

Presencia de tierras raras en óxidos de las lateritas del oriente cubano: posibles aplicaciones

Laterite mineral as an alternative material in the development of special materials for electronics



<https://cu-id.com/2144/v16e12>

Ramón Eddie Peña Abreu^{1*}, Gerardo Orozco Melgar², Jorge Miranda López³

RESUMEN: En un análisis profundo del estado del arte, se conoció que al menos cinco tipos de óxidos de Fe y uno de manganeso, se sintetizan en laboratorios para añadirle un elemento de las tierras raras o del grupo del platino, ya que estos en pequeñas cantidades modifican las propiedades físicas del óxido y se emplean en la producción de componentes electrónicos. Se conoce que estos óxidos están presentes en los yacimientos lateríticos del oriente cubano y que en ellos también aparecen elementos de las tierras raras. Constituyó el objetivo, precisar, la presencia de elementos de las tierras raras y del grupo del platino en los óxidos de los yacimientos lateríticos del oriente cubano y las fracciones de tamaño en las cuales aparecen, que puedan ser empleados en la obtención de materiales especiales para la industria electrónica. Se exponen los métodos de selección y preparación de las muestras de todo el perfil, entre ellas la separación granulométrica y densogranulométrica. Los análisis físicos, químicos y mineralógicos realizados, los métodos empleados, entre ellos la determinación del tamaño de partícula, la difracción de rayos x, la microscopía electrónica y Ramans. Los datos de los análisis se procesaron e interpretaron con estadística multivariada. Como resultado se conoció que el Sc y el Yb están presentes en los óxidos de Fe de todo el perfil laterítico, el Yb en menor proporción que el Sc. Los elementos de las tierras raras se encuentran fundamentalmente en tres tipos lateritas, en los tamaños de partículas más finos.

Palabras clave: óxidos de Fe, Mn y Al, nanomateriales, difracción de Rayos- X, estadística multivariada.

ABSTRACT: In the nickel industry, materials that do not meet the condition of ore are accumulated in waste dumps, and ways are sought to use them in the industry or to promote new products. In a thorough analysis of the state of the art, it was found that at least five types of Fe oxides and one of manganese are synthesized in laboratories to add a rare earth element or a platinum group element, since these in small quantities modify the physical properties of the oxide and are used in the production of electronic components. It is known that these oxides are present in lateritic deposits and that rare earth element also appear in them. The objective was to specify the types of minerals in the profile of lateritic deposits that can be used to obtain special materials for the electronic industry. The methods of selection and preparation of samples from the entire profile are explained, including granulometric and elutriation separation. The physical, chemical and mineralogical analyses carried out, the methods used, including particle size determination, X-ray diffraction, electron microscopy and Ramans. The data from the analyses were processed and interpreted with multivariate statistics. As a result, it was known that Sc and Yb are present in the Fe oxides of the entire lateritic profile, Yb in a lower proportion than Sc. The rare earth elements are found mainly in three laterite types, in the smallest particle sizes.

Keywords: Fe oxides, Mn y Al, nanomaterials, X-ray diffraction, Multivariate Statistics.

INTRODUCCIÓN

En Peña, Aróstegui y Ortiz (2023) se expone el conjunto de aplicaciones de los óxidos de Fe, Mn, Al y Cr cuando están acompañados con trazas de los minerales críticos (Hendriwardani & Ramdoo, 2024) del grupo de las tierras raras (ETR) y los platinoides

(EGP). Estos óxidos se encuentran de forma natural en los yacimientos de Ni y Co del oriente cubano, acompañados de los ETR y EGP (Proenza *et al.*, 1998a; 2007b; 2010c; 2011d; Aiglsperger, 2015), pero no se conoce con precisión como estos elementos acompañan a los óxidos y las fracciones de tamaño donde se encuentran.

Recibido: 07/09/2024

Aprobado en su forma original: 09/12/2024

¹Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CPIMM). Carretera Varona km 1 ½ No. 12028, Boyeros, La Habana, Cuba.

²Departamento de Geología. Facultad de Geología y Minas. Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Avenida Calixto García Iñiguez #15 entre Av.7 de Diciembre y Calle Reynaldo Laffita Rueda, Rpto Caribe, Moa, Holguín, Cuba.

³Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Carretera Yagrumaje Km7, Municipio Moa, Holguín, Cuba. E-mail: cediniq@cil.moa.minem.cu
*Correo electrónico: ramoneddiepena@gmail.com

Conflicto de Intereses: Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores: **Investigación:** Ramón Eddie Peña Abreu, Gerardo Antonio Orozco Melgar (Interpretaciones mineralógicas). **Metodología:** Ramón Eddie Peña Abreu. **Redacción. Primera redacción:** Ramón Eddie Peña Abreu. **Revisión y ajustes:** Gerardo Antonio Orozco Melgar. **Análisis formal:** Ramón Eddie Peña Abreu, Gerardo Antonio Orozco Melgar.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Los yacimientos lateríticos tienen su génesis en un complejo proceso de meteorización de las rocas ultrabásicas. Se genera un producto residual (PRM) tan complejo como el propio proceso. En el perfil se diferencian varios horizontes por propiedades, no todos los autores interpretan de igual forma estas diferencias (Lavaut, 2007a, 2018b; Elias, 2001), su orden es sólo un modelo que se cumple con la misma aleatoriedad del proceso de formación, lo más frecuente es que estos horizontes, se entremezclen y combinen de diferentes formas (Muñoz *et al.*, 2015).

La investigación se desarrolló con el objetivo de precisar, la presencia de ETR y EGP en los óxidos de los yacimientos lateríticos del oriente cubano y las fracciones de tamaño en las cuales aparecen.

Se parte de la hipótesis de que los minerales críticos están presentes en estos yacimientos y que el análisis en muestras de diferentes materiales definirá las fracciones y los tipos que contienen óxidos acompañados de ETR y EGP.

Fueron elegidos testigos de muestras tecnológicas por la amplia variedad de comportamientos sustanciales y mineralógicos que ellas aportan. La cual es producto de su génesis, descrita en informes geológicos y en otras investigaciones (Agurenko *et al.*, 1973; Aleojin *et al.*, 1977; Garí, 2002; Garí *et al.*, 2003; Lavaut *et al.*, 2007), es el residual de la meteorización de rocas ultrabásicas, una argamasa heterogénea de minerales. Esta composición ha justificado el empleo de herramientas avanzadas de la matemática para el diseño de las muestras tecnológicas (Peña y Palanco, 2013) y para elegir entre los testigos proporcionados, las muestras de la investigación (Legrá & Cala, 2019).

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de muestras representativas

Las muestras se recolectaron de los testigos obtenidos en muestras tecnológicas (MT) de los últimos 10 años, de yacimientos lateríticos del oriente cubano. Las MT fueron diseñadas con métodos que aseguran la representatividad en proporciones de sus minerales (Peña & Sam, 2013; Legrá & Cala, 2019).

Se eligió un conjunto de 181 muestras, con una buena conservación, entre más de 400 testigos, pertenecientes a los tipos de la clasificación propuesta en Peña y Vera (2013). Esta se compone de once clases, y dos subclases por cada una, se subdividen según sea la ley de corte establecida, a las 22 subclases se le denominó tipos del comportamiento geoquímico (TCG) (Fernández, 2021). Tienen correspondencia con la clasificación tecnológica de las menas (Agurenko *et al.*, 1973) y la establecida en la terminología cubana para el perfil de meteorización (Lavaut, 2003; 2018). Se conocen las propiedades químicas, físicas y mineralógicas

(Peña *et al.*, 2017). Para optimizar el número de muestras por TCG se reclasificaron los 181 testigos, se asumió el criterio de máxima inercia y máxima entropía (Crivisqui & Droesbeke, 1993; Crivisqui, 2006 a, b y c) lo que garantiza el mayor aporte de información con las muestras elegidas (Peña, 2015).

Preparación de las muestras

Los análisis químicos y físicos requieren una preparación específica de las muestras, ya que los ETR y EGP se supone que se encuentran en las fracciones más densas y finas. Se emplearon dos tipos de separación, la primera por elutriación hídrica, esta separa el material en partículas con diferentes densidades y tamaños mediante un fluido en movimiento y la segunda por centrifugación con el empleo de un equipo Knelson, ambos realizan una separación densogranulométrica.

La muestra se homogeneiza por el método de cono y anillo, se divide con el cuarteador de Young para reducirla hasta obtener cuatro muestras de un kg (ver fig. 1), se codifican de forma conveniente, una parte se envía al laboratorio para realizarle análisis químicos. Otras se emplean en la separación densogranulométrica. A estas últimas se le realiza el proceso de separación y se utiliza la fase más densa en cada caso para la búsqueda de tierras raras y platinoideas.



Figura 1. Cuarteo y homogeneización de la muestra.

Separación densogranulométrica

Separación con elutriador

Consiste en una cámara vertical de sedimentación, formada por uno o más tubos verticales o torres en serie, dentro de los cuales pasa un fluido ascendente, en este caso de agua, una masa de sólidos que desciende a contracorriente con una velocidad definida por la rapidez del flujo y el área de la sección transversal del tubo. Las partículas grandes, con velocidad terminal o de Stoke,

superior a la velocidad del flujo ascendente, descienden y son recolectadas en el fondo de la cámara (Sam, Gresesqui y Miranda, 2010). Las partículas pequeñas con menor velocidad terminal, son arrastradas por el flujo hacia la parte superior. El tamaño de las partículas separadas varía con la velocidad del flujo. Se separaron dos fracciones, la fina se extrae por la parte superior y la arena por el fondo.

El concentrador Knelson

Es un separador centrífugo de trampilla, compacto, con un lecho fluidizado activo para capturar minerales pesados. Actúa sobre las partículas con una fuerza centrífuga que alcanza hasta 60 veces la gravedad, atrapa las partículas más densas en una serie de anillos, las partículas de baja densidad son expulsadas. La suspensión de alimentación se introduce a través de un tubo de alimentación estacionario en el cono de concentrado. Cuando llega al fondo del cono, la fuerza centrífuga la empuja hacia afuera y hacia arriba por la pared. El agua de fluidización se introduce a través de una serie de orificios de fluidización. La suspensión llena cada anillo hasta su capacidad para crear un lecho de concentración, el agua de fluidización inyectada en los anillos se controla para lograr una fluidización óptima, e impedir la compactación del lecho. Las partículas de alta gravedad específica son capturadas y retenidas en el cono concentrador. Cuando se completa el ciclo, los concentrados se empujan desde el cono hacia la colada. Este procedimiento automatizado se logra en menos de 2 min (911METALLURGY CORP.).

Métodos de análisis químicos, físicos y mineralógicos

Se analizaron características mineralógicas, químicas y físicas del PRM que conforma los yacimientos lateríticos. El estudio mineralógico se realizó mediante técnicas de microscopía óptica integral, DRX y MR. Se tuvieron en cuenta los resultados de trabajos previos desarrollados (Peña *et al.*, 2017; Peña *et al.*, 2018).

La DRX mide la difracción de los Rayos X al proyectarse sobre la cara de los cristales de las fases mineralógicas (Kittel, 1996). El análisis mineralógico se realizó en un difractómetro X'PERT³ de PANalytical, instalado en el Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), mediante el método de polvo, los difractogramas se obtuvieron con medición en modo continuo y registro angular desde 4,0042 ° hasta 79,9962 °; barrido tipo Gonio en [°2θ]; distancia de paso en °2θ de 0,0080; tiempo de medición en cada posición angular de 26.4 segundos; radiación de Cu y filtro de níquel;

la diferencia de potencial es de 40 kV; corriente de 30 mA; la longitud del espécimen fue de 10 mm; la temperatura ambiente (25°C); se empleó el software Origin (v. 8, W.) para la conversión intensidades relativas vs. dispersión angular (2θ) en difractogramas. La calibración del equipo se chequea con patrón externo de silicio. El análisis cualitativo de fases se realiza el programa XPert-HighScore de Panalytical.

El análisis de la composición química se realizó con espectroscopia de plasma inductivamente acoplado (ICP), en el Laboratorio Central de Minerales "Isaac del Corral (LACEMI)

La definición del tamaño de partículas se realizó en el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) mediante la técnica de difracción láser, la cual mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada, cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Las partículas grandes dispersan la luz en ángulos pequeños en relación con el rayo láser y las partículas pequeñas dispersan la luz en ángulos grandes. Luego se analizan los datos de la intensidad de dispersión angular para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión, se utiliza la teoría Mie de la dispersión de luz (Mishchenko *et al.*, 2002). El tamaño de la partícula se registra como un diámetro de esfera equivalente al volumen (Martínez, 2006). Se usó el analizador Horiba LA-950V2, que permite medir el tamaño de las partículas en el rango de los (10^{-10} a $3 \cdot 10^{-6}$) m. Los resultados del análisis se exponen en dos gráficos y una tabla que devuelve el software del equipo, uno de los gráficos es la densidad distribución por tamaños de las partículas y el otro es la distribución acumulativa.

Métodos de interpretación de los resultados

Se explicó que las muestras para los análisis mineralógicos se prepararon por dos vías, el análisis se le realiza a ambos tipos de muestras contrastando los análisis químicos con los resultados de las técnicas mineralógicas empleadas. El análisis cruzado de métodos permitió identificar las fases mineralógicas correspondientes a los TCG de cada muestra (fig. 2).

Los contrastes cruzados de las 22 muestras en los tres métodos empleados pueden ser engorrosos sin herramientas automáticas, por ello se crearon macros que contabilizan la correspondencia. Los análisis químicos se comparan con la composición de las fases mineralógicas por muestras. La aparición de las fases en los métodos cualitativos se compara con patrones obtenidos del Webmineral (2022). y se crea una tabla con la composición mineralógica mayoritaria, la cual se resume por TCG en una tabla dinámica. Este procesamiento se realizó en Excel,

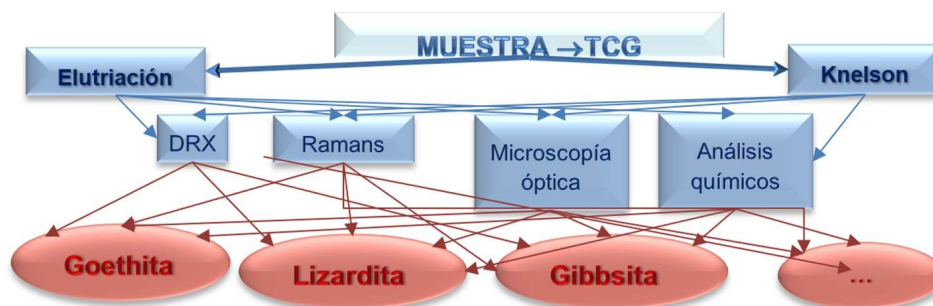


Figura 2. Esquema de análisis de la composición mineralógica de las clases sustanciales

incluyendo la programación de las subrutinas en el sistema de Macros de M. S. Office.

Se realizaron 22 muestras de análisis mineralógico clásico y con microscopía Ramans; 44 muestras por DRX y una muestra en Microscopía Electrónica. Se analizó el tamaño de partículas a 22 muestras.

Preparación y procesamiento de los datos

La base de datos se formó a partir de los análisis químicos y mineralógicos, compuesta de varias tablas normalizadas por el código de las muestras que permiten generar una tabla única para el análisis estadístico. Se empleó el análisis de componentes principales (ACP) (Crivisqui & Droesbeke, 1993; Crivisqui, 2006a; García-Álvarez & Fuente, 2011; Chávez et al., 2015) y el de correspondencia múltiple (ACM) (Crivisqui, 2006b), ya que se cuenta con tablas de variables cualitativas.

Se emplea el software Spad (V. 5.6), este devuelve un gráfico de correlaciones que toma la forma de un círculo de radio unitario, en el cual cada variable está representada por un vector. Se grafica el plano factorial que acumula el mayor porcentaje de información. Las mejores representadas se muestran en el gráfico con una longitud cercana o igual al extremo del círculo y recíprocamente, las de menor longitud están mal representadas en ese plano factorial. La correlación se lee en el ángulo formado entre los vectores, los ángulos más agudos muestran correlaciones positivas; los llanos o cercanos a este, negativas y los rectos o cercanos a él, muestran independencia. Esto permite mostrar de una forma rápida el estado de las correlaciones entre las variables y su aporte de información al fenómeno o proceso estudiado. Para obtener el valor numérico de las correlaciones se necesita leer la matriz de correlación.

El análisis de correspondencias múltiples (ACM) es una técnica multivariante que permite resumir y profundizar en la información que aportan una serie de variables cualitativas acerca de un conjunto de individuos.

En relación a los individuos, y a través de su adscripción o no a las categorías de las diferentes variables, detecta las similitudes que existen entre ellos. En cuanto a las variables, indaga en las relaciones existentes entre sus categorías, relaciones derivadas de la manera en la que los individuos se adscriben a unas u otras.

Uno de los principales aportes del ACM es proyectar nubes de puntos con toda la información disponible, pero de imposible visualización por pertenecer a espacios de dimensión mayor que tres, en espacios de dimensión menor que sí sean visualizables, con la menor pérdida de información posible. Una proyección, para que sea visualizable, deberá estar hecha sobre un espacio plano o una representación 3D. Por simplicidad, las que se utilizan habitualmente son las bidimensionales y su análisis se realiza a través de representaciones gráficas. Esto se hace tanto por individuos, como por categorías en la nube que aglutina la información. Se trata de una técnica de reducción de la dimensión al igual que el ACP, que permite la visualización de la información disponible en los datos analizados, mediante proyecciones sobre planos determinados por los ejes o dimensiones que recogen la mayor cantidad de información.

El tratamiento de datos de diferentes tipos (cualitativos y cuantitativos) implica una complejidad adicional en el procesamiento e interpretación de los datos. Para lograr mitigar lo complejo del análisis, se procesarán los datos en diferentes escenarios para valorar las relaciones conjuntas y las particulares de los análisis. Esto permitirá asociar la presencia de los ETR y EGP en las fases mineralógicas reportadas en el análisis óptico tradicional (dadas en %) y con técnicas de avanzada (DRX, Ramans y MEB) que solo expresan la presencia de una u otra fase, generan de esta forma variables cualitativas. Las asociaciones que se establecen repetitivas confirman la presencia de las fases en la muestra y las asociaciones de los diferentes elementos químicos a las fases hablan de su composición, de esta forma se pueden aplicar las técnicas de análisis cruzado (fig. 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados analíticos

La composición de las primeras muestras seleccionadas que se expone en las figs. 3 - 5 y la tabla 1. El resultado correspondiente del análisis mineralógico óptico integral clásico, se expone en la fig. 7. Este análisis se completó con técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía Ramans, se exponen en las tablas 2 y 3. Las muestras concentradas con el Knelson presentaron la composición elemental que se exponen en las figs. 5 - 7.

Resultados granulométricos

El análisis granulométrico se expone en la fig. 8.

Resultados del análisis de tamaño de partículas

El análisis de la distribución de tamaño de partículas (DTP) permitió conocer la distribución en los intervalos del material concentrado en el Knelson. La DTP se expone en la tabla 4, los colores en las celdas simulan un gráfico de barras y en la última columna se expone una minigráfica de línea. Dos muestras no se pudieron medir.

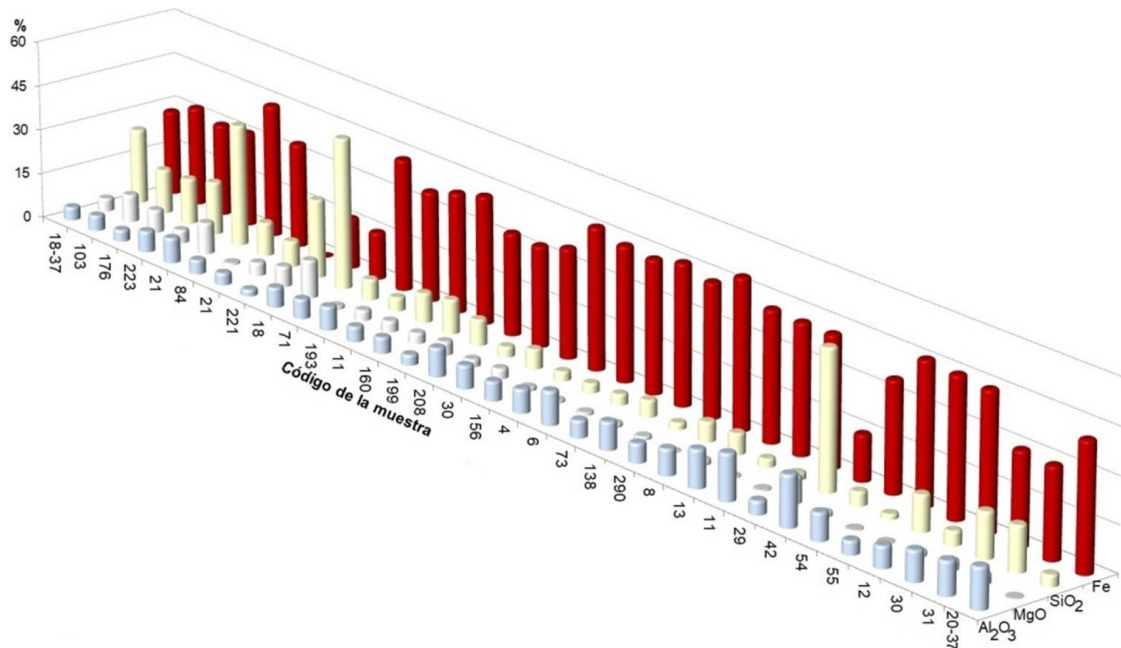


Figura 3. Composición sustancial de las muestras, elementos de mayor contenido.

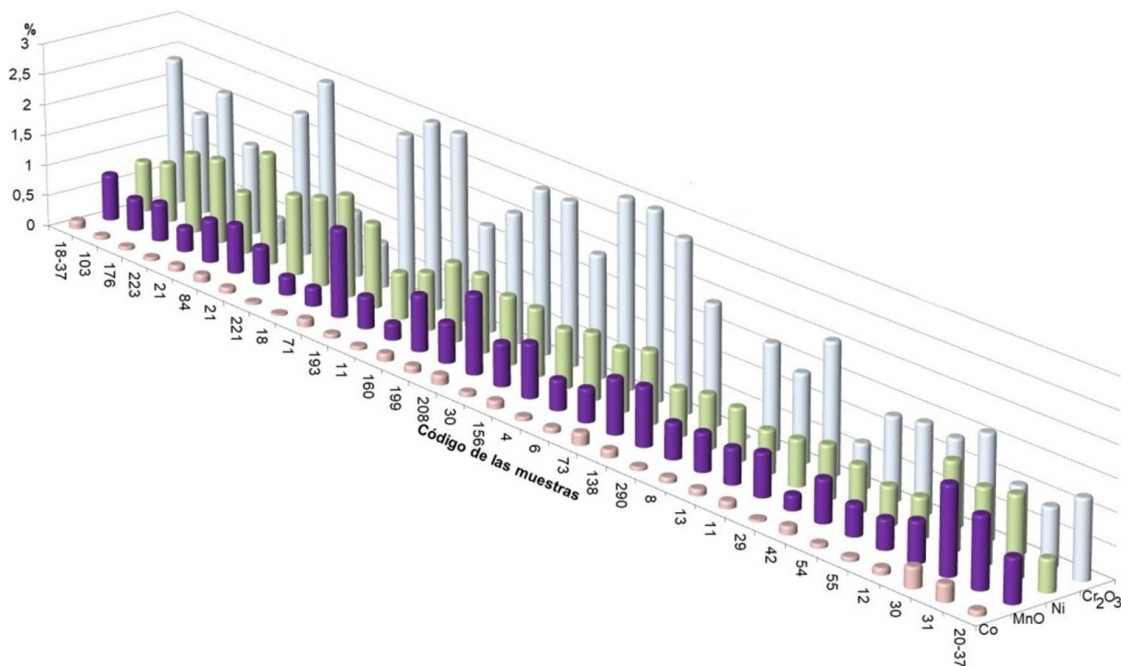


Figura 4. Composición sustancial de las muestras, elementos de menor contenido.

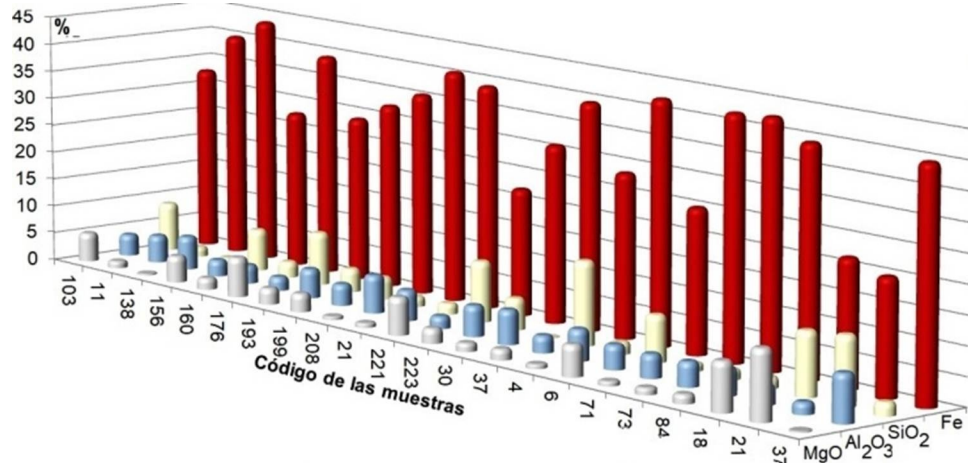


Figura 5. Composición sustancial, en elementos de mayor contenido. Muestras concentradas en el Knelson.

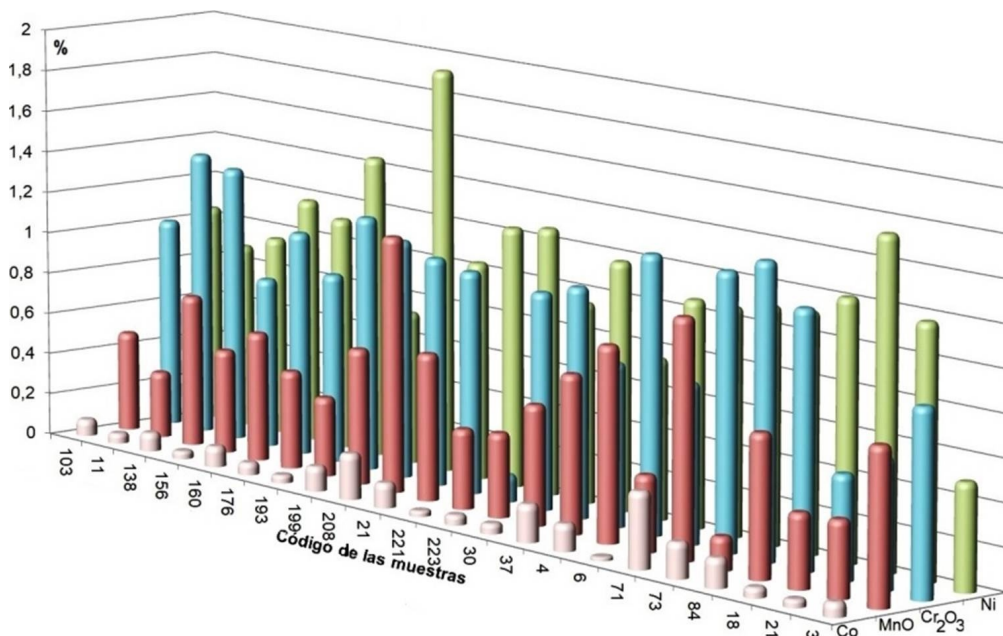


Figura 6. Composición sustancial, elementos de menor contenido. Muestras concentradas en el Knelson.

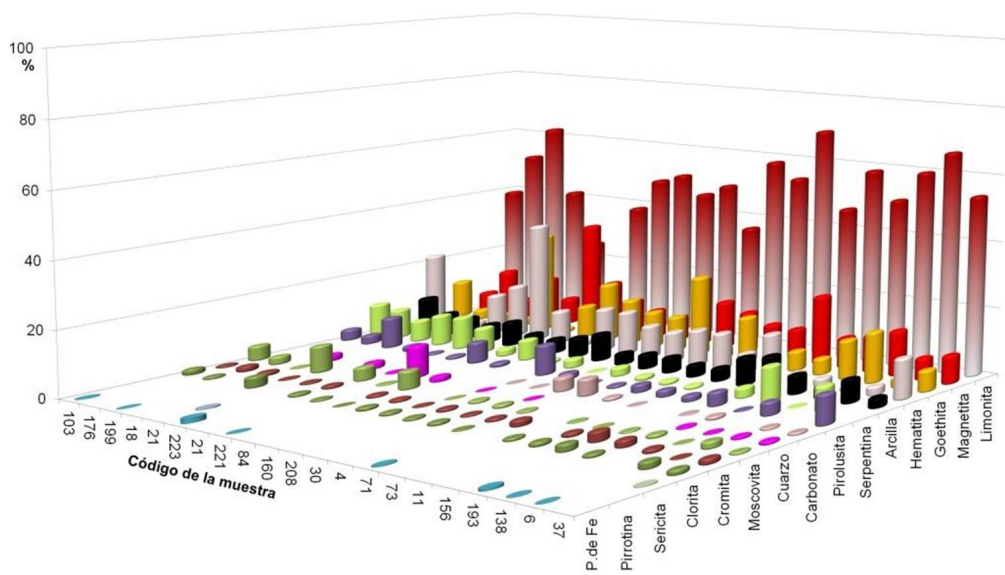


Figura 7. Mineralogía de las muestras, método óptico integral.

Tabla 1. Elementos de las tierras raras y platinoides

Muestras	Ce	Dy	Nd	Sc	Sm	Y	Yb	Pt	Pd
37	47,44	1,27	7,08	54,2	2,7	5,35	1,94	0	0
103	11,96	0	6,18	54,6	3,28	6,59	1,57	0	13,5
176	7,76	0	4,94	45,8	2,37	5,45	1,06	0	0
223	25,87	0	5,41	57,7	3,63	6,85	1,86	0	10,6
21	6,64	1,13	7,33	36,9	3,67	9,71	1,13	0	11
84	24,11	1,12	8,52	71	3,99	8,96	2,46	0	16
21	20,71	0	5,84	71,7	4,17	5,5	2,24	0	0
221	7,32	0	5,34	37,5	2,52	6,34	0,97	0	0
18	4,68	0	2,29	33	1,88	4,38	0,51	0	8,28
71	42,26	3,95	17,5	80,8	5,91	16,27	3,97	0	4,43
193	28,02	1,06	8,69	63,2	3,17	8,13	2,13	0	15,5
11	23,69	2,37	13,8	74,1	5,16	18,87	3,19	6,48	11,6
160	15,79	1,25	9,3	63,1	3,8	11,15	2,3	0	0,73
199	10,74	1,62	8,44	60,7	3	16,66	2,14	0	0
208	31,82	1,63	7,23	81	3,2	8,07	2,51	0	0
30	22,87	0	6,11	69,8	2,22	6,3	2,07	0	12
156	8,72	0	5,29	47,4	2,51	6,84	1,43	4,19	4,1
4	30,11	0	5,84	78,5	3,76	5,23	2,49	0	4,43
6	8,43	0	4,39	48,4	3,3	4,46	1,17	0	0
73	44,64	1,95	10,2	79,8	4,52	10,98	3,35	0	0
138	17,52	1,44	6,2	81	3,04	8,27	3,3	1,36	10,9
37	35,49	0	1,82	70,2	2,23	1,68	2,05	0	0
Clarke	66,5	5,2	41,5	22	7,05	33	3,2		
Mínimo	4,68	0	1,82	33	1,88	1,68	0,51	0	0
Máximo	47,44	3,95	17,5	81	5,91	18,87	3,97	6,48	16
Promedio	21,66	0,85	7,17	61,8	3,365	8,275	2,084	0,547	5,59
Mediana	21,79	0,53	6,19	63,1	3,24	6,84	2,1	0	4,27

Tabla 2. Fases¹ de Óxidos e Hidróxidos de Fe, DRX, Ramans.

		Óxidos e Hidróxidos de Fe en %														
	TCG	Goethita	Hematita	Magnetita	Cromatita	Cochromite	Nichromite	Trevorite	Espinela	Maghemita	Magnesioferrita	Chromita	Magnesiocromita	Titanomagnetita	Magnetita	Ferroan
Saprolitas	1_0	2,3	2,6	3,2	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	4,0	3,4	4,3	4,3	4,3	4,3
	1_1	20,9	23,1	19,4	21,7	25,0	20,8	21,7	21,7	21,7	20,0	17,2	21,7	26,1	26,1	21,7
	2_2	2,3	2,6	3,2	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	4,0	3,4	4,3	4,3	4,3	4,3
	3_0	2,3	2,6	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	3_3	2,3	2,6	3,2	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	4,0	3,4	4,3	4,3	4,3	4,3
	4_4	2,3	2,6	3,2	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	4,0	3,4	4,3	4,3	4,3	4,3
Limonitas	5_5	9,3	10,3	12,9	4,3	4,2	4,2	4,3	4,3	4,3	8,0	13,8	4,3	4,3	4,3	4,3
	6_0	9,3	7,7	9,7	4,3	4,2	4,2	8,7	8,7	4,3	8,0	6,9	4,3	4,3	4,3	4,3
	6_6	11,6	12,8	16,1	21,7	20,8	20,8	21,7	21,7	21,7	20,0	17,2	21,7	21,7	21,7	21,7
	7_0	4,7	2,6	0,0	0,0	4,2	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	7_7	9,3	10,3	12,9	17,4	16,7	16,7	17,4	17,4	17,4	16,0	13,8	17,4	17,4	17,4	17,4
	8_0	18,6	15,4	9,7	13,0	8,3	8,3	8,7	8,7	13,0	8,0	13,8	13,0	8,7	8,7	13,0
11_0	4,7	5,1	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

¹ El valor porcentual se calcula por la frecuencia de aparición en las 44 muestras analizadas

Tabla 3. Fases de óxido, hidróxidos, silicatos de Mn y Al, DRX.

	Óxido e Hidróxidos de Al					Óxidos, hidróxidos y silicatos de Mn		
	TCG	% Aluminocromita	% Clinocrysotilo	% Bayerita	% Aluminio cromita	% Gibbsite	% Bementita	% Birnessita
Saprolitas	1_0	4,35	4,55	4,17	4,17	3,03	4,35	4,17
	1_1	21,74	22,73	20,83	29,17	15,15	21,74	20,83
	2_2	4,35	4,55	4,17	4,17	3,03	4,35	4,17
	3_0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,35	0,00
	3_3	4,35	4,55	4,17	4,17	3,03	4,35	4,17
	4_4	4,35	4,55	4,17	4,17	3,03	4,35	4,17
Limonitas	5_5	4,35	4,55	4,17	4,17	12,12	4,35	4,17
	6_0	4,35	4,55	4,17	4,17	6,06	4,35	4,17
	6_6	21,74	22,73	20,83	20,83	15,15	21,74	20,83
	7_0	4,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	7_7	17,39	18,18	16,67	16,67	12,12	17,39	16,67
	8_0	8,70	9,09	12,50	8,33	21,21	8,70	8,33
	11_0	0,00	0,00	4,17	0,00	6,06	0,00	8,33
	Total	100	100	100	100	100	100	100

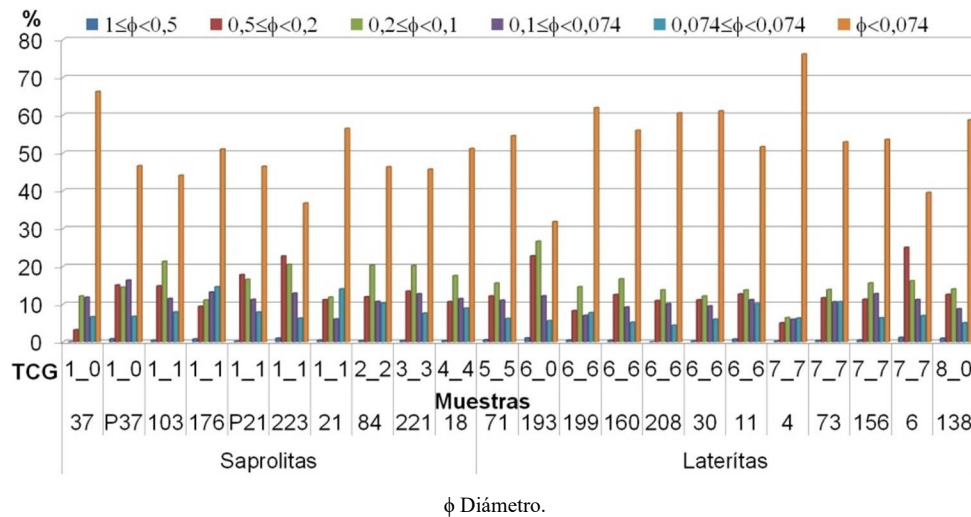


Figura 8. Distribución granulométrica de las muestras.

Tabla 4. Tamaño de partícula promedio por tipo de materiales

	Intervalo de tamaño					
	TCG ^a	I1 [0; 60] μm	I2 (60; 120] μm	I3 (120; 180] μm	I4 (180; 240] μm	I5 (240; 2050] μm
Saprolitas	1_0	71,75	19,84	5,70	2,18	0,53
	1_1	72,64	9,20	6,00	4,06	8,10
	2_2	45,88	14,17	5,98	4,51	29,46
	3_0	43,00	11,01	1,71	0,40	43,89
	3_3	5,27	3,29	2,33	2,44	86,68
Lateritas	5_5	45,53	24,79	9,35	3,47	16,87
	6_0	87,29	12,00	0,71	0,00	0,00
	6_6	68,07	18,13	5,97	2,60	5,24
	7_7	67,09	14,99	5,37	3,14	9,41
	8_0	77,98	15,07	4,57	1,73	0,66
	Total	64,10	14,02	5,17	2,79	13,92

TCG. Tipos del comportamiento geoquímico

La fracción predominante es la más fina, las cuatro muestras excepcionales se analizaron por separado, se ajustan a otros intervalos de tamaño y se exponen en la fig. 10. Son saprolitas, dos del TCG 1_1 y dos de 2_2 y 3_3 todas constituyen menas serpentiniticas de balance (SB) para los procesos extractivos de Ni, este comportamiento es típico en estos TCG pero no en toda la SB.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En Peña *et al.*, (2023) se concluye que los compuestos más empleados en la fabricación de electrodos para supercondensadores y baterías de altas tecnologías tienen las siguientes formas:

1. Fe_xO_y ($x = 1, 2$; $y = 1, 2, 3$);
2. $\gamma-Fe_2O_3$;
3. $Fe(OH)_x$, ($x = 1, 2, 3$);

4. $FeO(OH) \cdot nH_2O$;
5. $\gamma-Fe^{3+}O(OH)$
6. $NdMe_{0,5}Mn_{0,5}O_3$ donde $Me = Co, Ni, Cu$;
7. $\alpha-(Co+Ni)(OH)_2 \cdot NH_2O$ (óxidos binarios)
8. RuO_2 ;
9. IrO_2 ;

En los últimos tres óxidos del listado se consideran ideales para la fabricación de los componentes mencionados, por ser caros y difíciles de obtener se busca la sustitución del Ru, el Ir y el V por otros metales de transición como Co y Ni, o se emplean los primeros seis dopados con ETR, EGP o ambos.

La búsqueda se centró en los elementos y compuestos similares a los seis primeros óxidos relacionados, a partir de los análisis químicos y mineralógicos realizados a las muestras del PRM.

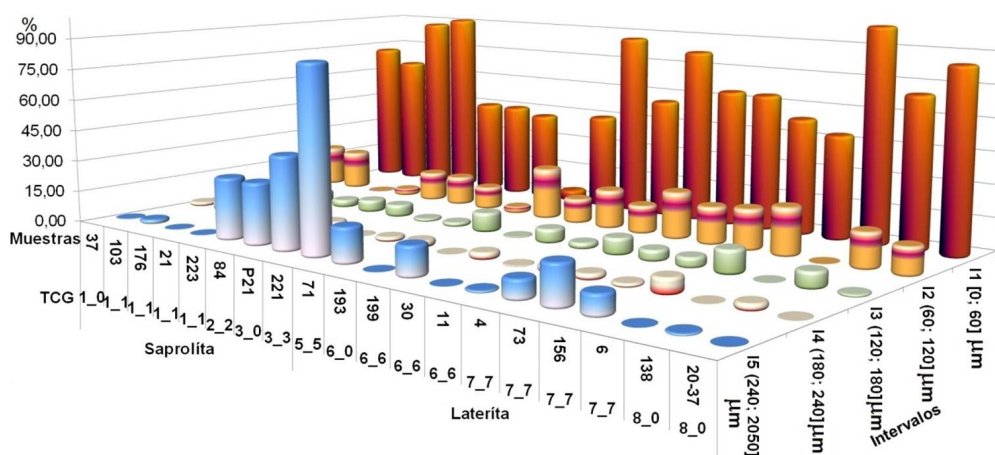


Figura 9. Distribución del tamaño de partículas por muestras y tipos de materiales.

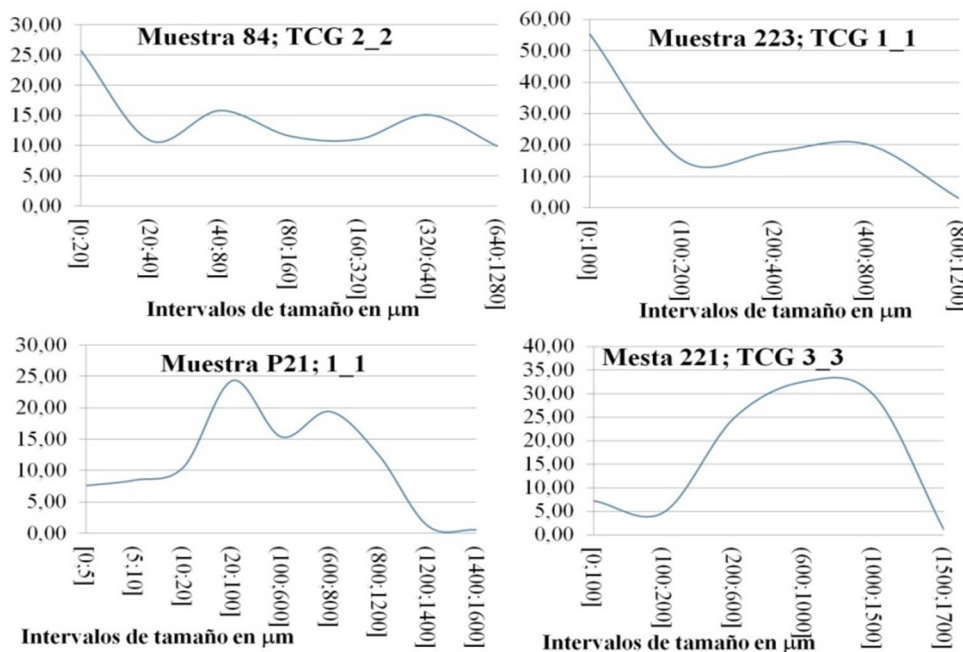


Figura 10. Distribución del tamaño de partículas de cuatro muestras sapolíticas.

El análisis de componentes principales (ACP) de las variables cuantitativas expuestas en el punto anterior, se muestra en la **fig.11**. Se distinguen tres grupos fundamentales de variables directamente correlacionadas y un cuarto grupo poco significativo, estos se asocian al primer y segundo eje factorial. Los resultados se interpretan por escenarios de interés. El primero comprende los óxidos de Fe que se asocian a los primeros relacionados en el primer párrafo de este acápite y el segundo los óxidos de Mn que es el sexto en la lista. Los otros no se tendrán en cuenta porque no se obtienen de forma natural en los YLOC.

Aquí \uparrow indica correlación directa, \downarrow indica correlación inversa y \uparrow indica que hay una tendencia a correlacionarse de forma directa, esta flecha en sentido contrario indica tendencia inversa de correlacionarse. La “k” en los elementos del gráfico indica que es la fracción concentrada por Knelson.

Análisis de las variables asociadas a los óxidos de Fe

El centro del primer grupo de correlación es el hierro y es inverso al segundo grupo. Las correlaciones del Fe: $Fe^k \uparrow Sc \uparrow Yb \uparrow Cr^k$; b) $Fe \uparrow Fe^k$; c) $Fe^k \uparrow Al_2O_3^k$; otras correlaciones dentro del grupo d) $Al_2O_3 \uparrow Al_2O_3^k$. Correlaciones colaterales con variables externas al grupo e) $>Yb \uparrow (Co, Co^k, Mn)$. Las tendencias son

f) $Fe \uparrow Cr^k$; g) $Yb \uparrow Fe$. Con variables externas al grupo h) $Yb \uparrow (Ce, Dy, Sm)$.

Las correlaciones de mayor interés en este grupo se observan entre el Fe, el escandio y el iterbio de las muestras separadas por Knelson. El Fe en estas muestras se encuentra en formas de óxidos según se observa en el análisis mineralógico que se expone en la **fig. 7** y la **tabla 2**

El escandio y el iterbio se suponen unidos a estos óxidos, también a la cromita. El primero supera su Clark más de tres veces, no sucede lo mismo con el iterbio, sólo 1,2 veces (ver **tabla 2**). Estas correlaciones confirman las fases y grupos mineralógicos que se han reportado en la literatura especializada (Rojas *et al.*, 2005; Agyei *et al.*, 2009 a y b; Ageyi & Beyris, 2011; Aiglsperger *et al.*, 2016; Peña *et al.*, 2017; Peña *et al.*, 2018; Peña *et al.*, 2020).

Los óxidos de cromo y aluminio forman parte de la misma mezcla de materiales donde el Fe es predominante (Lateritas), propio de la génesis de estos yacimientos, de ahí su alta correlación. De la **tabla 3** se puede concluir que los óxidos de Fe están presentes en las muestras de lateritas en más de un 60 %, mientras que en las saprolitas no superan el 50 %

Las propiedades que los ETR le imprimen a los óxidos de Fe se exponen en varios artículos, donde se afirma que estos óxidos dopados con cualquiera de los ETR pueden ser empleados en la fabricación de componentes electrónicos,

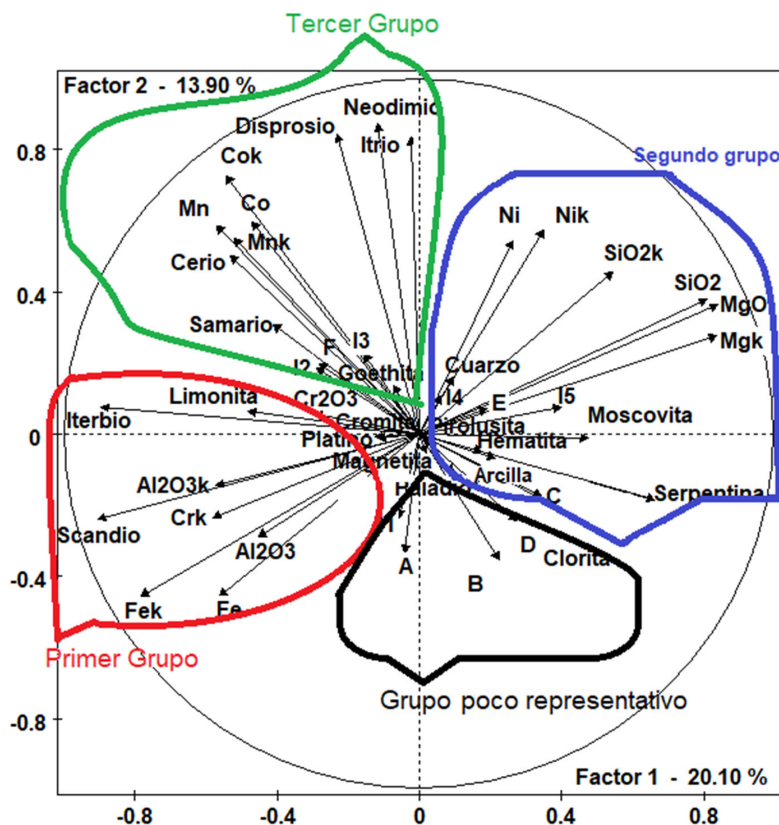


Figura 11. ACP de todas las variables cuantitativas

fundamentalmente de electrodos para baterías de Ni-Cd y de ion Li, condensadores y supercondensadores (Martín & Chamorro, 2010; Calles, 2009; Montalvo, 2020; Guzmán, 2020). Las aplicaciones y todo lo relacionado con el empleo de los óxidos relacionados en la industria electrónica y todo el conocimiento sobre estos óxidos en los YLOC hasta el momento de esta investigación se han compilado en (Peña *et al.*, 2023).

Las muestras que superan el Clarke de Yb pertenecen a los TCG, 1_1, 11_0 (Saprolíticos), 5_5, 7_7, 6_0, 8_0 (Lateríticos). Todas las muestra superan el Clarke de Sc, estas pertenecen a los TCG, 1_0, 1_1, 2_2, 3_0, 3_3, 4_4, 11_0 (Saprolíticos); 5_5, 6_0, 6_6, 7_0, 7_7, 8_0 (Lateríticos).

La relación de los óxidos de Fe, Al y Mn con la granulometría del MRM se exponen en algunos trabajos relacionados con el beneficio del mineral laterítico (Hernández *et al.*, 2000 y Hernández *et al.*, 2017) y en otros donde se investiga la composición mineralógica de los YLOC (Rojas, 1998; Peña, Cala; Capote, *et al.* 2017). Se conoce que la Goethita está presente en todo el perfil, pero en la fracción menor de 45 μk se concentra junto a otros óxidos de Fe.

En las muestras estudiadas, la limonita tiene tendencia a correlacionarse con el tamaño de partículas más fino, $\leq 60 \mu\text{m}$ (fig. 9 y 11), más del 60 % (14 muestras) superan el 50 % de la masa en esta fracción, cerca del 20 % (5 muestras) entre 40 % y 50 % y cerca de un 14 % (3 muestras) con menos del 15 %. Lo que asegura que esa fracción es mayoritaria en estos yacimientos, se deduce que los óxidos dopados con escandio e iterbio y es posible con otros metales de los EGP o ETR, pueden ser separados en estas fracciones.

En el ACP (fig. 11) que algunos elementos cambian la intensidad de la correlación cuando el material se ha separado por vía densogranulométrica. Un caso de interés particular es la correlación del Fe con el iterbio, en el material antes de la separación por Knelson la correlación marca solo una tendencia, mientras que en el material concentrado se logra una correlación significativa, que aumenta un 39 % en diferencia relativa. Una situación inversa sucede con el Mn y el iterbio, disminuye relativamente un 13 %. El Sc refuerza su correlación en un 37 % con el Fe, un 27 % con el Al_2O_3 y un 46 % con Cr_2O_3 . Estas evidencias estadísticas abren la posibilidad del beneficio de los materiales por la vía de la separación densogranulométrica, para ser empleados en la obtención de materiales para la industria electrónica.

En el segundo grupo no aporta una información orientada al objetivo que se persigue, por lo que no se analiza y se pasa al escenario generado en el tercer grupo asociados a los óxidos de Mn.

Análisis de las variables asociadas a los óxidos de Mn

El escenario asociado al tercer grupo de correlación, el Mn centra las correlaciones y tendencias del grupo, se observa en la fig. 11 que la correlación de este elemento es a) $\text{Mn} \uparrow (\text{Co}^k, \text{Ce}, \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Yb})$; b) $\text{Mn}^k \uparrow (\text{Ce}, \text{Dy})$; c) $\text{Mn} \uparrow \text{Mn}^k$. Se muestran otras correlaciones dentro del grupo c) $\text{Co} \uparrow (\text{Mn}, \text{Mn}^k, \text{Ce}, \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Y}, \text{Yb})$; d) $\text{Co} \uparrow \text{Co}^k$; e) $\text{Co}^k \uparrow (\text{Mn}, \text{Mn}^k, \text{Ce}, \text{Dy}, \text{Nd}, \text{Y}, \text{Yb})$; f) $\text{Y} \uparrow (\text{Nd}, \text{Dy})$. Existen correlaciones colaterales con variables externas al grupo g) $\text{Co} \uparrow \text{Al}_2\text{O}_3^k$; Las tendencias son h) $\text{Mn} \uparrow (\text{Y}, \text{Sc})$; I) $\text{Mn}^k \uparrow (\text{Nd}, \text{Sc}, \text{Y}, \text{Yb})$; j) $\text{Mn}^k \uparrow F$ (fracción granulométrica); k) $\text{Co} \uparrow \text{Cr}^k$; L) $\text{Co}^k \uparrow (\text{Sc}, \text{Sm})$; M) $I_2 \uparrow (\text{Ce}, \text{Sm}, \text{Yb}, \text{Pt}, \text{Pd})$

Las variables de poca representatividad en el grupo contemplan los tamaños de partículas I_2 , I_3 , y la fracción granulométrica F. El grupo es independiente del primero y del segundo. En este grupo aumentaron los ETR que correlacionan con el Mn, con el Co y las otras variables. Lo que indica su presencia en este tipo de material en la zona, de transición ferruginosa y la saprolítica, la génesis de este fenómeno se explica en los trabajos ya referenciados de autores como (Rojas & Orozco, 1998; Muñoz *et al.* 2005; Proenza *et al.*, 2011; Aiglsperger, 2015; Aiglsperger *et al.*, 2016; Putzolu *et al.*, 2021).

La relación de variación entre el material crudo, sin procesar con el k-Nelson y el concentrado no siempre es positiva para Mn y el Co con los ETR. En la correlación $\text{Co} \uparrow \text{Ce}$ se logra un aumento del 27 %. Sin embargo con el manganeso se reduce en un 5 %. Así se puede analizar el resto de las variables, pero esto indica que la separación densogranulométrica es una vía para obtener estos óxidos a partir del material laterítico. Se puede emprender un estudio con el objetivo de definir un circuito de beneficio y obtención de materiales especiales. Las muestras asociadas a estos materiales son aquellas que poseen un mayor valor de manganeso y pertenecen a los TCG 1_1 (Saprolita), 5_5 y 6_6 (Lateritas), que forman parte de las menas niquelíferas de alto contenido de Níquel y Cobalto, su uso fundamental es la producción de Ni y Co, se deben evaluar económicamente las variantes de empleo para la diversificación del uso de estos recursos. Otros escenarios de correlación, obtenidos en el ACP, no se analizan porque no contienen información importante para los objetivos.

CONCLUSIONES

Se definió que el Sc y el Yb dopan a los óxidos de Fe, el Yb en menor proporción que el Sc. El escandio está presente en todos los tipos del comportamiento geoquímico, el Yb estará presente solo en seis.

Las correlaciones muestran que los óxidos de Mn contendrán Y, Dy, Nd y Ce; los óxidos de Fe y Mn aparecen en tres de los tipos del comportamiento geoquímico uno saprolítico y dos laterítico, se asocian a los tamaños más finos de las partículas, obtenidas por separación dens granulométrica.

RECOMENDACIONES

1. Profundizar en el beneficio de los óxidos de Fe y Mn con contenidos de ETR y EGP en las menas lateríticas.
2. Se debe demostrar la viabilidad del empleo de estos materiales con pruebas técnicas en laboratorios de electrónica.

BIBLIOGRAFÍA

- Ageyi G. P., Beyris M. E., Rojas Purón A. & Hernández Flores A. 2010. Distribución fraccional de metales y minerales en la laterita de balance del yacimiento Punta Gorda, Moa, Cuba. *Minería y Geología*, Vol. 26(No. 4): 36-52, ISSN 1993 8012. Disponible en: <<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/62/0>>, [Consultado: Mayo 5, 2014].
- Ageyi G. P. & Beyris M. E. 2011. Modelación de la distribución fraccional magnética de la mena oxidada níquelífera de Cuba. *Minería y Geología*. Vol. 27(No. 4): 40-63, ISSN: 1993 8012. Disponible en: <<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/download/271/pdf/781>>, [Consultado: Mayo 5, 2014].
- Agurenko N., Kereselidre V., Kaslikov G., Gerasimov E. & Schulzenko V. 1973. Informe sobre la exploración geológica del yacimiento punta gorda. Archivo Técnico de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara. Moa. 391 pp.
- Aiglsperger T. H. 2015. Mineralogy and Geochemistry of the platinum Group elements (PGE), rare earth elements (REE) and scandium in Nickel laterites. Tesis doctoral. Octubre, Barcelona: Universidad de Barcelona, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales. Facultad de Geología.
- Aiglsperger T., Proenza J. A., Lewis J. F., Labrador M., Svojtka M., Rojas P. A., Longo F. & Ďurišová J. 2016. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*. 73:127-147. Disponible en: <www.elsevier.com/locate/oregeor-ev>, [Consultado: Julio7, 2023].
- Alcojin V. *et al.* 1977. Sobre los resultados de los trabajos de exploración geológica detallada y orientativa realizada en el yacimiento "Punta Gorda" en los años 1973 -1976, La Habana, Cuba. Inventario 2874. Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Crivisqui E. 1999 a. Presentación del Análisis de Componentes Principales. Página de la asociación PRESTA, Université Libre de Bruxelles. Disponible en: <<http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html>> [Consultado: febrero16, 2006].
- Crivisqui, E. & J.J. Droesbeke.1993. Le concept mathématique de distance et la comparaison des éléments d'un tableau de données. *Cultures et Sociétés*. pp. 17-32. Disponible en: <http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html> , [Consultado: Febrero16, 2006].
- Crivisqui, E. (1999) (b). Presentación del Análisis de Correspondencias Múltiples. Página de la asociación PRESTA, Université Libre de Bruxelles. Disponible en: <<http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html>>, [Consultado: Febrero16, 2006].
- Crivisqui, E. 1999 c. Presentación del Análisis de Clasificación. Página de la asociación PRESTA, Université Libre de Bruxelles. Disponible en: <<http://www.ulb.ac.be/assoc/presta/Cursos/cursos.html>>, [Consultado:Febrero16, 2006].
- De Vettler D. R. 1955. How Cuban Nickel ore was formed: a lesson in laterite genesis? *Engineering and Mining Journal*. Vol 156. (No. 10): 84-87.
- Garí P. A. 2002. Informe Geológico de la exploración detallada del yacimiento Yagrumaje Norte, Archivo técnico: UEB Mina de la ECG, 100 p.
- Elias M. (2001). Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: *Giant ore deposits: Characteristic, genesis an exploration*. CDES Special Publication 4, Center for ore deposits research. University of Tasmania. pp 205220. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Mick-Elias/publication/281422746_Nickel_laterite_deposits_-_geological_overview_resources_and_exploitation/links/56ef5c0d08ae4b8b5e756d6d/Nickel-laterite-deposits-geological-overview-resources-and-exploitation.pdf , [Consultado: Marzo 3, 2024].
- Garí P. A. et al. 2003. Informe Geológico Final Exploración Detallada del Yacimiento Yagrumaje Norte por la Red 23.57 m x 23.57 m en los bloques 0858, 0859, 0958, 0959, 0759, 0860, 0857 y 0957, Archivo técnico : UEB Mina de la ECG. 41p.
- Kittel, C.1996. Introducción al estado sólido, 7th ed. New York: Wiley, 27-50p.
- Lavaut C. W. 2007. Situación Actual del Sistema de Prospección Geológica de Lateritas en Cuba. CD, Memorias de la II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. MIN2-027: ISBN: 978-959-7117-16-2. La Habana. Disponible en: <<http://www.redciencia.cu/geobiblio/geobiblio.html#L>>, [Consultado: Mayo 5, 2014].

- Lavaut C. W. A. 2018. "Geological Classification for the Rocks of Weathering". Petroleum Science and Engineering, Vol. 2 (No. 1): 1-6, DOI: 10.11648/j.pse.20180201.11. Disponible en: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/j/pse>>, [Febrero 20,2024]
- Legrá García I. & Cala Cardero Y. 2019. *Evaluación mineralógica de las colas negras de Nicaro. Trabajo Temático Productivo 1711* (IGP). Proyecto 600202, Moa, Cuba: Biblioteca CEDINIQ e IGP.
- Martínez P. J. A. 2000. Determinación de tamaños de partícula mediante la dispersión angular de la luz. Tesis de Maestría, La Habana, Cuba: Universidad de La Habana.
- Mishchenko M, Travis L. & Lacis A. 2002. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Cambridge University Press.
- Muñoz G. J. N, Orozco M. G. A, Rojas P. A & Cruz O. I. 2005. Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda. I Congreso de Minería MINERIA'2005, II Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas, MIN2-6. I convención Cubana de Ciencias de la Tierra: La Habana, Cuba [CD-ROM], ISBN: 959-7117-03-7. Disponible en: <<http://www.redciencia.cu/geobiblio/geobiblio.html#L>>
- Muñoz Gómez, J. N., Rodríguez Infante, A., & Barea Pérez, I. 2015. "Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa". Minería y Geología, Vol. 31(2): 21-33. Disponible en: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223539558002>>
- Ortoleva P, Merino E, Moore C & Chadann J. 1987 a. "Geochemical self-organization I: Reaction-transport feedbacks and modeling approach". American Journal of Science, Vol. 287 (December):979-1007. Disponible en: <<https://ajsonline.org/issue/5858>>.
- Ortoleva P, Merino E, Moore C y Chadann J. 1987 b. "Geochemical self-organization II: reactive-infiltration instability". American Journal of Science, Vol. 287, (December):1008-1040. Disponible en: <<https://ajsonline.org/issue/5858>>.
- Peña A. R. E. & Sam P. C. 2013. "Optimización del Muestreo Tecnológico en Yacimientos Lateríticos Cubanos". Ciencias de la Tierra y Espacio. Vol. 14(No.1). Disponible en: <<http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>>
- Peña A. R. E. & Vera S. L. O. 2013. "Identificación de clases patrones para la modelación matemática en yacimientos de cubanos níquel". Ciencias de la Tierra y Espacio. Vol. 14 (No. 2), ISSN: 1729-3790. Disponible en: <<http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>>
- Peña A. R. E; Cala C. Y; Capote F. N; Casanova G. A; Toledo S. C. A; Milia G. I. & Lisabet S. E. 2017. "Caracterización mineralógica de tipologías del comportamiento geoquímico de las lateritas del oriente cubano". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio. La Habana, Vol.18(Nº.1, enero-junio):12-23, ISSN: 1729-3790. Disponible en: <<http://www.iga.cu/Publicaciones/revista/index.htm>>
- Peña A. R. E., Aróstegui M.& Ortiz Paradelo M. 2023. "El mineral laterítico, fuente potencial de materia prima para la industria de componentes electrónicos". INFOMIN, Vol. 15 (enero-diciembre) E-ISSN: 1992-4194. Disponible en: <<http://www.infomin.co.cu>>.
- Proenza J.A., Galí S., Labrador M., Melgarejo J.C., Tauler E., Rojas-Purón A., Muñoz G. N., Orozco M. G., Rodríguez V. A., Blanco M. J.A., Pérez M. N., Marrero N.& Lavaut W.2007. Nuevos datos sobre los minerales portadores de Ni y Co en los perfiles lateríticos de Cuba oriental. II Congreso de Minería (MINERIA'2007). III Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, GEOCIENCIAS '2007: La Habana, 20-23 de Marzo. [CD-ROM], MIN2-02. ISBN: 978-959-7117-16-2. Disponible en: <<http://www.redciencia.cu/geobiblio/geobiblio.html#L>>
- Proenza J A, Roque R. J, Labrador M., Galí S, Tauler E, Tamara G, Lewis J F& Longo F. 2010. "Mineralizaciones de Co en los Depósitos Lateríticos de Ni Tipo Óxido y Silicato Hidratado". Macla Nº 13. Septiembre '10. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía:179-180. Disponible en: <https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla13_179.pdf> [Consultado: Julio 26,2024].
- Proenza J, Melgarejo J. C, Gervilla F, Lavaut W & Rodríguez G. 1998. "Cromititas podiformes en la faja ofiolítica Mayarí- Baracoa, Cuba". Acta Geológica Hispánica (33):153-177. Disponible en <<https://revistes.ub.edu/index.php/ActaGeologica/article/view/4632/5952>>, [Consultado: Junio 20, 2024].
- Proenza J, Roque R. J, Labrador M, Galí S & Tauler E. 2011. Caracterización Composicional y Estructural de los Minerales de Mn-Ni-Co en los Perfiles Lateríticos de Níquel Tipo Óxido. IX Congreso Cubano de Geología, GEOLOGIA '2011. Depósitos Metálicos Mineralogía y Petrología. GEO4-O8. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, CD-ROM: La Habana, 4 al 8 de abril, ISBN: 978-959-7117-30-8. Disponible en: <http://www.redciencia.cu/geobiblio/geobiblio.html#L>

- 911metallurgy corp. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/knelson-concentrator>, [Consultado: Mayo 25,2022].
- Hendriwardani M. & Ramdoo I. (s.f). Minerales Críticos: Datos básicos (iisd.org). Intergovernmental Forum on Mining, Mineral, Metals and Sustainable Development. Disponible en: <https://www.iisd.org/system/files/2023-09/critical-minerals-primer-es>, [Consultado: Julio 28, 2024].
- Putzolu F., Santoro L., Porto C., Mondillo N., Machado M., Saar De Almeida B., Bastos A.& Herrington R. 2021. “The Influence of the Magmatic to Postmagmatic Evolution of the Parent Rock on the Co Department in Lateritic Systems: The Example of the Santa Fé-Ni-Co Deposit”, Brazil. Economic Geology, Vol. XXX (Nº XX):21-25, ISSN: 0361-0128, DOI:10.5382/econgeo.4819. Disponible en: <http://www.red-ciencia.cu/geobiblio/geobiblio.html#L>.
- Rojas Purón A & Orozco G. 1994. “Iniciación al estudio de las fases minerales portadoras de Ni en la zona limonítico del yacimiento Moa”, Minería y Geología, Vol. XI (No 2):11-15 Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/issue/archive> [Consultado: Septiembre 20, 2014].
- Sam P. C. M, Gresesqui M. W & Miranda L. J. 2010. Tecnología para Minerales Lateríticos. Etapa 02. Estudio de la clasificación, sedimentación y reología a escala de laboratorio. Proyecto 600134: Biblioteca CEDINIQ, FA1/00573, FA1/00633, 41 p.