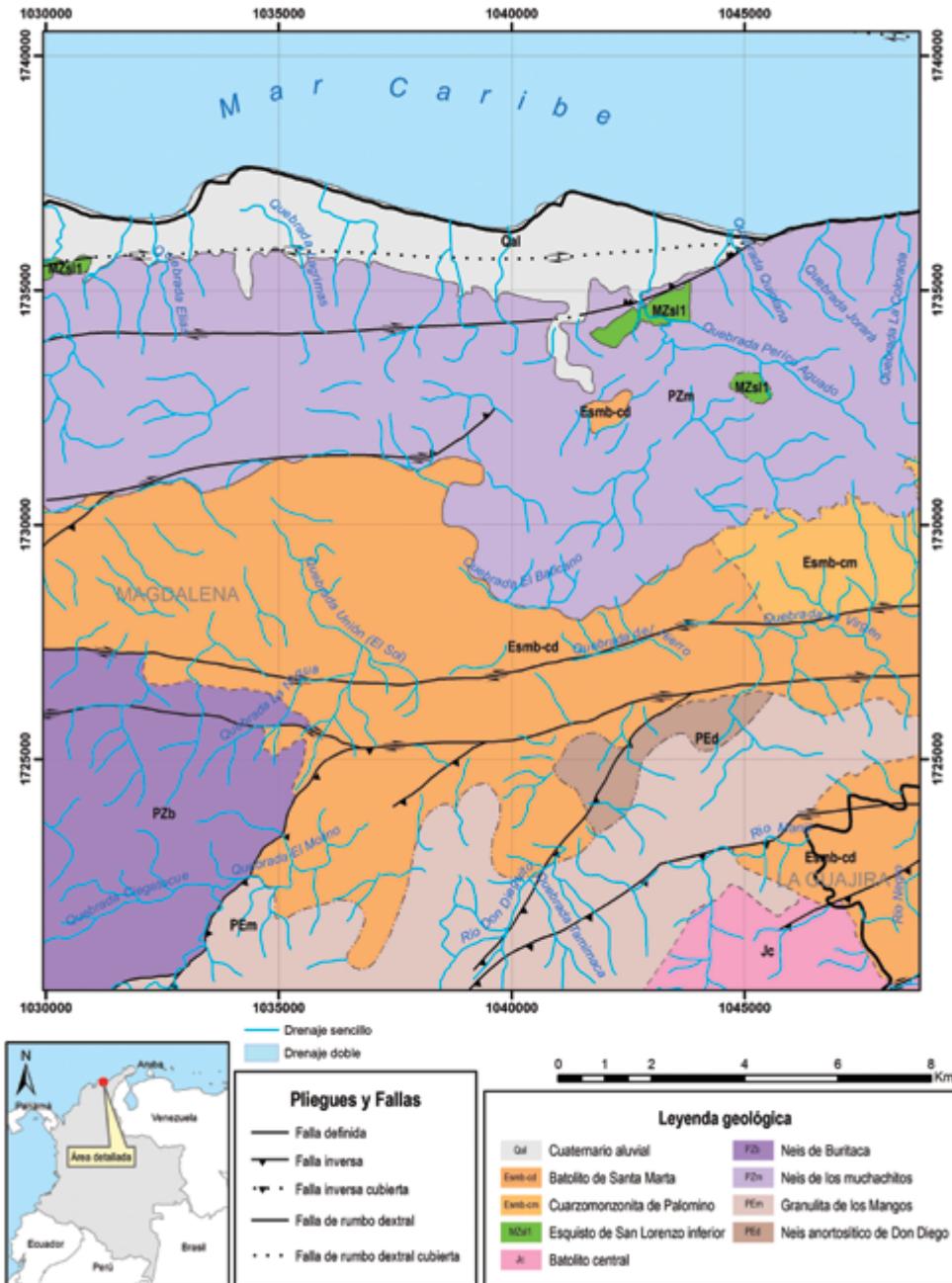
Fuente: tabla 12, tomado de Ulloa (1987)

De las manifestaciones que aparecen en la tabla 12, la que más interés ha despertado por su contenido de hierro, potencial y localización geográfica es la de Buritaca, quebrada El Hierro, estudiada por Alfonso y González (1990) y Gonzalez (2000). De estos trabajos se extraerán los principales aspectos relacionados con geología, petrografía, química, prospección y potencialidad.

El prospecto de hierro en la quebrada El Hierro se localiza en la parte norte de la Sierra Nevada de Santa

Marta, departamento del Magdalena, entre el río Don Diego al norte, la quebrada Maroma al oriente, la quebrada Don Dieguito al occidente y Cuchilla Perdida al sur, y atravesada de sur a norte por la quebrada El Hierro.

En el área del prospecto afloran rocas ígneas y metamórficas con edades del Precámbrico y Terciario. De la más antigua a la más joven son: Granulita de Los Mangos, Anortosita de Don Diego y Plutón de Buritaca (figura 22).



*Granulita de Los Mangos.* Constituida por alternancias de bandas paralelas de colores oscuros (granulitas máficas y ultramáficas) y claros (granulitas graníticas), y granulitas de colores intermedios de composición intermedia. Las granulitas son de grano medio a grueso, bien foliadas y de textura granoblástica (Tschanz, 1970, citado en González, 2000).

*Anortosita de Don Diego.* Microscópicamente, las rocas de esta unidad son de color crema claro, foliadas, de aspecto masivo. Este cuerpo presenta noritas mineralizadas de ilmenita-magnetita-apatito y delgadas bandas y lentes con mineralizaciones máficas que dan a la roca un aspecto moteado. La edad de las granulitas, por comparación con rocas similares en otras localidades del mundo, puede ser del Proterozoico (2500 a 1600 Ma).

*Plutón de Buritaca.* Microscópicamente, presenta textura fanerítica de grano medio. Los minerales principales son plagioclasa (50 %), cuarzo (20 %), hornblenda y biotita (30 %); de acuerdo con esta composición, ha sido clasificada como cuarzodiorita.

La edad del Plutón oscila entre  $48.8 \pm 1.7$  Ma y  $44.1 \pm 1.6$  Ma (Eoceno), calculados por el método K/Ar en hornblenda (Tschanz, 1969, citado en González, 2000). El Plutón de Buritaca intruye las rocas de Granulita de Los Mangos y Anortosita de Don Diego.

El área del prospecto de hierro de la Sierra Nevada de Santa Marta está afectada por fallas regionales con direcciones generales N80°E, inclinadas al sur entre 70° a 80°; entre estas se encuentran la de la Maroma, el Mojón y fallas menores con direcciones N30 a 45° W, inclinadas 70° W, como la de El Hierro y Vijagual, que afectan el área del prospecto (Gonzalez, 2000).

Las mineralizaciones en la Anortosita de Don Diego se dividieron en noritas mineralizadas y mineralizaciones bandeadas de ilmenita-magnetita-apatito; ambas se encuentran en la parte oriental de la unidad Anortosita de Don Diego.

La mineralización de las noritas se presenta en forma de diques que cortan los neises anortosíticos en forma de enjambres por tramos de 6 m. Los análisis semicuantitativos por microscopía electrónica dieron los siguientes promedios:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 35 %;  $\text{TiO}_2$ , 7 %, y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 7 %. Los análisis químicos cuantitativos dieron los siguientes promedios: hierro total  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 36.10 %; titanio  $\text{TiO}_2$ , 5.49 % y fósforo  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 1.60 %. Esto indica que los principales minerales en las noritas son magnetita titanífera y apatito (figura 23).



**Figura 23.** Noritas mineralizadas

Fuente: tomado de González (2000)

Las mineralizaciones bandeadas se presentan como ilmenita-magnetita-apatito, aflorando en la quebrada El Hierro, en las cotas 210, 243 y 365 m snm. En las noritas mineralizadas expuestas en la quebrada El Hierro se efectuaron cálculos de recursos inferidos, asumiendo una profundidad de 20 m, un área de 300 por 60 m, dando un volumen de la mineralización de 216000 m<sup>3</sup>, los cuales indican que las noritas mineralizadas no presentan interés económico por el momento.

La mineralización se presenta en bandas claras y oscuras hasta de 15 cm de espesor. Las bandas claras contienen apatito (80 %), ilmenita-magnetita (20 %); las bandas oscuras contienen 95 % de ilmenita-magnetita y 5 % de apatito (figura 24). Los análisis semicuantitativos por microscopía electrónica dieron los siguientes resultados:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 32 %;  $\text{TiO}_2$ , 17 % y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 10 %. Los análisis químicos cuantitativos arrojaron los siguientes resultados: hierro total  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 57.91 %; titanio  $\text{TiO}_2$ , 7.18 % y fósforo  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 13.52 %.

El origen de la mineralización está enmarcado en el modelo de yacimientos tipo Kiruna, provenientes de un magma anortosítico rico en magnetita, apatito, que fue concentrando un silicato fundido residual, enriqueciéndose durante la diferenciación magmática y expulsado luego por presión filtrante (González, 2000).

Para el cálculo de las reservas se abrieron trincheras siguiendo las mineralizaciones; de igual forma, se realizaron estudios geofísicos por la quebrada El Hierro y el caño La Mina, y se encontraron seis anomalías magnéticas.

En la estimación de recursos para las mineralizaciones bandeadas se tuvieron en cuenta un área de 490 m por 645 m, volumen de estéril (70 %), volumen de mineralización (30 %), 10 m promedio de profundidad y gravedad específica 4.1, para un volumen de mineralización de 948150 m<sup>3</sup>.

El total de los recursos inferidos de la zona mineralizada de ilmenita asciende a 4772000 t, las cuales pueden ser más si se comprueba mayor profundidad de la mineralización.

En el estudio de González (2000) se tratan aspectos de potencial minero, duración del proyecto, aspectos ambientales y evaluación financiera.

En la cordillera Central se presentan varias manifestaciones de mineralizaciones atribuidas a segregación magmática; sin embargo, todas son de pequeña magnitud y la más representativa está ubicada en el valle de San Juan, manifestación de El Imán, que corresponde a diques y lentes de magnetita hospedados en Calizas de Payandé. El cálculo de reservas probables se estimó en 60000 t; el 60 % de Fe; 2.5 a 1.1 % de SiO<sub>2</sub>, y 0.5 % de P (Buitrago, 1975).

### 3.2.2.2. Depósitos hidrotermales

Los depósitos por actividad hidrotermal en Colombia han sido reportados en áreas de dominio de rocas ígneo-metamórficas, en la cordillera Central, el Macizo de Santander, la serranía de San Lucas y en rocas sedimentarias en el Girón, Grupo Cáqueza, Grupo Farallones, Grupo Villeta y Formación Paja en la cordillera Oriental (tabla 13 y figura 24).

Las manifestaciones de depósitos hidrotermales en el país son de pequeñas proporciones y se presentan como relleno de cavidades, venas, diques y cuerpos irregulares. Sus minerales principales son magnetita, especularita, pirrotina, calcopirita, por alteración de hematita y limonita.

**Tabla 13.** Depósitos formados por soluciones hidrotermales.

No	Unidad Geológica	Localidad	Autor
1	Complejo Metamórfico de la Cordillera Central	Líbano, Tolima. Manifestación. El Reposo	Buenaventura (1975)
2	Complejo Ígneo de Cordillera Central	Lérida, Tolima. Manifestación Guacolda	Buenaventura (1975)
3	Batolito de Ibagué, inyectado por diques	Rovira, Tolima. Manifestación: El Achiote	Buitrago (1975)
4	Batolito de Ibagué	Rovira, Tolima. Manifestación San Roque	Buitrago (1975)
5	Batolito de Ibagué	Rovira, Tolima. Manifestación Los Balsos	Buitrago (1975)
6	Batolito de Ibagué	Rovira, Tolima. Manifestación La Miranda	Buitrago (1975)
7	Complejo Ígneo Metamórfico, Cordillera Central	Palermo, Huila. Manifestación Paraguay	Buitrago (1975)
8	Complejo Ígneo Metamórfico, Cordillera Central	Neiva, Huila. Manifestación El Moral	Autor
9	Formación Bocas	Bucarasica. N. de Santander. La Curva (Diseminados), Cuchilla de Palencia (Silos), Hacienda Tomita (Silos)	Buenaventura (1975)
10	Formación Silgará	La Playa. Norte de Santander - El Imán, Pajaritos - Quebrada Payande	Buenaventura (1975)
11	Neis de Bucaramanga	Chitagá, Norte Santander. Loma Samaria	Buitrago (1975)
12	Complejo Ígneo Metamórfico Serranía de San Lucas.	Alto del Rosario y El Banco, Magdalena	Buitrago (1975)
13	Girón	Agua Acalorada, San José de Miranda, Santander	Buitrago (1975)
14	Grupo Cáqueza	Gachalá (Cundinamarca). Manifestación Tominejas	Buitrago (1975)
15	Grupo Farallones	Gachalá (Cundinamarca). Manifestación Algodones	Buitrago (1975)
16	Grupo Farallones	Gachalá, Cundinamarca. Manifestación Montecristi	Buitrago (1975)
17	Formación Paja	Yacopí, Cundinamarca. Manifestación Hacienda La Mina	Otero (1975)
18	Grupo Villeta	Topaipí. Cundinamarca. Yacopí Grande	Otero (1975)
19	Grupo Villeta	Piame, Cundinamarca. Manifestación Alto de la Mina	Otero (1975)

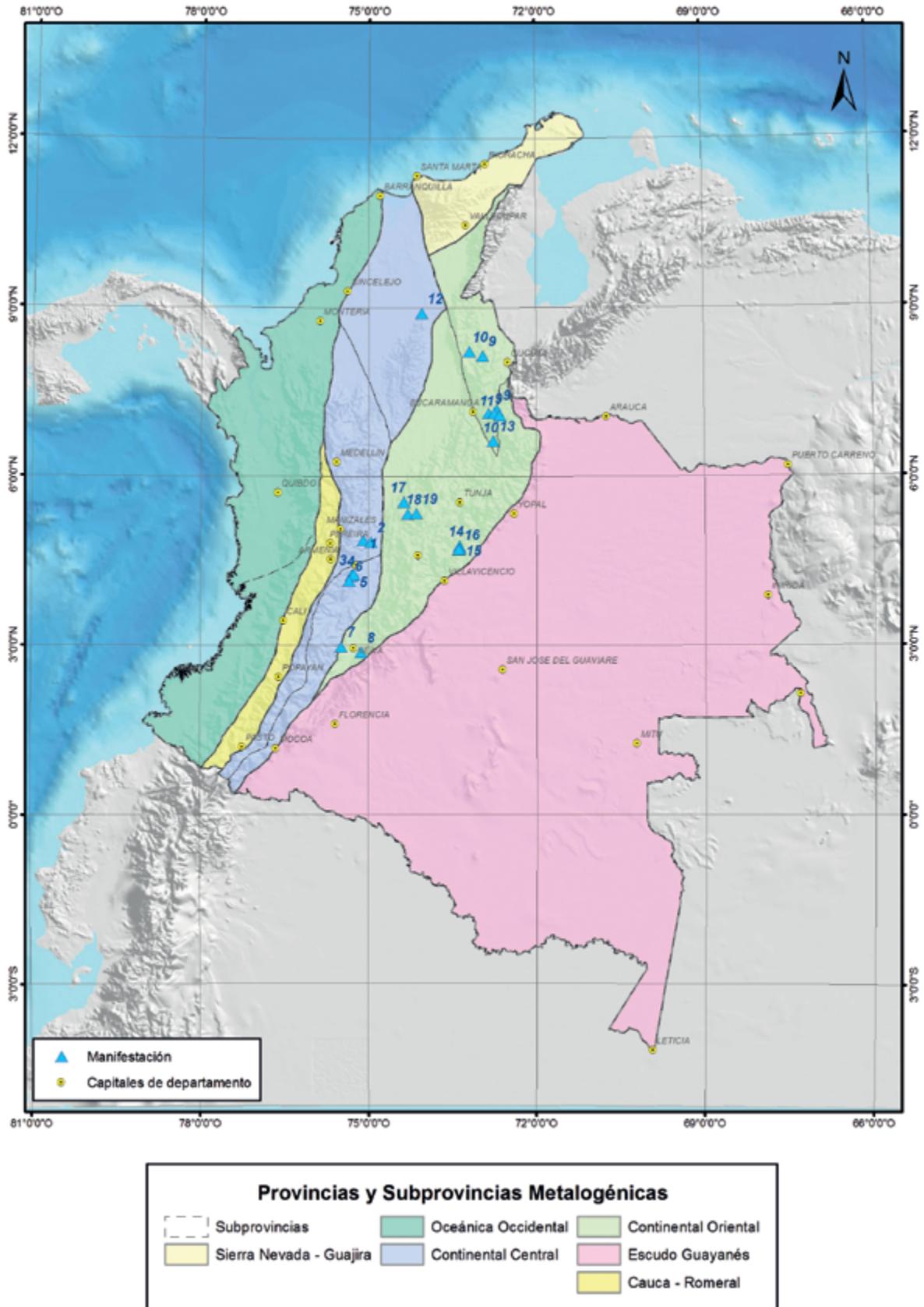
Fuente: Gilart *et al.* (2007)

En los Santanderes los depósitos se presentan asociados a las unidades Silgará, Neis de Bucaramanga y Bocas, en forma de venillas y diques irregulares que intruyen rocas metamórficas y sedimentarias. Manifestaciones de este tipo se han reportado en Bucarasica, Ocaña, Silos, La Playa, Chitagá y Miranda (Otero, 1975).

En Tolima y Huila las manifestaciones se localizan en los municipios de Lérida, Ataco, Valle de San Juan, Venadillo, La Plata, Líbano y Neiva, en forma de masas irregulares, diques de magnetita e ilmenita especular, que intruyen anfíbolitas, dacitas, granitos del Complejo Metamórfico de

la cordillera Central y Batolito del Tolima (Buitrago, 1975; Buenaventura, 1975).

En la cordillera Oriental las manifestaciones de hierro hidrotermal se localizan en la región del Guavio, en los municipios de Gachalá, Cundinamarca, en las unidades Farallones y Cáqueza (Rodríguez, 1971). También se encuentran manifestaciones de este tipo en Paime, Yacopí y Topaipí en Cundinamarca. Las manifestaciones de las áreas mencionadas son de pequeña magnitud y se presentan como diques y lentes, intruyendo rocas sedimentarias del Cretáceo Inferior (Rodríguez, 1971; Gil, 1976).



**Figura 24.** Depósitos de hierro de soluciones hidrotermales

Fuente: tabla 13, tomado de Ulloa (1987); Salinas *et al.* (1999)

## 3.2.2.3. Depósitos por reemplazamiento

En Colombia se han reportado depósitos de hierro que se han clasificado como de reemplazamiento, en la cordillera Oriental en rocas del Cretáceo Inferior a Cretáceo Superior, y hematita (Gilart *et al.*, 2007). Formaciones Calizas

de Guavio, Fómeque y Chipaque, en los municipios de Ubalá; San Eduardo, Tibirita, Manta, Pacho, La Pradera, Sopó, Zipaquirá, Nemocón, Sesquilé en Cundinamarca, y en San Antonio, Tolima (tabla 14 y figura 25).

**Tabla 14.** Depósitos relacionados con actividad ígnea formados por reemplazamiento, minerales principales: siderita por alteración de limonita

No	Unidad geológica	Localidad	Autor
1	Grupo Cáqueza	Ubalá, Cundinamarca, Yacimiento Las Mercedes	Cruz (1971)
2	Grupo Cáqueza	Ubalá, Cundinamarca	Gil (1976), Rodríguez (1971), Manjarres (1966)
3	Formación Fómeque	Tibirita, Cundinamarca, El Salitre; Manta, Cundinamarca, Las Minas	
4		Manta, Cundinamarca, Las Minas	
5	Grupo Cáqueza	San Eduardo, Boyacá, Quebrada Barrera; Pacho, Cundinamarca, Quebrada Barro Blanco	
6	Grupo Villeta	Pacho, Cundinamarca, Algodonales; Pacho, Cundinamarca, El Cedro	Cruz (1971)
7	Formación Chipaque	Guasca, Cundinamarca, Pericos	Hubach (1952), Gil (1976)
8	Formación Chipaque	La Pradera, Cundinamarca, El Salitre:	Alvarado (1943), McLaughlin y Arce (1972), Gil (1972)
9	Formación Guadalupe	Tabio, Cundinamarca, Quesero	Hubach (1940), Gil (1976)
10	Formación Chipaque	Sopó, Cundinamarca, Cerro Montenegro	Gil (1976)
11	Formación Chipaque	Zipaquirá, Cundinamarca, Alto de la Caldera	Gil (1976)
12	Formación Chipaque	Nemocón, Cundinamarca, El Volador	Hubach (1952)
13	Grupo Villeta	Sesquilé, Cundinamarca; El Peñón, Cundinamarca, Quebrada Molinero	Alvarado (1943)
14	Batolito de Ibagué	San Antonio, Tolima, Prospecto Guadualito	Gil (1976)

Fuente: Gilart *et al.* (2007)

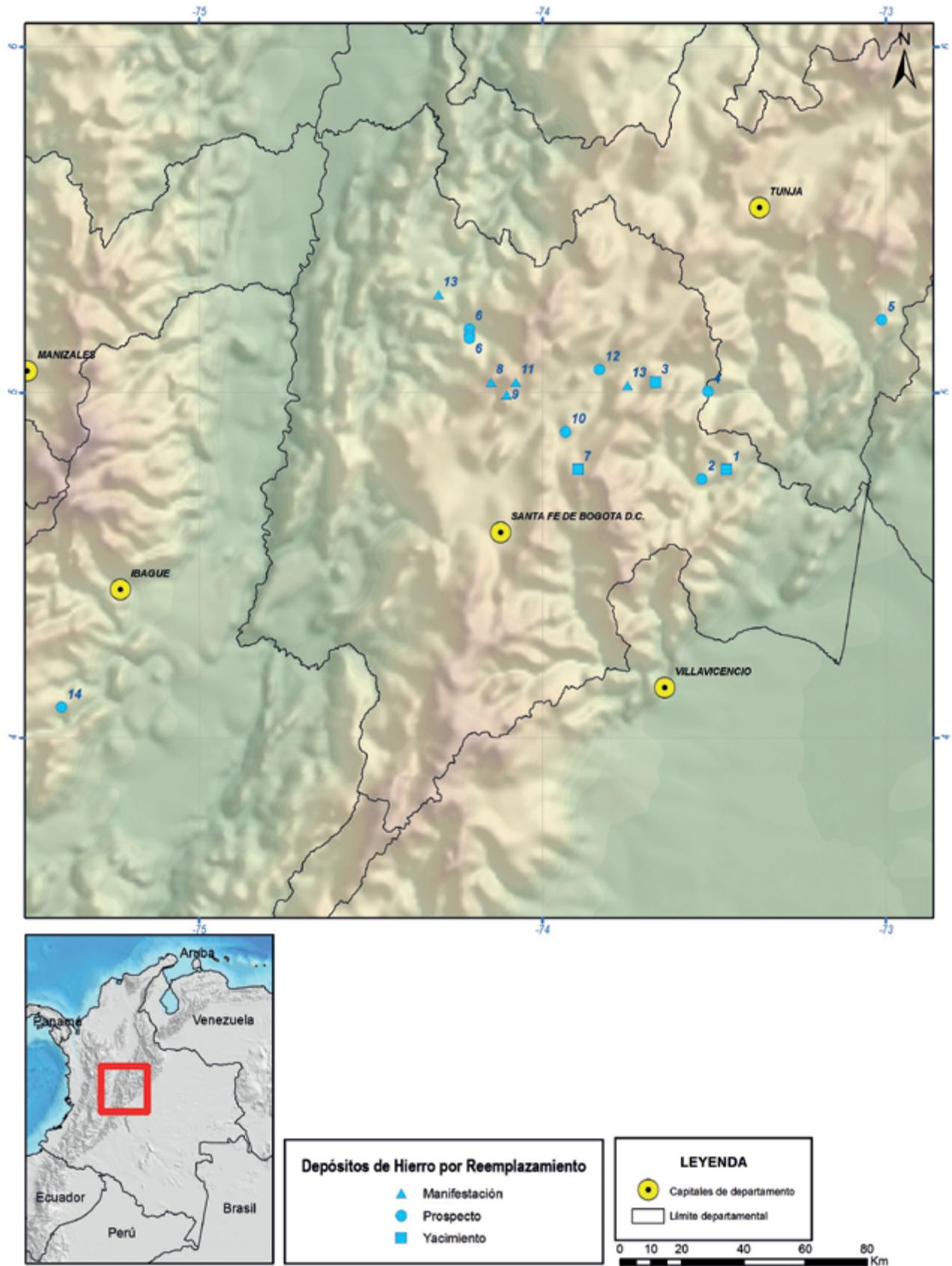
Los depósitos por reemplazamiento son de pequeña magnitud; sin embargo, la explotación y el beneficio del hierro en Colombia comenzó con los yacimientos localizados en la Sabana de Bogotá, en la Formación Chipaque y, en menor proporción, en la Formación Fómeque, en el municipio de Manta, Cundinamarca. El depósito de mayor magnitud corresponde al de Las Mercedes, en el cual se han efectuado estudios geológicos, químicos y de cantidad de mineral.

En el prospecto de Las Mercedes, en Ubalá, Cruz y Camacho (1971) y Geocolombia (1968) han efectuado trabajos geológico-mineros, según los cuales el prospecto de hierro se encuentra emplazado en la Formación Calizas de Guavio en su parte superior, en el miembro Las Mercedes (Ulloa y Rodríguez 1976). La mineralización se encuentra interstratificada en la parte media de las calizas de Las Mercedes en forma de una capa con espesores de 10 a 20 m, longitud de 2.5 km en dirección del rumbo e inclinaciones de 12° a 30° W. La mineralización primaria corres-

ponde a siderita, alterada a limonita, con un contenido de Fe del 51.0 al 58.0 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.73 %; CaO, 63 %; MgO, 65 %, y P, del 2 al 3 % en mena alterada. Un análisis químico de siderita sin alterar dio los siguientes resultados: Fe del 36.9 al 41.5 %, con contenido bajo de azufre y fósforo (Cruz y Camacho (1971).

Las reservas inferidas, tomando promedios de espesor, longitud, profundidad y contenido de hierro dieron 4117000 t de reservas probadas, 16814000 t de reservas probables y 22030000 t de reservas posibles.

El origen de la mineralización, según Geocolombia (1971), es sedimentario, con minerales primarios de hematita, limonita, goethita y siderita, en capas calcáreas del Carbonífero. Estudios de Ingeominas concluyeron que la mineralización se encuentra emplazada en calizas del Cretáceo Inferior, corresponde a reemplazamiento de calizas por fluidos hidrotermales que formaron siderita y por meteorización, óxidos e hidróxidos de Fe (Camacho y Cruz, 1971).



**Figura 25.** Depósitos de hierro por reemplazamiento

Fuente: tabla 14, tomado de Ulloa (1987)

En la Formación Fômeque, en los municipios de Manta, Tibirita y San Eduardo, se han reportado pequeñas manifestaciones de siderita emplazadas en calizas. Por alteración se originó limonita. Los contenidos de oscilan entre el 50 y el 74.83 % de Fe, y entre el 5.63 y el 9.60 % de CaO3 (Manjarrés, 1966; Rodríguez, 1971; Gil, 1976) (figura 26).

En la Formación Chipaque se encuentran varias manifestaciones de hierro en el departamento de Cundinamarca, en los municipios de Sopó, Zipaquirá, Nemocón, Sesquilé, Tabio, Guasca y Pacho.

Las manifestaciones de Sopó, en cerro Montenegro, y Guasca, en Pericos, corresponden a areniscas cuarzosas, impregnadas con óxidos de hierro, con contenidos de Fe del 48 al 58 %, y sílice del 10.25 al 39 %. En el cerro Montenegro el cálculo de reservas probables fue 200 millones de toneladas para el banco principal y 1000000 en otros bancos. En Pericos se calcularon 600 millones de reservas estimadas.

Esta manifestación fue explotada asumiendo que las capas de areniscas impregnadas de hierro eran de origen sedimentario y su continuidad en dirección al buzamiento era continua; sin embargo, en el momento de efectuar la minería se encontró que las capas con hierro se convertían en areniscas cuarzosas a los pocos metros de profundidad. Este fenómeno definió que la explotación solamente correspondía a muy pocos millones de toneladas; por tanto, la mina fue cerrada.

El resto de las manifestaciones de las áreas mencionadas corresponden a cuerpos tabulares de siderita que alteran superficialmente a limonita y goethita; los espesores de las manifestaciones oscilan entre 0.5 y 3.8 m. Estas manifestaciones se consideran, en unos casos, de origen sedimentario y, en otros, por reemplazamiento de calizas por aguas meteóricas ferruginosas (Alvarado, 1943; McLoughlin y Arce, 1972; Gil, 1976).

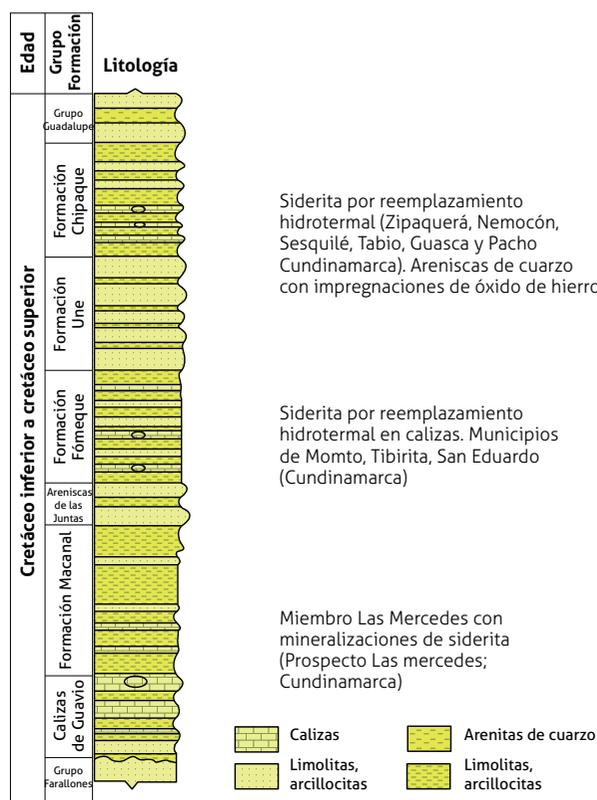
### 3.2.3. Lateritas

Depósitos lateríticos en Colombia se han reportado en la cordillera Occidental, en la Central; en Córdoba (Cerromatoso); Valle (Dagua); Antioquia (Morro Pelón, Medellín y Amagá), y en Meta (Serranía de la Macarena) (tabla 15 y figura 27).

La única mineralización en explotación es Cerromatoso, de donde se extraen níquel y ferroníquel. La mena de Cerromatoso proviene de la laterización de peridotitas, las cuales por enriquecimiento residual dan una capa superficial dura o canga, con espesores entre 5 y 12 m, y contienen un promedio del 47 % de Fe y del 12 al 14 % de SiO<sub>2</sub> (Garcés, 1995), y un promedio del 2 % de níquel (UPME, 2005).

Actualmente, la planta de Cerromatoso tiene una capacidad nominal de 55 kt al año, que la hacen la mayor

productora de ferroníquel en el mundo (UPME, 2005). Es explotada como mena de níquel, el cual se exporta en su mayor parte; solamente un pequeño porcentaje es distribuido como ferroníquel a Paz de Río y a las otras acerías semintegraas del país.



**Figura 26.** Columna estratigráfica generalizada del Cretáceo Inferior a Superior de la parte centrooriental de la cordillera Oriental de Colombia

Muestra las mineralizaciones hidrotermales de hierro

Fuente: Manjarrés (1966); Rodríguez (1971); Gil (1976)

**Tabla 15.** Depósitos producidos por enriquecimiento en superficie o cerca de ella. Lateritas, minerales principales: limonita, goethita

N.º	Tipo de depósito	Localidad	Autor
1	Lateritas	Montelíbano, Cerromatoso, Córdoba	Cruz (1971)
2	Lateritas	Dagua, Valle	Manjarres (1958)
3	Lateritas	Campamento, Morro Pelón, Antioquia	Alvarado (1940)
4	Lateritas	Medellín, Antioquia	Restrepo (1959), Cock (1952)
5	Lateritas	Amagá, Antioquia	Cock (1952)
6	Lateritas	Serranía de la Macarena, Meta	Paba (1950)

Fuente: Gilart *et al.* (2007)



**Figura 27.** Depósitos de lateritas de hierro en Colombia

Fuente: tabla 15, tomado de Ulloa (1987)

### 3.3. Situación actual de la minería

A la fecha, en los registros de la Agencia Nacional de Minería (ANM, 2017), existen 76 títulos vigentes con hierro entre los minerales a concesionar, con una área de 115 524.40 ha, de los cuales 12 están en etapa de construcción y montaje, 12 en exploración, 51 en explotación y uno con par en la gobernación de Antioquia, los cuales se encuentran localizados en los departamentos de Boyacá, Bolívar, Cesar, Córdoba, Santander, Atlántico, Huila, Chocó, Tolima, Santan-

der, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Casanare, La Guajira y Antioquia; con respecto a solicitudes mineras se reportan 255 vigentes, con un área de 445 595.26 ha, en los departamentos de Bolívar, Cesar, Córdoba, Santander, Atlántico, Huila, Chocó, Tolima, Santander, Cauca, Caldas, Cundinamarca, Casanare, La Guajira, Antioquia, Guaviare, Meta, Putumayo, Magdalena, Guainía y Quindío, y finalmente hay 25 solicitudes de contrato de legalización minera que abarcan un área de 11 467.81 ha.

### 3.3.1. Potencial

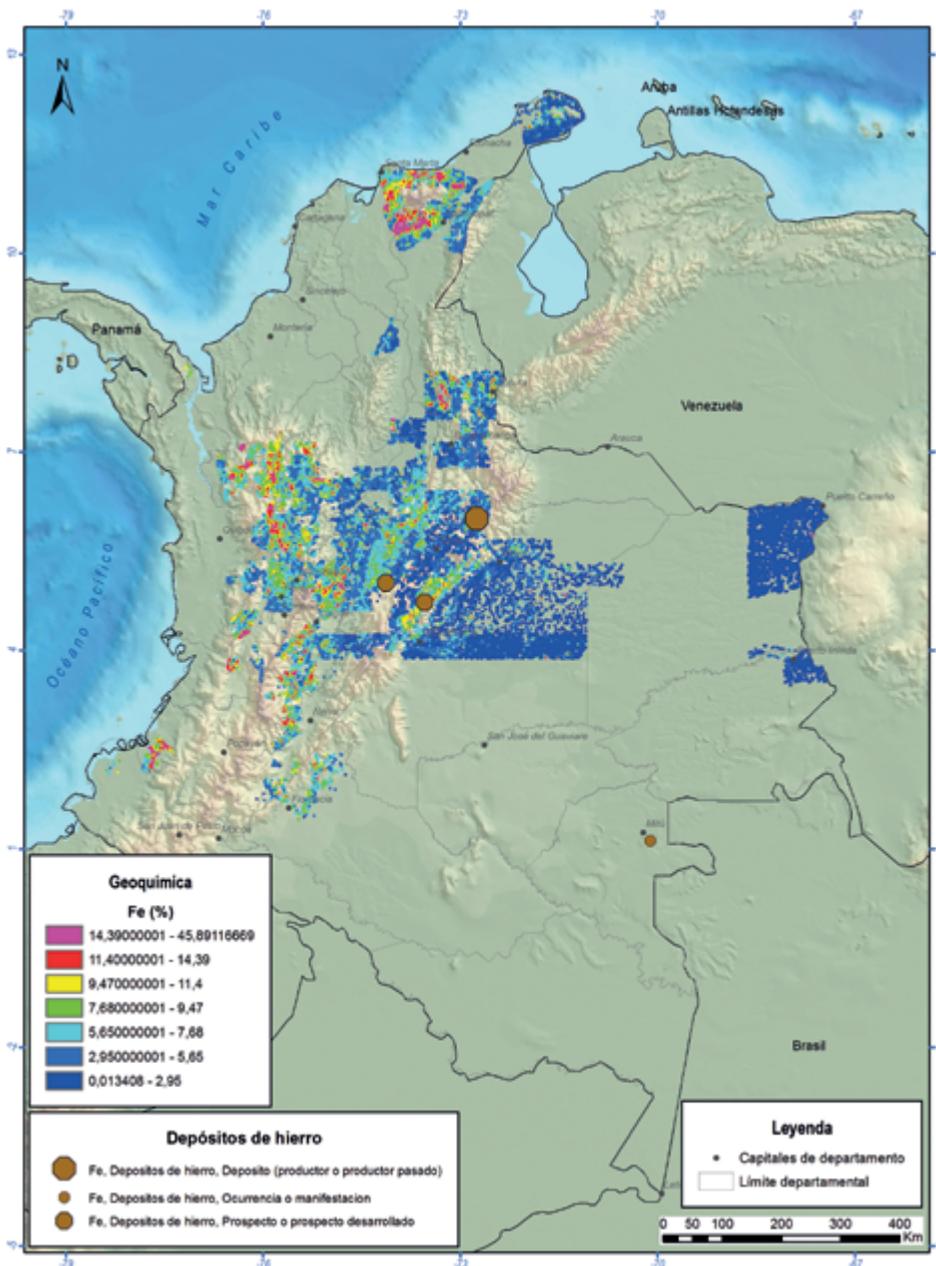
En el marco de las Provincias Litosféricas Grenvilliana (PLCMG) y Continental Paleoproterozóica Amazónica (PLCPA), existen ambientes favorables para la mineralización de hierro, en las cordilleras Central y Oriental, la Sierra Nevada de Santa Marta y el Escudo de Guyana.

Los prospectos que por el momento presentan mayor interés corresponden a Sabanalarga en Casanare, que en trabajos recientes indican un buen potencial de reservas, lo que unido a una mejora sustancial en la infraestructura del territorio permite considerar viable su explotación en un futuro próximo. De confirmarse la extensión y el espesor

de las capas de hierro bandeadas al suroeste de Mitú, constituirán la mayor reserva de hierro para el país.

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016*, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el Hierro se basó en su concentración en sedimentos (%) de 32331 registros analizados (SGC, 2016a) (figura 28).

Así mismo, el *Mapa Metalogénico de Colombia. Versión 2016* que muestra la distribución espacial y temporal de depósitos y ocurrencias o manifestaciones minerales en un contexto geológico, se presenta lo que a la fecha se encuentra validado (SGC, 2016b) (figura 28).

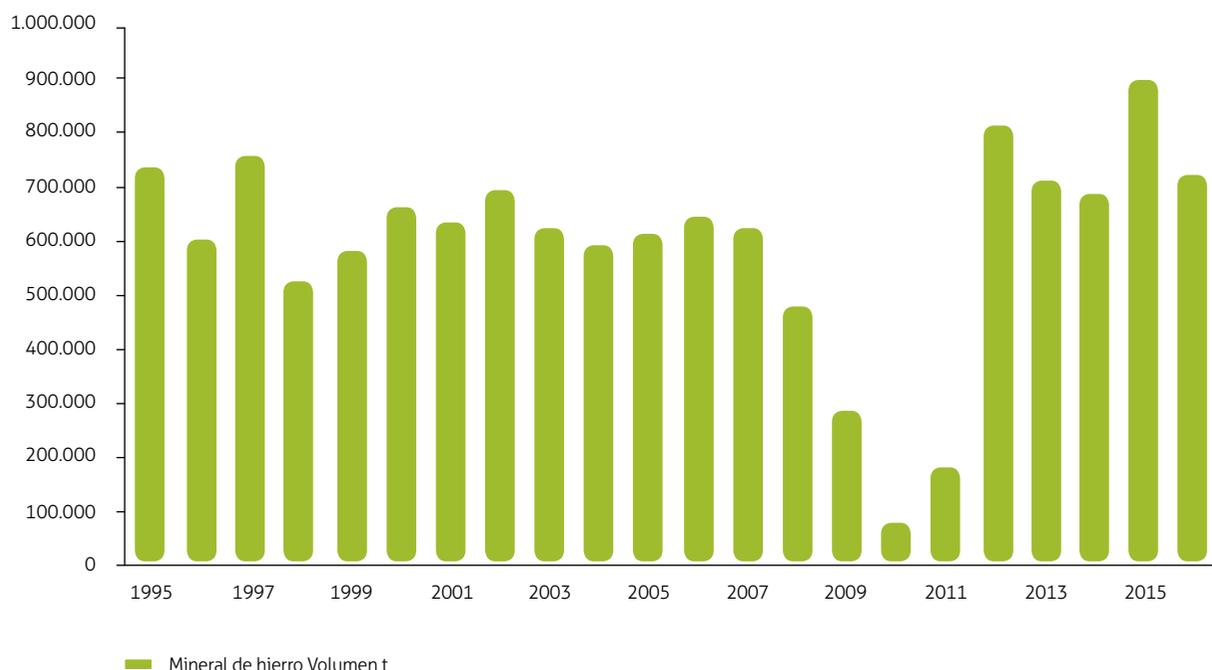


**Figura 28.** Distribución geoquímica del hierro en Colombia

Fuente: SGC (2016a y 2016b)

### 3.3.2. Comercio

La producción de concentrados y aglomerados de hierro en el periodo 1995-2016 promedia anualmente 595000 t (figura 29).



**Figura 29.** Producción de concentrados de hierro nacional, 1995-2016  
Datos en miles de toneladas

Fuente: SIMCO (2017)

Sin embargo, la producción de acero creció en los últimos cinco años como consecuencia del desarrollo económico del país y la actual coyuntura internacional del crecimiento de la economía de China, que incrementa la demanda en el mercado internacional. En la tabla 16 se presenta la producción de acero crudo y terminado, en el periodo 2012-2016 (Alacero, 2016).

**Tabla 16.** Producción de acero crudo y terminado, 2012-2016

Producción	2012	2013	2014	2015	2016
Acero crudo	1302	1236	1208	1211	1259
Acero terminado	1726	1650	1804	1860	1820

Datos en miles de toneladas

Fuente: Alacero (2016)

Con respecto a la composición de la producción de acero terminado, los productos no planos que incluyen alambraón, barras y perfiles tienen la mayoría de la producción (50 %), lo que está acorde con la orientación que tiene el sector hacia la industria de la construcción, por su alta demanda. Las formas intermedias, que incluyen planchones, techos y palanquilla constituyen el 46 % de

la producción; los productos planos que incluyen chapas y bobinas laminadas en caliente tienen el porcentaje más bajo de la producción total, con tan solo el 4 %. Los productos mencionados son absorbidos por la industria de la construcción y por el sector metalmeccánico. En la tabla 17 se muestran las diferentes formas de producción de acero en el periodo 2012-2016.

**Tabla 17.** Composición de la producción de acero semiterminado y terminado, 2012-2016

Producción	2012	2013	2014	2015	2016
Aceros largos	1291	1297	1394	1420	1349
Aceros planos	435	353	410	440	471

Datos en miles de toneladas

Fuente: Alacero (2016)

La producción nacional no suporta la demanda; por tanto, las importaciones de aceros terminados se hacen necesarias para complementar la oferta nacional, como se observa en la tabla 18. Este fenómeno probablemente se debe al menor costo y a la calidad de los aceros importados.

**Tabla 18.** Relación consumo frente a producción de acero en Colombia

Ítem	2012	2013	2014	2015	2016
Producción acero	1726	1650	1804	1860	1820
Demanda acero	3500	3500	4000	4000	4000

Datos en miles de toneladas

Fuente: Alacero (2016)

### 3.3.3. Perspectivas

Las perspectivas del mercado nacional estarán determinadas en gran medida por el comportamiento de los sectores industriales y de la construcción, así como por la definición de algunos factores de incertidumbre que pesan sobre la economía de Colombia, como el desarrollo del tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos (Gilart, 2006).

Al observar la tabla 16 se puede deducir un mayor crecimiento de la producción de las acerías semintegradas, con respecto a los aceros por el proceso integrado. Este fenómeno se debe al menor costo en la inversión para la producción de aceros por el proceso semintegrado.

Además, para producir buenos aceros vía alto horno es necesario contar con depósitos de alta calidad, con los cuales no cuenta el país. En cambio, por el proceso semintegrado pueden obtenerse con la importación de hierro de buena calidad o con chatarra de acero.

Es necesario llevar a cabo estudios tendientes a incrementar la exploración de las reservas de mineral de hierro. A corto plazo es importante estudiar los prospectos de Sabanalarga en Boyacá y los de la quebrada El Hierro en la Sierra Nevada de Santa Marta; asimismo es pertinente efectuar estudios detallados en la región de Mitú, donde al parecer existen grandes manifestaciones de hierro de estratos de hierro oolítico y estratos de hierro bandeado.

En caso de no confirmarse los prospectos y los yacimientos en el país será necesario seguir importando hierro y chatarra, lo cual requeriría pensar en localizar nuevas siderúrgicas semintegradas en sitios estratégicos en la costa Pacífica y en la costa Atlántica.

## 4. Aspectos ambientales y sustitutos

Concentraciones de hierro superiores a 200 mg/l en el agua son tóxicas para los humanos; asimismo la disponibilidad de hierro en los suelos puede afectar considerablemente el crecimiento de algunas plantas, la cual depende del Ph, del contenido de fosfatos y el contenido de otros metales (como Co). Algunas plantas como la papa, el frijol o el tomate son capaces de reducir la cantidad de hierro en los suelos. Por otra parte, concentraciones de 0.3 mg/l en el agua pueden producir pigmentación de color amarillo a café en las prendas de lavado y en los sanitarios.

Con respecto a los sustitutos, la única fuente primaria es el mineral de hierro, que se utiliza directamente como mineral en trozos, barras o concentrados; sin embargo, desde el 2003 la chatarra se está utilizando como materia prima para los productos de hierro o acero. Una pequeña cantidad de chatarra de hierro es reciclada (aproximadamente el 7 %), mientras que en la industria del acero se reciclan grandes cantidades (aproximadamente el 67 %).

Debido a sus características y abundancia el hierro no presenta grandes sustitutos de manera directa, pero sí presenta sustitutos de marea indirecta a través de su producto, el acero (Oyander y Shand, 2013).

## Referencias

- Agencia Nacional de Minería (ANM). (2017). *Estado actual de títulos y solicitudes mineras en Colombia*. Bogotá. Disponible en <https://www.anm.gov.co>
- Alfonso, R. y González, L. (1990). *Geología y evaluación económica de los prospectos de ilmenita, magnetita y apatito en el sector de Don Diego, Sierra Nevada de Santa Marta*. Bogotá: Ingeominas.
- Alvarado, B. (1940). *Informe sobre el yacimiento de hierro de Morro Pelón, municipio de Campamento, departamento de Antioquia*. Informe 8. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Alvarado, B. (1943). *Informe geológico general sobre los yacimientos de hierro y carbón de Guasca*. Informe 45b. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Arce, M. (1951). *Hierro de la región del alto El Rosario, Departamento de Bolívar*. Informe 73. Bogotá. Servicio Geológico Nacional.
- Arndt, N., y Ganino, C. (2012). *Metals and Society. An Introduction to Economic Geology*. Berlin: Springer.
- Asimet. (2005a). *Mineral de hierro en Latinoamérica. Brasil*. Disponible en [http://www.asimet.cl/hierro\\_brasil.htm](http://www.asimet.cl/hierro_brasil.htm)
- Asimet. (2005b). *Mineral de hierro en Latinoamérica. Venezuela*. Disponible en [http://www.asimet.cl/hierro\\_venezuela.htm](http://www.asimet.cl/hierro_venezuela.htm)
- Asociación Latinoamericana de Acero (Alacero). (2016). *América Latina en cifras 2016*. Santiago de Chile.
- Awrawik, S. (1977). Paleobiology of stromatolites. En *Chemical evolution of the early Precambrian*. Nueva York: Ponnampuruma.
- Barbosa, F. (2015). *Las cinco mayores minas de mineral de hierro en Brasil*. Disponible en <http://www.bnamericas.com/es/reportajes/mineria/las-cinco-mayores-minas-de-mineral-de-hierro-de-brasil>
- Bateman, A. (1957). *Yacimientos minerales de rendimiento económico*. Barcelona: Omega.
- Bravo, E. (2013). *Minería: arco minero Orinoco*. Disponible en <https://jfernandar.files.wordpress.com/2013/08/arco-minero-orinoco-emilio-bravo.pdf>
- Buenaventura, J. (1975). *Ocurrencias minerales en la región Norte del Departamento del Tolima*. Informe 1688. Bogotá: Ingeominas.
- Buitrago, C. (1975). *Ocurrencias minerales en la región central del departamento del Tolima*. Bogotá: Ingeominas.
- Buitrago, C. (1976). *Ocurrencias minerales en el departamento del Huila*. Informe 1698. Bogotá: Ingeominas.
- Camacho, R., Nigrinis, R. y Ulloa, C. (1972). *Investigación geológica del depósito de hierro oolítico del municipio de Sabanalarga, Boyacá*. Informe 1618. Bogotá: Ingeominas.
- Cock, J. (1952). *Reseña sobre los minerales de hierro del valle de Medellín*. Informe 1276. Bogotá: Ingeominas.
- Cox, D. y Singer, D. (1992). *Mineral Deposit Models*. Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Cruz, J. (1971). *Yacimientos de hierro en Colombia y depósitos de hierro en Suramérica. Informe 1584*. Bogotá: Ingeominas.
- Cruz, J. y Camacho, R. (1971). *Informe sobre las investigaciones geológico- mineras en el yacimiento de hierro de Ubalá, Cundinamarca*. (Informe). Bogotá: Ingeominas.
- Edwards, R. y Atkinson, K. (1985). *Camburme*. Londres-Nueva York: Chapman and Hull.
- Ferrominera Orinoco. (s.f.). <http://www.ferrominera.com>.
- Fersman, A. (1945). *Libros maravillosos. Geoquímica recreativa*. Disponible en <http://www.librosmaravillosos.com/geoquimica/index.html>
- Frietsch, R. (1968). Precambrian iron ores of sedimentary origin in Sweden. En *Genesis of Precambrian iron and manganese deposits. Symposium*. Stockholm: Geological Survey of Sweden.
- Frietsch, R. (1973). The origin of the Kiruna iron ores. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 95(4), 375-380.
- Galvis, J. y Gómez, L. (1998). Hierro bandeado en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 22(85), 485-496.
- Galvis, J., Hugett, A. y Ruge, P. (1979). Geología. En *La Amazonía colombiana y sus recursos. Proyecto radargramétrico del Amazonas*. Bogotá: Instituto de Investigaciones Geológico Mineras.
- Garcés, H. (1995). *Geología económica de los yacimientos minerales - Yacimiento de Colombia - Minerales metálicos*. Medellín: Clave.
- Garrels, R., Perry, E. y Mackenzie, F. (1973). Genesis of Precambrian iron formation and the development at atmospheric oxygen. *Economic Geology*, 68(7), 1173-1170.
- Gaucher, C. (s. f.). Contexto geológico y económico de la minería de hierro en Uruguay y el mundo. *Sociedad Uruguaya de Geología*. Disponible en [http://www.sugeologia.org/documentos/Gaucher\\_Jornada\\_Mineria\\_Fe.pdf](http://www.sugeologia.org/documentos/Gaucher_Jornada_Mineria_Fe.pdf)
- Geijer, P. (1919). Recent developments at Kiruna. *Sveriges Geologiska Undersökning*, (288), 1-22.
- GeoColombia. (1968). *Exploraciones geológico-mineras de un yacimiento de mineral de hierro en Ubalá, Cundinamarca*. Bogotá.
- Gil, E. (1976). *Ocurrencias minerales en el departamento de Cundinamarca*. Informe 1708. Bogotá: Ingeominas.
- Gilart, R. (2006). *Situación del mercado nacional e internacional del hierro y acero*. Bogotá: GI Georecursos SAS.
- Gilart, R., Ulloa, C., Ramos, A. y Domínguez, E. (2007). *Informe preliminar Exploración Hierro Sabanalarga*. Bogotá: GI Georecursos SAS.
- 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
- González, L. (2000). Análisis financiero para mineralizaciones de ilmenita en la Sierra Nevada de Santa Marta. *Boletín Geológico*, 38(1-3), 1-8.

- Goodwin, A. (1973). Archean Iron formation and tectonic basin of Canadian Shield. *Economy Geology*, 68, (7), 915-933.
- Gross, G., Gower, C. y Lefebure, D. (1997). Magmatic Ti-Fe±V Oxide Deposits. En *Geological Fieldwork* 1997, (1), 24J-1-24J-3.
- Guilbert, J. y Park, J. (1985). *The Geology of Ore Deposits*. Dallas: Fremman and Company.
- Hubach, E. (1940). *Exploración Geológica del yacimiento de hierro de El Codito, hacienda de La Pradera, Municipio de Subachoque*. Informe 439. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Hubach, E. (1952). *Yacimiento de mineral de hierro, carbón y de Caliza en Colombia, como base de la industria siderúrgica*. Informe 874. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Hubach, E. (1953). *El yacimiento de Limonita de "Cueva de Chulos". Municipio de Guatavita. Departamento de Cundinamarca*. Informe 909. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- InfoAcero. (s.f). *Historia del acero*. Disponible en <http://www.infoacero.cl/acero/historia.htm>
- Invemar; Ingeominas; Ecopetrol; ICP y Geosearch (2007). *Geología de la plancha 12*. Bogotá: Ingeominas.
- James, H. (1954). Sedimentary facies of iron formation. *Economy Geology*, 49(3), 235- 293.
- Klemic, H., James, H. L. y Eberlein, G. (1973). United States Mineral Resources – Iron. *Geological Survey Paper*, 820, 291-306.
- Lemoalle, J. y Dupont, B. (1973). *Iron bearing oolites and the present condition in Lake Chad (Africa)*. Berlín: Amstutz and Bermanrd.
- Linares, F. y Arraiz, D. (2015). *Geociencias aplicadas latinoamericanas. Mapa de anomalías de Bouguer de Venezuela derivado del modelo combinado EIGEN-6C4*. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/291525880\\_Mapa\\_de\\_anomalias\\_de\\_Bouguer\\_de\\_Venezuela\\_derivado\\_del\\_modelo\\_combinado\\_EIGEN-6C4](https://www.researchgate.net/publication/291525880_Mapa_de_anomalias_de_Bouguer_de_Venezuela_derivado_del_modelo_combinado_EIGEN-6C4)
- Lunar, R. (1977). *Mineralogénesis de los yacimientos de hierro del nordeste de la península*. Memoria. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Mackin, J. (1947). *Some structural features of the intrusions in the iron spring district, Utah*. En *Guide Book to the Geology of Utah*. Salt Lake City: Utah Geological Association.
- Manjarres, G. (1958). *Minerales de hierro en Cerro Chancos, municipio de Dagua, departamento del Valle del Cauca*. Informe 1285. Bogotá: Ingeominas.
- Manjarrés, G. (1966). *Yacimiento de hierro de Tibirita*. Informe 1346. Bogotá: Ingeominas.
- Mariño, J. (1976). *Ocurrencias Minerales en el departamento de Boyacá*. Compilación. Informe 1710. Bogotá: Ingeominas.
- McLaughlin, D. y Arce, M. (1972). Recursos minerales de parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Meta. *Boletín Geológico*, 19(1), 10-21.
- Mutis, V. (1943). *El yacimiento de hierro del "Espíritu Santo" en el corregimiento de Sevilla*. Informe 269. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Ohmoto, H., Watanabe, Y. y Yamaguchi, K. (2006). Chemical and biological evolution of early Earth: Constraints from banded iron formations. En *Evolution of Early Earth's Atmosphere, Hydrosphere and Biosphere- Constraints from Ore Deposits* Colorado: T. G. America, S. Kesler y H. Ohmoto.
- Otero, A. (1975). *Ocurrencias minerales en el Departamento de Santander. Informe 1686*. Bogotá: Ingeominas.
- Oyander, J. y Shand, C. (2013). *Mercado Mundial de Hierro: Demanda*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Paba, F. (1950). *Yacimientos de hierro de Rovira y el Valle. Departamento del Tolima*. Informe 629. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Parak, T. (1975). *Kiruna iron ores are not "intrusive-magmatic ores of the Kiruna type"*. *Economic Geology*, 70(7), 1242-1258. Doi: 10.2113/gsecongeo.70.7.1242
- Philpotts, A. (1967). *Origen of certain iron- titanium oxide and apatite rocks*. *Economic Geology*, 62(3), 303-315.
- Restrepo, G., Cepeda, H. y Núñez, A. (1975). *Contribución al conocimiento de los yacimientos de hierro oolítico de Paz de Río (Petrogénesis y facies)*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Restrepo, H. (1959). *Mineral de hierro, lateritas, al norte de Medellín*. Informe 1329. Bogotá: Inventario Minero Nacional.
- Reyes, I. y Valentino de Reyes, M. (1976). *Geología y características geológicas y geoquímicas del Banco Mineral de Hierro en el yacimiento de Buenos Aires*. Memoria del I Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.
- Reymond, C. (1942). *Yacimientos de magnetita de Espíritu Santo, corregimiento de Servilla, Ciénaga. Magdalena*. Informe 293. Bogotá: Servicio Geológico Nacional.
- Rodríguez, E. (1971). *Ocurrencias minerales en el cuadrángulo K-12 y parte del K-11. Informe 1581*. Bogotá: Ingeominas.
- Rodríguez, E. y Ulloa, C., (1979). *Geología de las planchas 170: Vélez y 190: Chiquinquirá*. Informe No. 1794. Bogotá: Ingeominas.
- Salinas, R., Rodríguez, C., Lozano, H. y Solano, F. (1999). *Mapa metalogénico de Colombia*. Informe 2259. Bogotá: Ingeominas.
- Sarmiento, R. y Alvarado, B. (1944). *Informe 468. Cuadrángulos I13, J13*. Bogotá. Ingeominas.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016a). *Atlas Geoquímico de Colombia. Versión 2016*. Concentración de Hierro (Fe). Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016b). *Mapa Metalogénico de Colombia*. Bogotá.
- Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). (2017). *Producción de hierro*. Disponible en [http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes\\_SIMCO/Paginas/MSPH1.aspx](http://www1.upme.gov.co/simco/Reportes_SIMCO/Paginas/MSPH1.aspx).

- Tchanz, C., Buenaventura, J. y Jimeno, J. (1970). Recursos minerales de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Boletín Geológico*, 18(1).
- Torres, E., López, M. y Nivia, A. (2013). *Geología de la plancha 229. Gachalá. Escala 1: 100 000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Ulloa, C. (1979). Hierro oolítico en el Norte de Suramérica. *Memorias del IV Congreso Latinoamericano de Geología*. Trinidad y Tobago.
- Ulloa, C. (1987). *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Ulloa, C., Guerra, A., y Escovar, R. (1998). *Geología de la plancha 172: Paz del Río. Escala 1: 100 000*. Bogotá: Ingeominas.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2005). *Boletín estadístico de minas y energía 1999-2005*. Disponible en: [www.upme.gov.co/docs/boletin\\_estadistico\\_1999\\_2005.pdf](http://www.upme.gov.co/docs/boletin_estadistico_1999_2005.pdf). Bogotá: El Autor.
- United States Geological Survey (USGS). (1997). *Mineral Commodity Summaries 1997* en Iron and Steel. Disponible en [https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron\\_&\\_steel/350397.pdf](https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/350397.pdf)
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Mineral Commodity Summaries 2017. Chromium*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>
- Vesga, C. (1972). *Reconocimiento Geológico y Geoquímico preliminar del río Guaviare*. Informe 1631. Bogotá. Ingeominas.
- Wikimedia. (2017). *Brazil map en 2004*. Wikimedia Commons. Disponible en [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Brazil\\_map\\_en\\_2004.png&oldid=258413866](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Brazil_map_en_2004.png&oldid=258413866)
- Wopfner, H. y Schwarzbach, M. (1976). *Ore deposits in the light of paleoclimatology*. En *Handbook of strata-bound and Strati-form Ore Deposits*, 3, 43-92.
- World Steel Association. (2016). *Steel Statistical Yearbook 2016*. Disponible en <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:37ad1117-fefc-4df3-b84f-6295478ae460/Steel+Statistical+Yearbook+2016.pdf> Bruselas.



Siderita y hematita  
 Servicio Geológico Colombiano  
 Fotografía: Alejandra Cardona, SGC