Infomin, Vol. 14, enero-diciembre 2022, E-ISSN: 1992-4194, http://www.infomin.co.cu

Artículo Original

Beneficio de una muestra tecnológica de skarn magnetítico del yacimiento "La Yuca" de posible empleo en investigaciones criminalísticas

CU-ID: 2144/v14e03

Benefit of a technological sample from "La Yuca" magnetite skarn deposit of possible use in criminalistics researches

José Antonio Pérez Alonso[1*], Abdel Casanova Gómez[2], Emilio Montejo Serrano[3], Rubén Alcalá - Fariñas[†]

RESUMEN: Con el objetivo de obtener un concentrado de fe-magnetítico de posible empleo en aquellos usos donde no se requieren grandes volúmenes de mineral a procesar; ejemplo en investigaciones criminalísticas, se caracteriza y aplica un esquema de beneficio magnético por vía seca a partir de una muestra representativa del depósito de skarn de Fe vinculado al campo mineral "Hierro Santiago", a través del empleo de diversas técnicas instrumentales de mineralogía analítica y ensayos físico-químicos.La composición mineralógica de la muestra objeto de evaluación, permite que se seleccione un esquema tecnológico combinado de: (1) trituración - molienda - pulverización (granulometrías entre - 0,106 + 0,074 mm); (2) separación magnética vía seca (Int. (H) < 200 kA/m; Int (I. amp) = 0); (3) separación granulométrica (vía húmeda) de los concentrados y (4) secado de ambos a temperatura ambiente. Como resultado del beneficio se logra un concentrado magnético que presenta un notable incremento de la ley de magnetita (92,16%) y 7,84% de impurezas minerales, para un acumulado total en peso del 78,80%. el mismo cumple los contenidos mínimos de mineral útil para su empleo en las siguientes aplicaciones: *(1) síntesis de ferritas; (2) polvos magnéticos para la impresión de huellas dactilares y (3) composites para biomedicina*. A fin de lograr la sostenibilidad ambiental con la implementación del concepto de tecnologías más limpias (TML), se plantea la posterior evaluación de la fracción no-magnética producto del beneficio como material abrasivo para la limpieza de superficies metálicas y piedras ornamentales en instalaciones constructivas, dado por el contenido de fases de notable dureza que se identificaron en su composición mineralógica: *hematita (30%), cuarzo (21%), andradita (17%), cordierita (14%), magnetita (13%) y poca calcita (5%)* respectivamente. Sirva el presente artículo como modesto homenaje a la memoria del tecnólogo Rubén Alcalá Fariñas, excelente especialista en beneficio de minerales compañero de todos los colegas del CIPIMM.

Palabras clave: Magnetita, beneficio magnético, separación granulométrica, tecnologías limpias.

Recibido: 07/02/2022

Aprobado en su forma original: 14/06/2022

[1]Instituto de Geología y Paleontología. IGP. Servicio Geológico de Cuba. Ave Vía Blanca No 1002, San Miguel del Padrón. La Habana. Cuba.

[2]Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, Laboratorio de pinturas y barnices. Ave. Vía Blanca s/n entre Infanta y Palatino, Cerro, La Habana. Carretera Varona Km11/2 Fca. "La Luisa" No.12028, Boyeros, La Habana, Cuba. E-mail: abdel.casanova@oc.emcomed.cu

[3]Grupo Empresarial Geominsal, Calle 13, No. 15 Carretera de Cojímar y Final, La Habana, Cuba. E-mail: montejo@gms.minem.cu

[(†)] In memoriam, Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica. La Habana, Cuba

*Correo Electrónico: josea@igp.minem.cu

ABSTRACT: With the aim of obtaining a Fe-magnetic concentrate for possible use in those uses where large volumes of ore to be processed are not required; example in criminalistics researches, a magnetic benefit scheme is characterized and applied by dry way from a representative sample of the Fe skarn deposit linked to the "Hierro Santiago" mineral field, through the use of various instrumental techniques of analytical mineralogy and physical / chemical tests.The mineralogical composition of the sample under evaluation allows a combined technological scheme to be selected: (1) crushing - grinding - pulverizing (range granulometric; - 0.106 + 0.074 mm); (2) dry magnetic separation (Int. (H) < 200 kA/m; Int (I amp) = 0); (3) granulometric separation (wet method) of the concentrates and (4) drying of both at room temperature. As a result of the benefit, a magnetic concentrate is achieved that presents a notable increase in the magnetite grade (92.16%) and 7.84% of mineral impurities, for a total accumulated weight of 78.80%. it meets the minimum contents of useful mineral for use in the following applications: (1) synthesis of ferrites; (2) magnetic powders for fingerprint printing and (3) composites for biomedicine.In order to achieve environmental sustainability with the implementation of the concept of cleaner technologies (CT), the subsequent evaluation of the non-magnetic fraction product of the mill is proposed as an abrasive material for cleaning metallic surfaces and ornamental stones in construction facilities, given by the content of phases of notable hardness that were identified in its mineralogical composition: hematite (30%), quartz (21%), andradite (17%), cordierite (14%), magnetite (13%) and minor quantities of calcite (5%) respectively. This article serves as a modest tribute to the memory of the technologist Rubén Alcalá Fariñas, an excellent specialist in the benefit of minerals, a dear friend of all CIPIMM colleagues.

Key words: Magnetite, magnetic benefit, particle size separation, clean technologies.

INTRODUCCIÓN

El Campo Mineral Hierro Santiago se localiza en la región oriental del país. Se compone de un grupo de yacimientos para la explotación de minerales de hierro, los cuales se utilizaron en épocas pretéritas como fuente de materia prima en la industria siderúrgica, entre ellos se mencionan los siguientes: *"La Grande", "Folía", "Concordia", "El Descanso", "Antoñica", "Chiquita", "El Norte", "Chicharrones", "Arroyo de la Poza" y "La Yuca"* respectivamente.

En una investigación precedente, García *et al.* (2005) investigó las menas representativas del yacimiento "La Yuca", a fin de utilizarlas para la obtención de hierro nodular (nombre común; *"hierro esponja"*), como materia prima de partida para la producción de acero, sus autores concluyeron que los concentrados magnéticos cumplen los requerimientos mínimos de Fe (total), sin embargo no fue factible la explotación de las menas del yacimiento dado por limitaciones de recursos minerales que no justificaban los costos inversionistas en equipamientos e infraestructura minera lo que imposibilitó la aprobación del estudio de factibilidad técnico-económica finalmente.

Por otra parte, el país no cuenta hoy con un material comercializable a nivel nacional donde no se requieran altos volúmenes de explotación de tales menas para el procesamiento tecnológico del mineral de hierro, a la vez sustituya importaciones y clasifique como concentrado magnético, como lo son en este caso las menas del yacimiento "La Yuca", las cuales pudieran utilizarse en algunas aplicaciones perspectivas entre las que se mencionan: *imanes, ferritas, dispositivos electrónicos, nanopartículas para usos biomédicos y como polvo para impresiones dactilares,* entre otros, teniéndose que importar dichos productos magnéticos a mayores precios en el mercado internacional y que reúnan tales propiedades. Atendiendo a lo antes dicho el presente trabajo tiene los siguientes objetivos: Caracterizar el mineral de hierro del sector "La Yuca" mediante el empleo de diversas técnicas de análisis químico e instrumentales de fases y obtener un concentrado de Fe magnetítico para su empleo en diversas aplicaciones nacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos y parámetros de operación

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) - Espectrometría de Fluorescencia de rayos-X dispersiva en energía (EDS): Las micrografías (MEB) y espectros de fluorescencia de rayos-X (EDS), se obtuvieron en un microscopio de la firma TESCAN del LCC del MININT (figura 1).

El mismo posee a su vez un analizador de rayos-X dispersivo en energía de la firma OXFORD y un detector de electrones secundarios y retro-dispersados. Se utilizaron en el MEB magnificaciones (aumentos) hasta1000x.

Difracción de Rayos-X (DRX): Los difractogramas se registraron en un equipo marca Philips, modelo PW -1710 (figura 2) según variante de medición punto a punto; paso angular de $0{,}5^0$ (2(), a un tiempo de medición en cada posición angular de 3 segundos.

Los datos se procesaron con el programa "Origin 8.0". Las distancias entre planos se determinaron con el programa Ttod para PC. El análisis cualitativo de fases se realizó con la utilización de la base de datos PCPDFWIN; versión 1.30, JCPDS-ICDD / 2003, compatible con Windows 98 para Office 2000.

Análisis Térmico: Los termogramas simultáneos CDB, DTG y TG, se obtuvieron en un equipo de la firma alemana NETZSCH, modelo STA 449 F3 (figura 3), empleando para ello los siguientes parámetros de operación: masa de muestra (83 mg); masa del material de referencia (60.23 mg Al_2O_3; crisoles (Al_2O_3); material de horno (SiC); gas empleado (aire); flujo del gas portador de la termobalanza (aire); velocidad de calentamiento (10.0 K /min); Sensibilidad de la termobalanza (0.001 mg - 35.0 g); Sensibilidad DSC (- 0.001 - 5000 µV/ mg); Tiempo total de medición (1h 37 min y 10 segundos); temperatura de trabajo (27-1000ºC).

Separador electromagnético por inducción de rodillo acoplado a una fuente de corriente alterna (figura 4): Posee una intensidad del campo máxima de 740 kA/m y de campos fuertes > 400 k A/m. Parámetros de operación: Flujo de alimentación (vía seca) 1.2 kg/min; Rango de granulometría -1.0+0.3 mm; Diámetro del rodillo 100 mm; Ancho del rodillo 80 mm; Procedencia: Rusia.

Espectrometría de Absorción Atómica: Marca (VARIAN), modelo AA240 (figura 5). Parámetros de operación: Unidad de concentración: mg/l; Modo de medición: Absorbancia; Modo de calibración: concentración; medida: integración; Factor de expansión: 1.0; Algoritmo de calibración: lineal; Tipo de llama: aire/acetileno; Flujo de aire: 13.50 ml/min; Flujo de acetileno: 2.0 ml/min.



Figura 1. Microscopio Electrónico de Barrido MEB-EDS (LCC MININT).



Figura 2. Difractómetro de polvos de rayos-X (CIPIMM).



Figura 3. Analizador Térmico (CIPIMM).

Microscopía Óptica: Se utilizó un microscopio óptico binocular marca MEIJI (ver imagen), acoplado a una cámara de video SONY, modelo

SSC-C 370, interfase YS-W150, con analizador de imágenes. El procesamiento de resultados se realizó con el software DIGIPAT (figura 6).

Por último, en la figura 7 se muestra el esquema de preparación de la muestra objeto de evaluación

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Espectrometría de absorción atómica (EAA)

El producto micronizado obtenido según el esquema de la figura 9, se caracterizó por EAA teniendo en cuenta la composición elemental del material de investigaciones precedentes. Los elementos analizados se encuentran representados en la tabla I.

Tabla 1. Composición química del mineral de cabeza del yacimiento "La Yuca".

Elementos	Contenido en %
Fe_{Total}	50.93
Cr	0.0175
Al	1.33
Ni	0.011
Co	0.0053
Mg	0.67
Ca	2.53
SiO_2	16.07
Mn	0.21
Cu	0.064

En la tabla anterior se aprecia cómo los contenidos de hierro total son elevados, así como discretos los de óxidos de silicio asociados a cuarzo y otros silicatos.

Microscopía electrónica de barrido (MEB-EDS)

A través de este análisis observamos a un material bien homogéneo con morfología granular donde las micrografías, obtenidas con un detector de electrones secundarios (figura 8), muestran cuatro tipos de componentes atendiendo a la luminosidad de las distintas micropartículas, lo cual corresponde a cuatro tipos diferentes de compuestos con densidades electrónicas diferentes.



Figura 4. Separador magnético (CIPIMM).

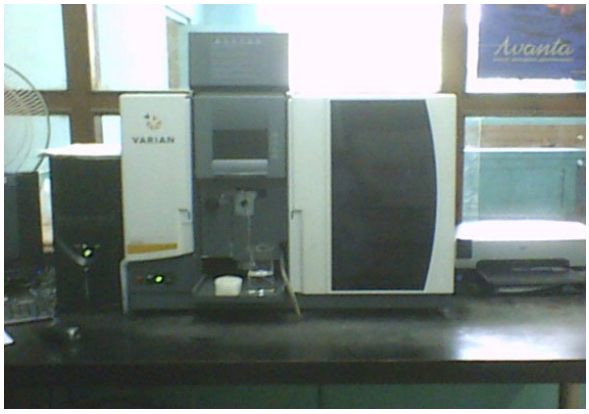


Figura 5. Espectrómetro de Absorción Atómica (CIPIMM).



Figura 6. Microscopio binocular (CIPIMM).

A cada micropartícula anterior se le realizó un análisis microelemental en la variante de electrones retro dispersados (imágenes tomadas a 1000X) y los mismos se presentan en la figura 9.

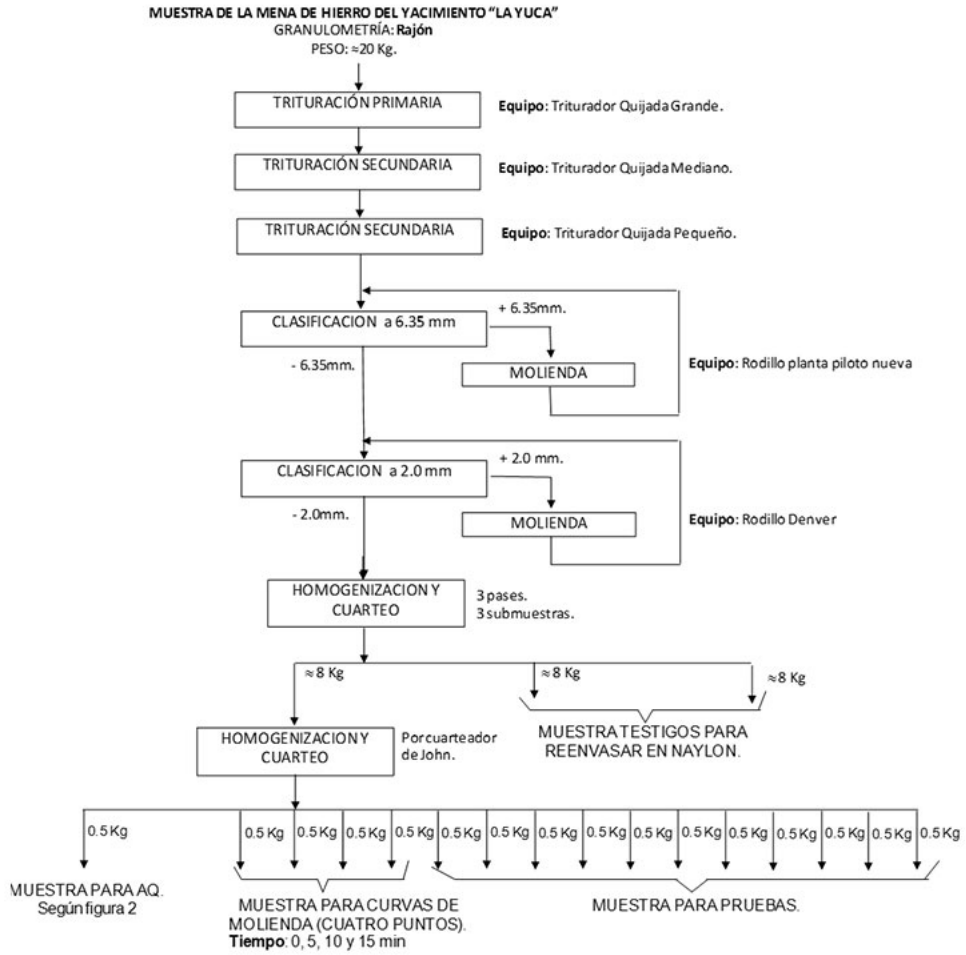


Figura 7. Esquema de preparación de la muestra

Puede observarse en esta figura que las micropartículas 1 y 2 son silicatos de hierro y calcio y que presenta magnesio sustituyendo el calcio del silicato. Se comprobó que las micropartículas 3 y 4 son óxidos de hierro. La tabla 2 muestra el análisis microelemental del material en su conjunto.

La figura 10 exhibe el espectro de fluorescencia EDS del material en su totalidad demostrando la probable presencia de óxidos de hierro y silicato de calcio.

El análisis cualitativo de fases realizado por DRX informa la presencia cuatro fases. La muestra, cristalina en su totalidad, presenta las señales características de *magnetita* (Fe_3O_4), *hematita* (Fe_2O_3), *cuarzo* (SiO_2) y *calcita* ($CaCO_3$) en baja concentración. Como silicatos están el granate Andradita ($Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$) y la fase minoritaria *cordierita* ($(Mg,Fe)_2\ Al_4\ Si_5\ O_{18}$)

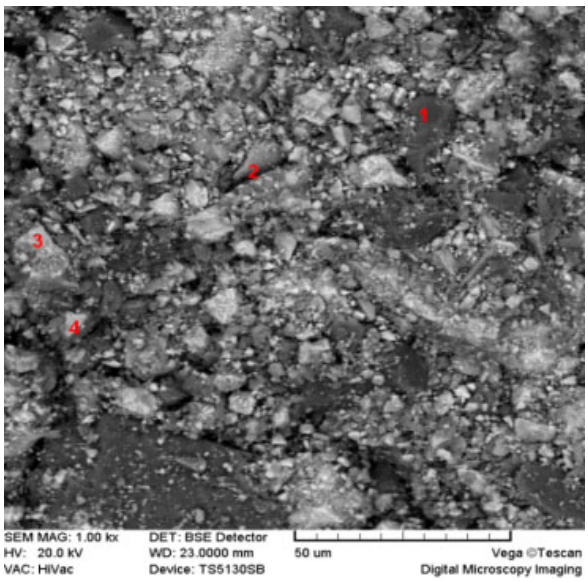


Figura 8. Micrografía del mineral "La Yuca" que muestra cuatro componentes minerales fundamentales.

que confirma al silicato visto por microscopía electrónica de barrido. La figura III.4 exhibe el difractograma de rayos x de este material. Comprobamos a través de DRX que los óxidos visto por MEB son la Hematita y la Magnetita y que el magnesio y el calcio presentes corresponden a la cordierita y al granate Andradita.

El análisis cuantitativo de fases se desarrolló a través del método de relación de intensidades RIR. Los resultados indican que estamos en presencia de un material en su mayoría de óxidos de hierro, cerca de un 75%. La tabla 3 muestra los contenidos de cada componente en el mineral. Resulta interesante y conveniente a la vez con vista a la concentración magnética el contenido de fases no magnéticas consistentes en cuarzo, andradita, calcita y cordierita con el restante 25%.

Análisis Térmico

El análisis térmico nos brindó información acerca de la identificación de dos fases que se encuentran por debajo del límite de detección de la técnica de DRX. Así se pudo detectar un 1% de Calcita ($CaCO_3$) y 6% de Goethita (α-FeOOH), componentes que dada su concentración puede ser poco exacta por DRX. El termograma de la figura 12 muestra una pérdida de masa a la temperatura de 272ºC correspondiente al agua hidroxílica de la goethita para una concentración másica de 6%. Esta goethita se encuentra predominantemente como una película superficial con muy baja cristalinidad por lo cual no logran verse los

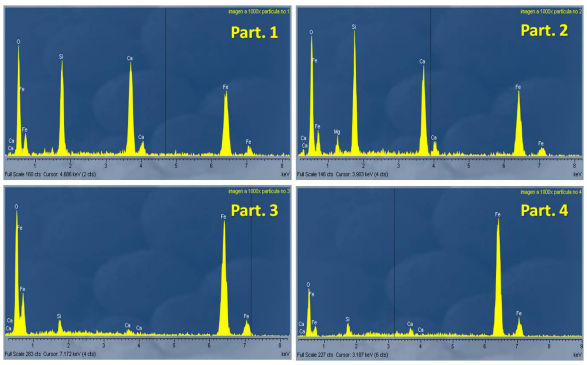


Figura 9. Espectros EDS de las cuatro micropartículas objeto de investigación.

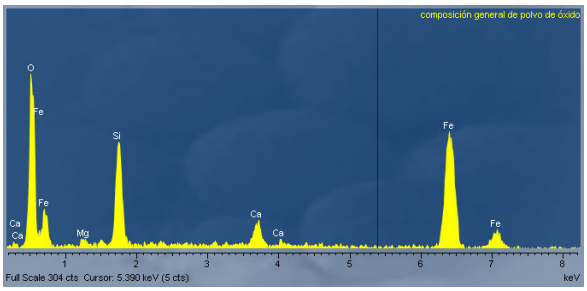


Figura 10. Espectro de florescencia de Rayos-X Dispersivo de Energía Difracción de rayos X.

máximos de difracción de rayos x. Además se ve una pérdida de CO_2 a 710ºC correspondiente a un 1% de Calcita, cercano al 3% determinado por DRX. De esta manera haciendo un recálculo general de los contenidos y teniendo en cuenta que el resto de las fases son térmicamente estables a este intervalo de temperatura (25 a 1000 ºC) podemos decir que este material presenta 37% de Magnetita, 34% de Hematita, 11% de Andradita, 7% de Cuarzo, 6% de Goethita, 3% de Calcita y 2% de Cordierita.

Tabla 2. Contenido elemental de las micropartículas observadas a 1000X.

Composición elemental	O (%)	Mg (%)	Si (%)	Ca (%)	Fe (%)	Total (%)
Mineral La Yuca	36,72	1,03	11,3	3,26	47,69	100
partícula no 1	41,45		10,74	15,93	31,88	100
partícula no 2	42,15	2,00	13,13	14,42	28,3	100
partícula no 3	32,49		2,33	0,72	64,46	100
partícula no 4	15,72		2,38	1,18	80,72	100

Tabla 3. Contenido de fases calculadas por el método RIR.

Mineral del yacimiento La Yuca (%)					
Magnetita	Hematita	Andradita	Cuarzo	Calcita	Cordierita
39	*36*	*12*	*8*	*3*	*2*

La composición de fases del material es muy conveniente para la separación magnética puesto que más del 70% del material es magnético y son dos óxidos de hierro sin metales indeseados que lo convierte en una materia prima de alta calidad para la síntesis de ferritas.

Análisis granulométrico (vía seca) del material de partida

Este análisis se desarrolló para conocer en cual(es) de las fracciones granulométricas se libera la mayor cantidad de sólido magnético posible, para ello se realizó un tamizado y se determinó en cada fracción el contenido de material magnético.

Como se observa en la tabla 4 las fracciones por debajo de 0.074 mm son las de mayor contenido de sólido magnético lo que indica que moler el material bajo tal granulometría liberará más material magnético (hematita y magnetita) y el beneficio será más efectivo.

Por microscopía óptica se analizaron las fracciones magnéticas de cada granulometría para observar así el comportamiento de la magnetita (figura 13). Las fracciones en las que se libera la magnetita es 0.106 mm y 0.074 mm.

El beneficio que se pone en práctica en este trabajo se logra separando las fases magnéticas de las no magnéticas a través de un separador electromagnético por inducción de rodillo acoplado a una fuente de corriente. Se realizó la concentración aplicando al separador tres valores de corriente 0,0 A, 2.5 A y 5,0 A.

En los ensayos de beneficio magnético se obtuvieron como productos finales del mismo seis sólidos: tres concentrados magnéticos y tres no magnéticos; uno para cada corriente impuesta al separador electromagnético. El procedimiento comenzó imponiendo 2.5 A, obteniéndose así el par M-1; luego se aprovechó la remanencia magnética que quedó en el rodillo y se trabajó a 0,0 A generándose el par M-2 y posteriormente se obtuvo el par M-3 cuando se trabajó con 5,0 A.

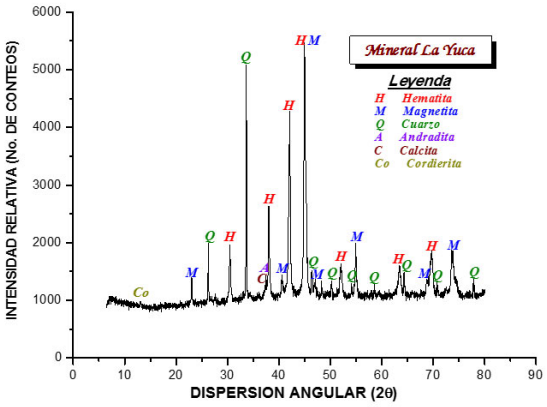


Figura 11. Difractograma de mineral sector La Yuca.

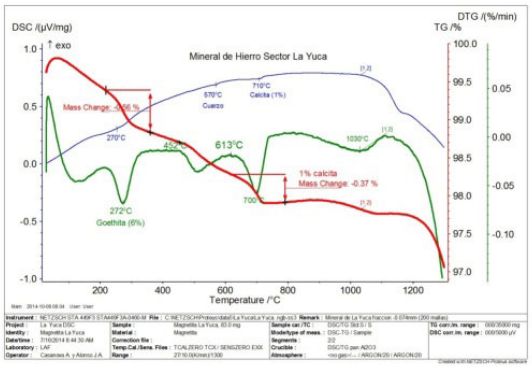


Figura 12. Termograma con las pérdidas de masas durante el calentamiento.

Tabla 4. Separación magnética manual por clases granulométricas.

Fracción granulométrica (mm)	Peso (gr)	Peso (%)	Fracción Magnética (%)	Fracción Paramagnética (%)	Fracción No magnética (%)
1	15.50	24.21	73.88	19.27	6.84
0.5	9.32	14.56	81.78	15.08	3.13
0.212	8.85	13.83	83.52	16.41	0.062
0.106	6.33	9.89	81.24	18.73	0.031
0.074	4.09	6.38	**85.54**	14.46	
0.063	2.48	3.88	**99.52**	0.48	
-0.063	17.43	27.24	100		
Total	**64.00**	**99.99**			

A través de esta caracterización observamos que el mayor rendimiento de la concentración magnética se logra a 0A, donde se obtiene una mayor concentración de la fase magnetita, determinada por el método de la relación de intensidades (RIR).

Los concentrados magnéticos analizados presentan una composición de fases casi en su totalidad de hematita y magnetita, por encima de 90% de concentración másica, lo que demuestra la efectividad de este beneficio para el mineral de La Yuca. Las figuras 15, 16 y 17 muestran los difractogramas de los concentrados magnéticos de M-1, M-2 y M-3 respectivamente.

La muestra de mayor concentración de óxidos de hierro (M-2) fue a la que menor corriente se le impuso en el separador y experimentó menor campo magnético en la separación. La explicación de este hecho está en que no toda la magnetita está liberada del cuarzo y la andradita; y a la vez, la magnetita y la hematita se encuentran también entrecrecidos sobre estas

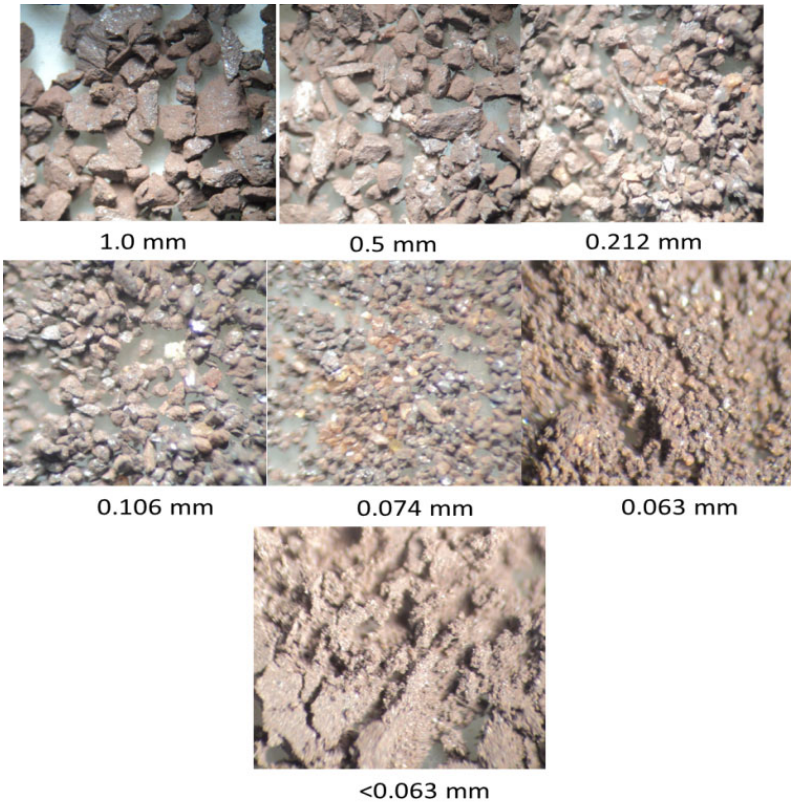
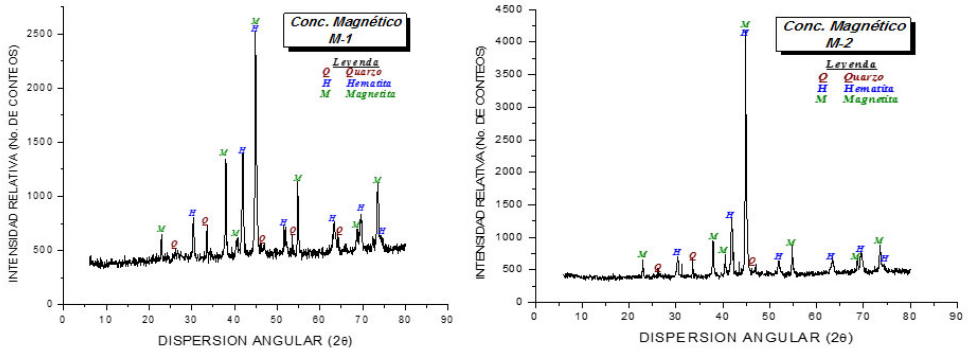


Figura 13. Conteo en el microscopio para analizar el grado de liberación de la magnetita. Obtención del concentrado magnético.



Figuras 15 y 16. Difractogramas del concentrado magnético a 2.5 A y 0,0 A.

fases no magnéticas. Prueba de esto es el hecho de que en la porción no magnética hay presencia de hematita y magnetita. Ocurre que cuando se aplica un campo magnético mayor existe una menor discriminación de los granos mixtos y se retienen aportando al concentrado mayor contenido de estas fases no magnética. La tabla 5 expone los contenidos de fases presentes en este material determinados por relación de intensidades.

Analizando las porciones no-magnéticas a través de los difractogramas que se logran (figura 18), y los que constituyen las colas del proceso, vemos como disminuye notablemente el contenido de magnetita se separa la mayor parte del cuarzo, calcita, los silicatos andradita y cordierita.

Como se aprecia en el concentrado no magnético existe un predominio de concentración de los silicatos.

Análisis granulométrico vía húmeda del concentrado de mejor rendimiento.

Los análisis granulométricos por vía húmeda del concentrado magnético y la cola obtenidos con una corriente de 0,0 A se presentan en las Tablas 7, 8 y 9 respectivamente.

Por último en la tabla 10 y 11 se presentan los resultados de la composición química del concentrado final y el análisis de reconstrucción mineralógica correspondiente obtenido por dicha vía.

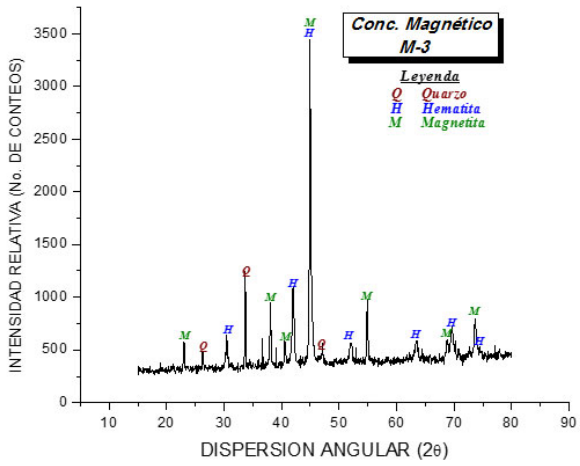


Figura 17. Difractograma del concentrado magnético 5,0 A.

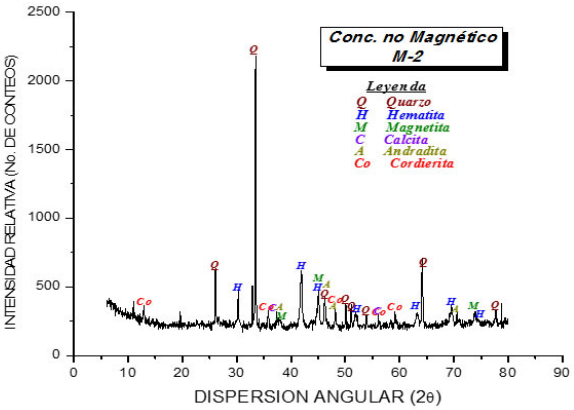


Figura 18. Difractograma del concentrado no magnético a 0,0 A.

Tabla 5. Concentrados magnéticos de la muestra - 0.3 + 0.074 mm.

Muestras	Intensidad de corriente (A)	Magnetita (%)	Hematita (%)	Cuarzo (%)
CM- 1	2.5	58	30	12
CM- 2	0	74	19	7
CM- 3	5	61	22	17

CM: concentrado magnético

Tabla 6. Concentrados no magnéticos (colas) de la muestra -0.3+0.074 mm.

Muestras	Magnetita (%)	Hematita (%)	Cuarzo (%)	Andradita (%)	Calcita (%)	Cordierita (%)
CNM 1	14	40	18	12	6	6
CNM 2	13	30	21	17	5	14
CNM 3	9	47	13	22	6	

CNM: Concentrado no magnético (cola)

Tabla 7. Análisis granulométrico vía húmeda del concentrado magnético.

Fracción Granulométrica (mm)	Peso (gr)	Peso (%)	Peso Acumulado (%)	Contenidos (%)		Distribución (%)	
				Magnetita	Otros	Magnetita	Otros
-0.3+0.106	121.00	84.03	84.03	95.00	5.00	86.62	53.59
-0.106+0.074	17.00	11.81	95.83	96.00	4.00	12.30	6.02
-0.074	6.00	4.17	100.00	24.00	76.00	1.09	40.39
Total	**144.00**	**100.0**		**92.16**	**7.84**	**100**	**100**

Tabla 8. Análisis granulométrico vía húmeda de la cola del concentrado magnético.

Fracción Granulométrica (mm)	Peso (gr)	Peso (%)	Peso Acumulado (%)	Contenidos (%)		Distribución (%)	
				Magnetita	Otros	Magnetita	Otros
-0.3+0.150	19.08	49.25	49.25	2.00	98.00	39.74	49.54
-0.150+0.106	7.53	19.43	68.68	1.00	99.00	7.84	19.74
-0.106+0.074	8.32	21.47	90.14	1.00	99.00	8.66	21.81
-0.074	3.82	9.86	100	11.00	88.00	43.76	8.90
Total	**38.74**	**100**		**2.48**	**97.42**	**100.00**	**100.00**

Tabla 9. Cálculo de recuperación en peso de la magnetita obtenido por fracciones.

Fracción	Peso (gr)	Peso (%)	Peso Acumulado (%)	Contenidos (%)		Recuperación (%)	
				Magnetita	Otros	Magnetita	Otros
Fracción magnética	144.00	78.80	78.80	92.16	7.84	99.29	23.02
Fracción No magnética	38.74	21.20	100	2.48	97.42	0.71	76.98
Total	**182.74**	**100**		**73.14**	**26.83**	**100.00**	**100.00**

Tabla 10. Composición química del concentrado magnético.

Elementos	Contenido en %
Fe_{Total}	64.8
Fe^{+2}	0.49
Fe^{+3}	64.31
Ca	0.32
Mg	0.21
Mn	0.18
Cu	0.033
Ni	0.0044
Co	0.00092

Tabla 11. Reconstrucción mineralógica del concentrado magnético final.

Mineral del yacimiento La Yuca (%)					
Magnetita	**Hematita**	**Andradita**	**Cuarzo**	**Calcita**	**Cordierita**
93	*2*	-	*5*	-	-

CONCLUSIONES

1. Las fases minerales presentes en la muestra de cabeza mediante el empleo combinado de diferentes técnicas instrumentales de análisis de fases reportan la siguiente composición: *hematita (48%); magnetita (26%); cuarzo (13%); andradita (6%); goethita (6%) y calcita (1%).*
2. El mayor grado de liberación de los cristales de magnetita en el mineral de cabeza se logra en las clases granulométricas de 0,106 y 0.074 mm.
3. Las pruebas de separación magnética del mineral de cabeza a diferentes intensidades de corriente, permitieron definir la ley óptima de magnetita en el concentrado magnético vía seca, cuando no se aplicó ninguna intensidad de corriente al amperímetro del separador con: *53,5% magnetita, maghemita (20,2%), hematita (20,2%) y cuarzo (6%)*. Del mismo modo, en la fracción no-magnética se lograron contenidos másicos de: *hematita (45%), andradita (21%), cuarzo (12%), magnetita (9%), calcita (6%), maghemita (4%) y cordierita (3%)* respectivamente.
4. Mediante el análisis granulométrico (vía húmeda) de la fracción magnética, se obtuvo una *ley de magnetita equivalente al 92,16% y 7,84% másico de impurezas minerales, con 78,80% acumulado en peso*. Por su parte, en *la fracción no-magnética se logra un 97,52% de minerales accesorios y 2,48% de magnetita con 21,20% acumulado en peso*.
5. El esquema tecnológico para el beneficio de las menas del yacimiento "La Yuca", consiste en cuatro etapas**:** *(1) trituración-molienda-pulverización del mineral (-0,3 + 0.074 mm), (2) separación magnética por vía seca (Intensidad de campo magnético < 200 kA/m; 0,0 Amperes), (3) separación granulométrica (vía húmeda) de los concentrados (magnético y no-magnético), (4) secado a temperatura ambiente de ambos concentrados.*

RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas de uso de los concentrados magnéticos en: *(1) síntesis de ferritas, (2) polvos para impresión de huellas dactilares, (3) dispositivos electrónicos y (4) nanopartículas para usos biomédicos.*
2. A fin de lograr la sostenibilidad minero-ambiental del yacimiento, debe considerarse la emisión de polvo durante el proceso industrial de pulverización fina del mineral de hierro, para lo cual el equipo debe contar con un sistema de extracción conveniente, y separar el granate andradita (de posible empleo como material abrasivo) del resto de los minerales acompañantes.

RECONOCIMIENTO

Los autores del presente artículo desean reconocer la labor realizada por la Ing. Yelena Portal Figueredo en la presente investigación, la cual constituyó tema de su Tesis de Diploma en la Carrera de Ingeniería Metalúrgica, defendida con éxito en la Unidad Docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica (UDM) del ISPJAE, sin embargo y a nuestro pesar, no forma parte del colectivo de autores del presente artículo por no presentar afiliación laboral, no obstante, el colectivo de autores considera que dada su entrega y dedicación a la investigación para la culminación con éxito de la misma merece nuestra distinción.

BIBLIOGRAFÍA

Alfonso E., Bercoff P.G. & Alonso J.A. 2011. "Procesamiento para obtener ferritas a partir de materiales de desecho de la industria del níquel". INFOMIN, Vol.3 (No.2): 43-51, ISSN: 1992-4194. Available: <http://www.infomin.co.cu>, [Consulted: December 3, 2021].

Allen, Teresa M. & Cullis, Pieter R. 2004. "Drug delivery systems: Entering the mainstream". Science, vol. 303(No. 5665), March: 1818-1822.

Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W. & Nichols, M. C. 2005. Handbook of Mineralogy, *Mineralogical* Society of America.

Arisi, E.; Bergenti I.; Cavallini, M.; Murgia, M.; Riminucci, A.; Ruani, G. & Dediu, V. 2007. "Room temperature deposition of magnetite thin films on organic substrate". Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 316 (No. 2): 410-412.

Betetjtin A.1971. Curso de Mineralogía, Moscú: Editorial Mir.

Betetjtin A.1971. Cristalografía y mineralogía física, Moscú: Editorial Mir.

Blakemore, Richard. 1975. "Magnetotactic bacteria". Science, vol. 190(No.4212), October: 377-379.

Bohannon, John. 2000. "A home for Maori science". Science, vol. 318 (No. 5852), November: 907.

Cornell, Rochelle M. & Schwertmann, Udo .1996. The iron oxides. Weinheim, Germany: VCH

Diebel, Carol E.; Proksch, Roger; Green, Colin R.; Neilson, Peter and Walker & Michael M. 2000. "Magnetite defines a vertebrate magneto receptor". Nature, vol.406 (No. 6793), July: 299-302.

Evans, R. C.1966. An introduction to crystal chemistry. 2nded. Cambridge: Cambridge University Press

Estupiñán. Y. 2002. Obtención de pre-reducidos a partir de minerales de hierro del sector Yuca de Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma. Fondo D ´SIT

Figueredo. O.; García, L. L.; Cubillo, C.; Castaño, O. & Morciego, O.1989. Perspectivas de utilización de minerales magnetíticos del yacimiento "Hierro Santiago" en la industria siderúrgica nacional. I/89, 41p.

Figueredo O. 1990. Estudio del beneficio por separación magnética de la muestra # 3 del sector "La Grande" del yacimiento de hierro de Santiago de Cuba, Informe Nº 1.

Figueredo. O.; García, L. L.; Cubillo, C.; Castaño, O. & Morciego, O. 1990. "Beneficio por separación magnética de los minerales de los yacimientos Chiquita, Chicharrones y El Descanso, pertenecientes al grupo de yacimientos de Santiago". Boletín Siderurgia. I/90: 61 - 71.

Fritzsche, Wolfgang & Taton T, Andrew. 2003. "Metal nanoparticles as labels for heterogeneous, chip-based DNA detection", Nanotechnology, vol. 14(No. 12):R63-R73.

Fu, Qiang; Rama Rao, G. V.; Ward, Timothy L.; Lu, Yunfeng; & Lopez, Gabriel P. 2007. "Thermoresponsive transport through ordered mesoporous silica/ PNI PAAm copolymer membranes and microspheres".Langmuir, vol. 23(No. 1):170-174.

García I, Aja R & otros.2005. Producción de hierro esponja a partir de minerales de hierro cubanos. Informe final de proyecto de Investigación, La Habana, CIPIMM.

Gómez-Lopera, Salvador; Arias, José L.; Gallardo, Visitación & Delgado, Ángel V. 2006. "Colloidal stability of magnetite /poly (lactic acid) core/shell nanoparticles". Langmuir, vol. 22: 2816-2821.

Guliáev A.P. 1978. Metalografía, Moscú, Editorial Mir.

Hernández. G., N. González. 1989. Estudio del beneficio de la muestra tecnológica del sector Concordia del Yacimiento Hierro Santiago. Proyecto de Grado. Fondo D´SIT.

Holden, Constance.2004. "Magnetic art", Science, vol.305 (No. 5684):603.

Lavandero, R., Estrugo, M., Santa Cruz, M., Bravo, F., Melnikova, A., Cabrera, R., Trofimov, V. A., Romero, J. & otros.1988. Mapa de yacimientos minerales de Cuba a escala 1: 500 000. Ministerio de la Industria Básica, Instituto de Geología y Paleontología.

Leyva Mormul A, Leyva Ramírez E, Leyva González O, Figueredo Stable O & Ferreiro Guerrero Y.2007. Evaluación de las características fisicoquímicas y mineralógicas de la mena de hierro del grupo de yacimientos Hierro Santiago, Dique Norte, La Pasa, Nicaro, Holguín. Centro de Investigaciones Siderúrgicas, D´SIT.

López-Pereiro.2014. Fabricación de Hierro, Aceros y Fundiciones. 1ª Ed. J. Apraiz Barreiro

Lovaina. Y. & Naranjo E. 1989. Estudio del beneficio de la muestra del Sector Antoñica del Yacimiento Hierro Santiago. Proyecto de Grado. Fondo D´SIT.

Medina, A., Gilart, M., Ruiz, R., Gil M., Acosta J., Guerra M., Cobián T., (1990), Informe sobre los trabajos de exploración detallada hierro La Grande, realizados durante los años 1983 - 85 y 1987 - 92: Inédito

Moreira J, Torres J.L., Montano J, Lavandero R, Sánchez R & Cazañas X. 2011. Yacimientos de minerales sólidos cubanos, IV Congreso de Geología y Minería.

Padró, T., Cadete, M., Ferro, P. & Cobián T. 1990. Informe sobre los trabajos de prospección detallada Hierro Firmeza realizados durante los años 1978 - 85 y 1987 - 88 en la provincia Santiago de Cuba: Inédito.

Philipse, A P; van Bruggen, Michel P. B & Pathmamanoharan, C.1994. "Magnetic silica dispersions: Preparation and stability of surface-modified silica particles with a magnetic core". Langmuir, vol.10 (No.1), January: 92-99.

Portal, Figueredo Y. 2015. Obtención de un concentrado magnético a partir de menas de skarn magnetítico del yacimiento La Yuca. Tesis de diploma, Unidad Docente Metalúrgica (UDM), ISPJAE.

Sánchez, R., 1997. Reporte de cierre sobre las investigaciones realizadas por la AEI Carib Gold Mines Inc. - Geominera S. A. en el proyecto Sierra Maestra Oriental (Smor): Inédito.

Santisteban E. 1990. Caracterización y preparación de la muestra del sector Chiquita del Yacimiento hierro Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma. Fondo D´SIT

Tada, D B.; Vono, Lucas L. R.; Duarte, E L.; Itri, R; Kiyohara, P K.; Baptista, Mauricio S. & Ross, Liane M. 2007. "Methylene blue-containing silica-coated magnetic particles: A potential magnetic carrier for photodynamic therapy". Langmuir, vol. 23: 8194-8199.

Walker, M M.; Diebel, C E.; Haugh, C V.; Pankhurst, P M.; Montgomery, J C. & Green, C R. 1997. "Structure and function of the vertebrate magnetic sense". Nature, vol. 390(No.6658), November: 371-376.

Zhu, R. X.; Potts, R.; Xie, F.; Hoffman, K. A.; Deng, C. L.; Shi, C. D.; Pan, Y. X.; Wang, H. Q.; Shi, R. P., Wang, Y.C.; Shi, G. H. & Wu, N. Q. 2004. "New evidence on the earliest human presence at high northern latitudes in northeast Asia". Nature, vol. 431 (No. 7008), September: 559-562.

Zinchenko, V., Ferro, P. & Cobián, T. 1988, Informe de exploración orientativa y detallada del yacimiento Yuca del Campo Mineral Hierro Santiago: Inédito.

Zinchenko, V., Ferro, P. & Cobián, T. 1989. Informe de exploración detallada del yacimiento Antoñica del campo menífero Hierro Santiago: Inédito.

Conflicto de Intereses: Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de intereses.
Contribuciones de los autores: Redacción - primera redacción: José Antonio Alonso Pérez. **Investigación:** José Antonio Alonso Pérez, Abdel Casanova Gómez, Emilio Montejo Serrano y Rubén Alcalá Fariñas. **Análisis formal:** José Antonio Alonso Pérez, Abdel Casanova Gómez y Emilio Montejo Serrano. **Redacción - revisión y edición:** José Antonio Alonso Pérez, Abdel Casanova Gómez y Emilio Montejo Serrano. **Gestión de Proyecto:** Emilio Montejo Serrano

Este artículo se encuentra bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)