

Tipo de artículo: artículo de investigación

Génesis, litología y mineralogía de depósitos ferríferos con alto grado de metamorfismo

Ernesto Armando Núñez Avila
<https://orcid.org/0000-0002-1212-4719>
enunez@orinoco-iron.com
Orinoco Iron SCS
Ciudad Guayana, Venezuela

Jesús Ramón Lopez Hércules
<https://orcid.org/0009-0006-4577-6728>
jlopez@unexpo.edu.ve
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz
Ciudad Guayana, Venezuela

Cesar Alfredo Bisier Marín
<https://orcid.org/0009-0007-6391-3260>
calfredbis@gmail.com
Universidad de Oriente - UDO
Ciudad Bolívar, Venezuela

Genaro José Stabilito Casares
<https://orcid.org/0009-0003-1301-8103>
genaros9500@gmail.com
Universidad de Oriente - UDO
Ciudad Bolívar, Venezuela

Correspondence author: enunez@orinoco-iron.com

Received (05/04/2024), Accepted (25/08/2024)

Resumen: En este estudio se presenta una investigación documental de la génesis del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro, ubicado en el Estado Bolívar, Venezuela, con énfasis en la mina de Los Barrancos, describiendo el origen de las cuarcitas ferruginosa y la formación por metamorfismo de las diferentes menas de hierro. La metodología para la evaluación de estas menas estuvo compuesta por una caracterización mineralógica, un análisis químico y una inspección macroscópica, para luego clasificarlas por su mineralogía y textura. Los principales resultados muestran que fue posible definir la génesis, la litología y la mineralogía de este depósito ferrífero.

Palabras clave: menas de hierro, litología, mineralogía.

Genesis, lithology and mineralogy iron ore deposits with high-grade metamorphism

Abstract. - This study presents a documentary investigation of the genesis of the San Isidro Ferrous Quadrilateral, located in the Bolivar State, Venezuela, with emphasis on Los Barrancos mine, describing the origin of the ferruginous quartzites and the formation by metamorphism of the iron-ore lithologies. The methodology for the evaluation of these ores was composed of a mineralogical characterization, a chemical analysis and a macroscopic inspection, to then classify them by their mineralogy and texture. The main results show that it was possible to define the genesis, lithology and mineralogy of this ferrous deposit.

Keywords: iron ore, lithology, mineralogy.

I. INTRODUCCIÓN

Las formaciones y depósitos de menas de hierro han sido de gran interés en el campo de la geología y la mineralogía, en la actualidad, con la alta demanda de acero a nivel global y mayores exigencias para hacer a los procesos industriales más productivos y con menores consumos energéticos e impactos ambientales, es de imperiosa necesidad, el conocer a fondo los orígenes y características de estas menas con el fin de optimizar su procesamiento. Los grandes productores de menas de hierro están dedicando líneas de investigación al estudio geometalúrgico de estos depósitos, un ejemplo de ello son las investigaciones llevadas a cabo por *The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)* en áreas de la génesis, geología, geometalurgia, exploración, minería y procesamiento de menas de hierro. Los depósitos de mineral de hierro alojados en formaciones de hierro representan la mayor parte de la producción mundial actual de mineral de hierro [1], los depósitos de alto tenor formados por enriquecimiento hidrotermal y supergénico de formaciones bandeadas de hierro (BIF o *Banded Iron-Formation*) constituyen la fuente más importante de minerales de hierro [2], por lo que es necesario el poder clasificar las menas de estos depósitos por su mineralogía y textura para poder definir sus mezclas que se adecuen a las exigencias del mercado siderúrgico.

Estudios similares al presentado en esta investigación se han desarrollado en la zona oriental de la India, encontrándose que la caracterización geoquímica y mineralógica de sus depósitos de hierro sugiere que las texturas de las menas de hierros masivas, laminadas duras, laminadas blandas y friable en microplacas (*blue dust*) tenían un linaje genético con las BIF ayudado con ciertos aportes de actividad hidrotermal [3]. Otro estudio, llevado a cabo en Carajás, Brasil, menciona que la génesis de los minerales de hierro lateríticos derivados de las BIF consiste principalmente en la disolución de bandas de cuarzo, oxidación, fracturación, colapso e hidrolización de algunos silicatos primarios y neoformación de minerales de hierro-aluminio, tales como como Al-goethita y gibbsita. La historia de la meteorización comienza con la oxidación de los cristales de magnetita a hematita, inicialmente preservando el volumen de BIF erosionado. La descomposición de cuarzo y la lixiviación de la sílice aumenta la porosidad, generando una gama de minerales de hierro altamente porosos. La pérdida de volumen provocó la rotura y el colapso de las bandas de hierro, mientras que el cuarzo se lixivia casi por completo. La corteza de hierro cubre el perfil de meteorización y contiene martita y hematitas en microplacas, cementadas con goethita [4].

Se espera que las investigaciones en las áreas mencionadas contribuyan en última instancia a mejorar procesos de beneficio y, por lo tanto, recuperación de Fe potencialmente mejorada [5], de allí la importancia de realizar una evaluación del cuadrilátero ferrífero San Isidro, del distrito ferrífero Piar, ubicado al sureste de Venezuela, siendo este el principal yacimiento de hierro en explotación en este país. El trabajo incluye un desarrollo donde se exponen aspectos teóricos, la metodológica aplicada, los resultados obtenidos y por último las conclusiones.

II. DESARROLLO

A. Menas y Minerales de Hierro

Una mena es una roca o material natural compuesto de un mineral o minerales de valor económico que puede extraerse con un beneficio razonable. Un mineral es, por definición, un sólido homogéneo de origen natural con una estructura definida, pero composición química no fija y disposición atómica muy ordenada. Puede ser formado por procesos tanto inorgánicos como orgánicos [6] y [7]. En inglés estos términos se denominan Ore para la mena y Mineral para el mineral. Los minerales de hierro más comunes son magnetita, hematita y goethita, que en conjunto representan aproximadamente más del 99% de los minerales contenidos en las menas de hierro comercializadas a nivel mundial [5]. La magnetita (Fe_3O_4) es un mineral de hierro común en depósitos de zonas metasedimentarias y de origen magmático.

La hematita (Fe_2O_3) se forma a partir de la oxidación de la magnetita en un ambiente superficial cercano y se puede lograr también mediante un cambio de pH sin reacciones de óxido-reducción. La goethita es un oxihidróxido de hierro ($\alpha\text{-FeOOH}$), que se cree que es el mineral de hierro más común en los depósitos sedimentarios y cercanos a la superficie, metasedimentarios alterados [5].

Algunos autores han reconocido que, si bien la mineralogía de muchas menas de hierro es relativamente simple, las texturas de estas menas suelen ser bastante complejas y están directamente relacionadas con la génesis de las menas del depósito. Además, se ha proporcionado evidencia de que son estas texturas complejas y no solo la mineralogía las que controlan el rendimiento de los procesos metalúrgicos [8] y [1].

B. Formaciones Geológicas de Menas de Hierro

La formación primaria de hierro no enriquecido es una fuente importante de mineral de hierro en muchas partes del mundo, especialmente en la República Popular China y América del Norte, e incluye tanto a las formaciones de magnetita y hematita ricas en hierro. En Australia, África, Brasil y Venezuela se ha extraído poco mineral de hierro no enriquecido minado hasta la fecha, debido a la presencia de recursos significativos de menas de alto tenor y fácilmente beneficiables de hematita y magnetita-goethita [5]. Se ha estimado que más del 95% de todos los depósitos de menas de hierro explotadas a la fecha de hoy son de origen sedimentario, originándose como precipitados químicos del agua del océano, de los cuales los depósitos de menas de hierro alojados en las formaciones de hierro son el ejemplo más abundante. Las formaciones de hierro se han dividido en tres subtipos según la textura y la edad geológica del huésped de la formación de hierro: Las formaciones bandeadas de hierro (BIF o Banded Iron-Formation), Las formaciones granulares de hierro (GIF o Granular Iron-Formation) y Las formaciones de hierro rapitan (RIF o Rapitan Iron-Formation) [2].

Las BIF, se depositaron en cuencas intracratónicas de márgenes continentales pasivas, plataformales, durante períodos de alto nivel del mar, transgresivos, particularmente en el Neoarqueozoico y en el Paleoproterozoico. El hierro en estas formaciones es de origen volcánico hidrotermal (exhalativo) [9].

C. Depósitos de Menas de Hierro en Venezuela

En Venezuela se pueden identificar, por lo menos, los siguientes sistemas fisiográficos, controlados por las características litológicas y tectónicas de cada región: Sistema Andino, Sistema Montañoso del Caribe, Precordilleras y Pie de monte, Planicie del Lago de Maracaibo y Planicies Costeras, Sistema de los Llanos, Sistema Deltáico Oriental y el Escudo de Guayana [9]. El Escudo de Guayana se extiende al sur del Río Orinoco. En este, fisiográficamente, se diferencian cuatro provincias geológicas: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima [9]. Imataca es la provincia del hierro y, en ella se pueden distinguir, según el tamaño del grano, tres grandes tipos de depósitos de menas de hierro, que son los siguientes [10]: Depósitos de hierro de grano grueso (mayor a 1 mm), tipo El Pao, Las Grullas y Picoa; Depósitos de hierro de grano medio (1 mm), tipo Cerro María Luisa; y Depósitos de hierro de grano fino (menor a 1 mm), tipos Cerros Bolívar, San Isidro, Los Barrancos, El Trueno, Altamira, Redondo, Toribio y Arimagua. Los depósitos de menas de hierro, que se cree que son de tipo Algoma o Lago Superior, son abundantes en la provincia Imataca, pero, porque las rocas de la provincia Imataca están muy deformadas y metamorfoseadas en anfíbolita y facies de granulita, el ambiente de deposición de las menas de hierro es difícil de determinar y asignar a este modelo, es incierto. Estos depósitos de hierro están compuestos de finas y alternas capas de minerales de cuarzo y óxido de hierro (hematita, goethita y en menor proporción magnetita) [11].

El Distrito Ferrífero Piar, donde en la actualidad se ejecutan las operaciones mineras en Venezuela, tiene como basamento las BIF anfibolitas, gneises piroxénicos y gneises tonalíticos. Mendoza considera a las menas de hierro tipo Cerro Bolívar y San Isidro, equivalentes al tipo Dos Carajás en Brasil y recomienda que el Complejo metamórfico de Imataca debe ser re-estudiado con mucho mayor detalle, tanto geológica como geoquímica y geofísicamente, así como tratar de obtener nuevas determinaciones radiométricas, para determinar los diferentes eventos tectonometamórficos y el protolito registrados en esas rocas [9]. Este Distrito Ferrífero se originó a partir de la cuarcita ferruginosa de Imataca mediante enriquecimiento supergénico. El proceso de generación de los minerales consistió en la eliminación por meteorización de la sílice y silicatos de las cuarcitas ferruginosas, y la consiguiente concentración residual de óxidos e hidróxidos de hierro. El proceso de enriquecimiento supergénico de las cuarcitas ferruginosas ha originado diferentes tipos de minerales según la intensidad y naturaleza del proceso. Los principales cambios son: la magnetita se oxida a hematita y martita, los minerales de ganga como piroxenos y anfíboles se reemplazan por goethita, lo que da como resultado esencialmente hematitas – goethitas – minerales de martita, figura 1 [12].

Los depósitos de menas de hierro tipo el Cerro Bolívar y San Isidro (con los siguientes tipos de menas desde la superficie a la zona profunda: cangas y ripios, costras, finos marrones, finos negros, finos negros silíceos y cuarcitas parcialmente lixiviadas), figura 1, se formaron por lixiviación de sílice (son tipo óxidos), a 600-800 m.s.n.m., nivel Imataca, desde hace unos 20 o más millones de años a partir de "itabiritas" o cherts ferruginosos, de grano fino a muy fino [13].

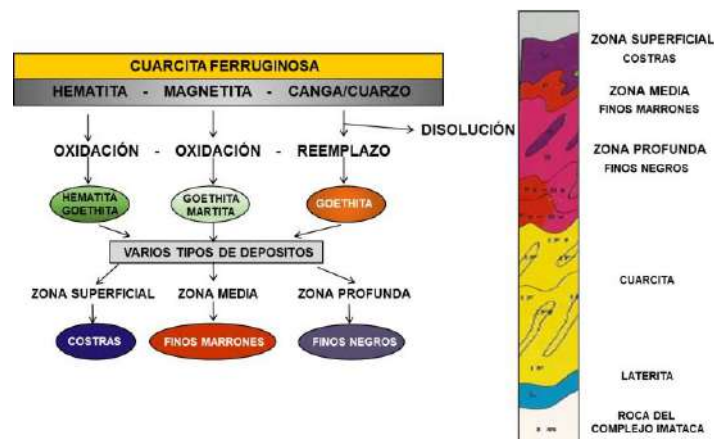


Fig. 1. Esquema del enriquecimiento supergénico de las menas de hierro del cuadrilátero ferrífero San Isidro.

El Cuadrilátero Ferrífero de San Isidro representa la mayor de las reservas de hierro conocido en Venezuela. Está ubicado en la parte más meridional de la provincia Imataca cerca de la zona de la falla de Guri y consta de cuatro yacimientos: San Isidro, Las Pailas, San Joaquín y Los Barrancos. De acuerdo a Ferencic las menas se depositaron como un precipitado químico de origen volcánico exhalativo. La composición química promedio del mineral del cuadrilátero es Fe, 61-68 por ciento; SiO₂, 0,5-4,05 por ciento; Al₂O₃, 0,6 por ciento; PPC, 3-4 por ciento; y P₂O₅, 0,01-0,45 por ciento [14].

Venezuela ocupa la novena posición a nivel mundial en reservas de mineral de hierro y cuarta posición a nivel del continente americano. Dispone de 14.575 millones de toneladas en reservas geológicas, de las cuales 18% son medidas, 17% indicadas y 65% inferidas. De un total de 2.651 millones de toneladas de reservas medidas, el 51% (1.353 MMT) son de alto tenor y de 1.299 millones de toneladas medidas de mineral de bajo tenor friable [15]. La ubicación de estos yacimientos se muestra en la figura 2 [15].

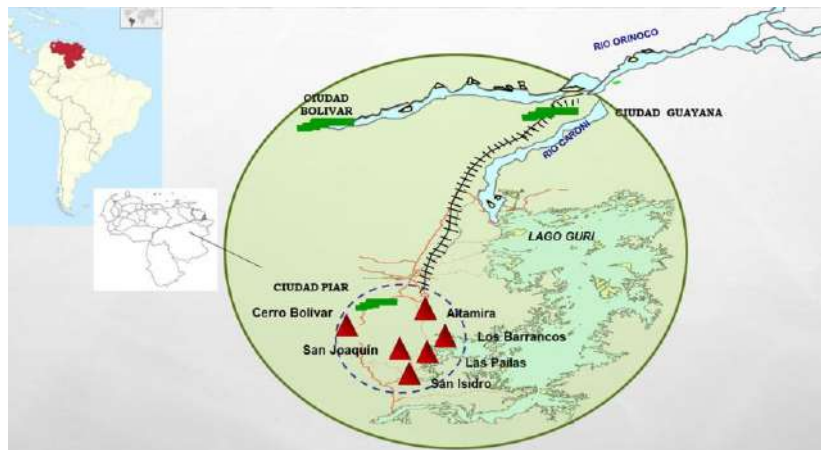


Fig. 2. Localización de los principales yacimientos de hierro en Venezuela.

III. METODOLOGÍA

La presente investigación partió de un análisis documental para el estudio de la génesis de cuadrilátero ferrífero San Isidro, acompañada de una investigación cuantitativa descriptiva, al realizar un muestreo por conveniencia, representativo de las menas de hierro presentes en el yacimiento, para su posterior caracterización tecnológica, y así determinar su mineralogía, composición química y textura. El criterio utilizado para la aplicación del muestreo por conveniencia es debido a que este estudio, desde el punto de vista geológico, es exploratorio y porque debido a las condiciones del yacimiento es difícil y costoso realizar un muestreo probabilístico. Es importante mencionar que para la selección de las zonas de muestreo y toma de los incrementos se tomó en cuenta el modelo geológico, lo que permite hacer más representativas a las muestras recolectadas.

La caracterización tecnológica incluyó análisis químicos, físicos, estudios macroscópicos y microscópicos con el fin de comprender las características texturales y microestructurales de las menas. Los métodos de análisis aplicados fueron: la titulación por vía húmeda, la foto-colorimetría, la absorción atómica, la espectrometría de masa con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la fluorescencia de rayos X, siguiendo los estándares de las normas ISO para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Los estudios macroscópicos se realizaron con la observación directa, uso de lupas y amplificador de imagen digital USB, considerando las siguientes características físicas: Color, Brillo, Forma, Textura, Fractura y Tenacidad, utilizando el formulario "Identificación y cuantificación de menas de hierro", donde son clasificadas las menas de acuerdo a las características mencionadas. Las texturas fueron determinadas por revisión bibliográfica y comparación con imágenes de otras menas de minerales, no se consideraron estudios adicionales debido al alcance de la investigación que abarca solo la clasificación de las menas por mineralogía y textura. Para la microscopía óptica se utilizó un microscopio de luz polarizada para la detección de los minerales presentes y con una preparación de muestras que requirió su molienda a un tamaño de partícula menor a 325 mallas y su montaje en baquelita. El método utilizado para determinar la composición mineralógica (porcentaje en peso) fue el conteo de las especies mineralógicas por campo de visión del microscopio (500 partículas equivalentes a 50 campos), en una porción de muestra que le es medido su volumen aparente. El conteo de partículas se registra en un formato para posteriormente proceder a calcular las proporciones volumétricas y las proporciones en peso ponderadas por la densidad de los minerales. La aplicación de esta metodología fue porque permitió diferenciar los tipos de hematita y su accesibilidad. Al ser caracterizadas mineralógicamente las menas de hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro es notoria la gran variabilidad en cuanto a proporciones y minerales presentes (tabla 1), confirmándose las alternancias de capas de minerales de óxido de hierro (hematita, goethita y en menor proporción magnetita) y que los depósitos se originaron por metamorfismo y enriquecimiento supergénico (secundario) por lixiviación.

IV. RESULTADOS

Tabla 1. Mineralogía de Menas de Hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.

Mena	%Peso				
	Hematita	Ghoethita	Magnetita	Cuarzo	Agregado Terroso
Finos Negros (FN)	98,90	0,02	0,37	0,61	0,00
Finos Negros Silíceos (FNS)	96,13	1,46	1,54	0,86	0,00
Ultra Finos Negros (UFN)	99,90	0,03	0,03	0,04	0,00
Finos Marrones (FM)	78,40	17,22	2,65	0,00	1,69
Finos Marrones Silíceos (FMS)	75,13	11,90	2,32	10,18	0,35
Costra Hematítica (CH)	88,66	7,92	3,10	0,00	0,33
Costra Laminada (CLa)	64,24	34,72	0,17	0,00	0,86
Costra Masiva (CM)	53,37	45,55	0,19	0,00	0,88
Costra Limonítica (CLi)	35,45	62,31	0,11	0,07	2,06
Canga	59,13	38,82	0,42	0,36	1,27

Al evaluar la mineralogía de las menas de la superficie (costras) a zona profunda (finos) se observa que las menas se van deshidratando (menor contenido de goethita). En las costras, sin considerar la hematítica, el rango de contenido de goethita es del 34,72% al 62,31%, los finos marrones, que se podrían considerar una degradación de las costras, tienen un contenido de goethita de 11,90 a 17,22% y por último los finos negros con muy bajos contenidos de goethita de 0,02 a 1,46%. Todo lo contrario, ocurre con los contenidos de hematita que se va enriqueciendo desde un 35,45% para la Costra Limonítica hasta un 98,90% para los Finos Negros (figura 3).

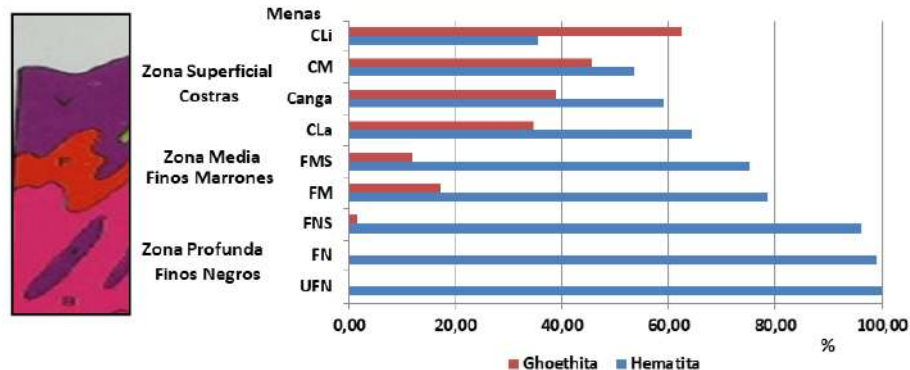


Fig. 3. Porcentajes de hematita y goethita en Menas de Hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro agrupadas por zona superficial, media y profunda del yacimiento.

Debido al metamorfismo presente, de oxidación, reemplazo y disolución, de igual manera se presentan diferentes tipos de hematitas (tabla 2), siendo resaltante la presencia de proporciones altas de martita en la costra limonítica, costra laminada, finos marrones y finos negros.

Tabla 2. Mineralogía de Menas de Hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro – Tipos de Hematitas.

Mena	%Peso					
	Hematita Tabular	Hematita Granular	Hematita Tabular Policristalina	Hematita Granular Policristalina	Hematita Lobular	Martita
Finos Negros	14,29	14,01	3,50	8,56	17,13	41,41
Finos Negros Silíceos	3,67	2,92	3,04	3,74	71,75	11,01
Ultra Finos Negros	28,42	49,17	5,79	10,87	2,17	3,47
Finos Marrones	4,06	2,98	1,72	1,55	47,29	20,80
Finos Marrones Silíceos	6,15	8,65	0,00	0,00	13,92	46,41
Costra Hematítica	23,21	35,16	0,19	0,31	23,89	5,89
Costra Laminada	0,00	0,00	0,00	0,00	25,74	38,50
Costra Masiva	9,77	13,39	0,47	0,19	22,64	6,92
Costra Limonítica	0,93	1,41	0,00	0,11	16,67	16,34
Canga	13,38	14,63	0,53	0,53	22,67	7,37

En términos generales, se pueden considerar a las menas de hierro de Cuadrilátero Ferrífero San Isidro como menas hematíticas – ghoetíticas, (tabla 3) siendo las hematíticas los finos negros y la costra hematítica, esperándose altos contenidos de hierros en estas menas, en el resto de menas prevalece también una alta proporción de hematita combinada con goethita. Solo la costra limonítica presentó un mayor contenido de goethita. Se le agrega la clasificación de hematítica martítica para algunas menas por la alta proporción presente de este tipo de mineral.

La mineralogía en conjunto con su génesis define la textura de las menas de hierro, para evaluarlas se consideró el mismo criterio aplicado a la mineralogía, de superficie (costras) a zona profunda (finos) (tabla 3). En el tope o superficie encontramos menas duras cementadas por la presencia de minerales hidratados (goethita) y minerales de ganga, debido al efecto de la deshidratación y lixiviación se modifica su textura a menas blandas y friables en la base o zona profunda del depósito.

Tabla 3. Clasificación de Menas de Hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro por Mineralogía y Textura.

Mena	Mineralogía	Textura
Finos Negros	Hematítica Martítica	Friable Microplacas
Finos Negros Silíceos	Hematítica	Friable Microplacas
Ultra Finos Negros	Hematítica	Friable Microplacas
Finos Marrones	Hematítica Martítica – Ghoetítica	Friable Microplacas
Finos Marrones Silíceos	Hematítica – Ghoetítica	Friable Microplacas
Costra Hematítica	Hematítica	Dura Bandeada
Costra Laminada	Hematítica Martítica – Ghoetítica	Dura Laminada
Costra Masiva	Hematítica – Ghoetítica	Dura Masiva -
Costra Limonítica	Ghoetítica – Hematítica	Blanda Terrosa
Canga	Hematítica – Ghoetítica	Dura Cementada

Su condición de mena con textura bandeada, laminada, masiva, terrosa o cementada es dada por las condiciones de presión y temperatura a la que ha estado sometida la roca durante su metamorfismo. Las texturas de las menas son típicamente complicadas y están directamente relacionadas a la génesis del depósito de mena y es esta compleja textura y no la mineralogía solamente que controla el comportamiento en un proceso metalúrgico [1]. La dureza es claramente independiente de solo la mineralogía, por ejemplo, las menas hematíticas varían de duras (costra hematítica) a friables (finos negros). Las menas duras tienen baja porosidad con mineralogías hematíticas – goethíticas, hematíticas martíticas – goethíticas. Friable es el término usado para describir las menas que pueden ser fácilmente desmenuzables manualmente. Blanda es el término usado cuando la mena puede ser removida in situ manualmente o con un cargador frontal [6]. En la figura 4 se pueden observar las diferentes texturas de algunas menas de hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.



Fig. 4. Menas de hierro. (a) Finos Negros – Textura Friable en Microplacas, (b) Costra Hematítica – Textura Dura Bandeada, (c) Costra Masiva – Textura Dura Densa, (d) Costra Limonítica – Textura Blanda Terrosa. Aumento 50X.

Al evaluar los contenidos de hierro en las menas (tabla 4) se pueden considerar de alto tenor, siendo los de más alto tenor los finos negros y la costra hematítica, debido a su bajo contenido de ganga. Los minerales hidratados (costras) poseen mayores contenidos de ganga con altos contenidos de alúmina y fósforo. Como es de esperarse las menas más hidratadas (mayor contenido de goethita) presentaron mayor pérdida por calcinación.

Tabla 4. Análisis Químicos y PPC de Menas de Hierro del Cuadrilátero Ferrífero San Isidro.

Mena	%Peso					
	FeT	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	S	PPC
Finos Negros	69,20	0,39	0,23	0,015	0,005	0,25
Finos Negros Silíceos	67,76	1,77	0,37	0,022	0,003	0,71
Ultra Finos Negros	69,50	0,08	0,07	0,006	0,001	0,09
Finos Marrones	64,83	0,36	0,69	0,079	0,028	3,82
Finos Marrones Silíceos	64,87	3,99	0,22	0,066	0,002	2,73
Costra Hematítica	68,42	0,17	0,14	0,036	0,004	1,83
Costra Laminada	65,77	0,26	0,43	0,091	0,013	5,10
Costra Masiva	64,30	0,68	0,77	0,105	0,015	6,19
Costra Limonítica	62,08	0,42	1,57	0,149	0,032	8,54
Canga	65,85	0,76	0,66	0,092	0,020	3,67

Nota: % CaO, MgO, MnO y TiO₂ menores a 0,05.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis documental realizado, la génesis del cuadrilátero ferrífero San Isidro se puede describir como formaciones de hierro bandeada (BIF), con depósitos de hierro de grano fino debido a un alto grado de metamorfismo y que se originaron a partir de la cuarcita ferruginosa de la Provincia de Imataca mediante enriquecimiento supergénico. Los cambios metamórficos presentes son: la magnetita se oxida a hematita y martita, los minerales de ganga como piroxenos y anfíboles se reemplazan por goethita, lo que da como resultado esencialmente hematitas – goethitas – minerales de martita. Varios autores relacionan al cuadrilátero ferrífero San Isidro con los tipos de depósitos tipo Lago Superior y Dos Carajás, basado en su origen de las BIF y su enriquecimiento supergénico, diferenciándose por su alto metamorfismo, recomendando nuevos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos con mucho mayor detalle, así como tratar de obtener nuevas dataciones isotópicas con el fin de mejorar estas comparaciones. Las litologías de estos depósitos de hierro están compuestas de finas y alternadas capas de minerales de cuarcita y óxido de hierro, con los siguientes tipos de menas desde la superficie a la zona profunda: cangas y ripios, costras, finos marrones, finos negros, finos negros silíceos y cuarcitas parcialmente lixiviadas.

El estudio mineralógico realizado a las menas de hierro, presentes en el depósito, confirman su enriquecimiento supergénico desde menas hidratadas (hematíticas – goethíticas) en la superficie (costras) a menas hematíticas - martíticas (finos) en la zona profunda. En base a los resultados de los análisis químicos, las menas de hierro del cuadrilátero ferrífero San Isidro se pueden considerar de alto tenor desde 62,08% hasta 69,20% de hierro, presentando las menas hidratadas (costras) altos valores de ganga y PPC. Debido a su tenor se pueden considerar a estas menas de alto valor económico. Las menas de hierro evaluadas del depósito presentaron diferentes texturas desde duras masivas a blandas y friables en microplacas, lo que es indicativo del alto grado de metamorfismo a que han sido sometidas, confirmando su génesis. Es de esperarse, debido a su textura y mineralogía, diferentes comportamientos de las menas del cuadrilátero ferrífero San Isidro en los procesos metalúrgicos, de ahí la importancia de su caracterización tecnológica con un enfoque geometalúrgico.

RECONOCIMIENTOS

Agradecimiento de los autores a las empresas Orinoco Iron S.C.S. y CVG Ferrominera Orinoco C.A. por permitir el desarrollo de esta investigación en sus instalaciones.

REFERENCIAS

- [1] J. Clout, "Iron formation-hosted iron ores in the Hamersley Province of Western Australia", Applied Earth Science: IMM Transactions section B, pp. 115–125, diciembre 2006.
- [2] J. Gutzmer y N. Beukes, "Iron and manganese ore deposits: mineralogy, geochemistry, and economic geology", Geology, vol. 4. Eolss Publishers Co. Ltd/UNESCO, Oxford, Reino Unido, ISBN: 978-1-84826-007-8, 2009, pp 43-69, Resumen disponible en: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c01/e6-15-06-03.pdf>
- [3] R. Subrata y A. Venkatesh, "Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis", J. Earth Syst. Sci. 118, No. 6. pp. 619–641, December 2009.
- [4] A. Sousa y M. Lima, "Genesis of the "soft" iron ore at S11D Deposit, in Carajás, Amazon Region, Brazil", Brazil Journal of Geology, Vol. 50, Número:1, pp. 1-19, Mayo 2020.
- [5] L. Liming, "Iron Ore. Mineralogy, processing and environmental sustainability", 2da. Edición, Elsevier Ltd, 2022, pp 59-107.
- [6] O. Thalhammer y A. Mogessie, "Ore mineralogy", Geology, vol. 3, Eolss Publishers Co. Ltd/UNESCO, Oxford, Reino Unido, 2009, pp 245-281, Resumen disponible en: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c01/E6-15-05-06.pdf>.
- [7] P. Tropper, "Introduction to the mineralogical sciences", Geology, vol. 3, Eolss Publishers Co. Ltd/UNESCO, Oxford, Reino Unido, 2009, pp. 1-59, Resumen disponible en: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c01/e6-15-05-00.pdf>.

- [8] R. C. Morris, "A textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron formation in the Hamersley iron province of Western Australia", *Econ. Geol.* 75, pp 184–209, Abril 1980.
- [9] V. Mendoza, "Geología de Venezuela". Tomo I. Gran Colombia Gold Corp. Bogotá, 2012, pp. 91-100.
- [10] G. Ascanio, "Yacimientos de mineral de hierro del Precámbrico de Venezuela". 1er Simp. Amazónico. Puerto Ayacucho. Ven., *Bol. Geól. Publ. Esp.* N°10, pp. 464-473, 1985.
- [11] P. Cox, N. Page y F. Gray, "Algoma- and Superior-Type Iron Deposits", *Geology and Mineral Resource Assessment of the Venezuelan Guayana Shield*, U.S. Geological Survey and Corporación Venezolana de Guayana, Técnica Minera, C.A., pp. 58-61, 1992.
- [12] C.V.G. Ferrominera Orinoco C.A. "The mining of iron ore in Venezuela ", Technical presentation, FMO, pp. 16-17, 1992.
- [13] J. Ruckmick, "The Iron Ores of Cerro Bolivar, Venezuela". *Econ. Geol.*, Vol. 58, Núm. 2, pp. 218-236, Abril 1963.
- [14] A. Ferencic, "Geology of the San Isidro iron ore deposit, Venezuela", *Mineralium Deposita*, Vol. 4, No. 3, pp. 283-297, septiembre 1969.
- [15] Corporación Venezolana de Guayana (CVG), "La ventaja estratégica del Hierro, Acero y Aluminio en Guayana", presentada en la ExpoMetal, Puerto Ordaz, Venezuela, 2024.

LOS AUTORES



Núñez Avila Ernesto Armando, de nacionalidad venezolana, MsC en Ingeniería Metalúrgica, Doctorando en Ciencias de la Ingeniería en la UNEXPO. Superintendente de I & D Orinoco Iron S.C.S. y docente de postgrado en la UNEXPO Puerto Ordaz. Especializado en el área Siderúrgica y Geometalurgia.



Lopez Hércules Jesús Ramón de nacionalidad venezolana, PhD en Ingeniería Metalúrgica y Materiales. Investigador y Docente de Postgrado en la UNEXPO Puerto Ordaz. Especializado en Procesos Metalúrgicos del Hierro y Aluminio.



Bisier Marín Cesar Alfredo, de nacionalidad venezolana, Ingeniero Geólogo de la Universidad de Oriente (UDO). Especializado en Minería de Hierro y Geometalurgia.



Stabilito Casares Genaro José, de nacionalidad venezolana, Ingeniero Geólogo de la Universidad de Oriente (UDO). Especializado en Geología de Yacimientos de Petróleo, Geología de Yacimientos de Hierro, Planificación Minera y Operaciones Mineras.