

Determinación de los contenidos de cromo en las espinelas cromíferas del yacimiento laterítico Camarioca Norte

Determining chromium content of chromiferous spinel in Camarioca Norte lateritic deposit

Jorge Luis Urra-Abraira^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-2942-5569>

José Nicolás Muñoz-Gómez² <https://orcid.org/0000-0001-6378-5405>

Alain Carballo-Peña² <https://orcid.org/0000-0002-6841-8986>

¹Empresa Moa Nickel S.A. Moa, Cuba.

²Universidad de Moa, Cuba.

*Autor para la correspondencia: jurra@moanickel.com.cu

RESUMEN

Se determinaron los contenidos de cromo en las espinelas cromíferas del yacimiento laterítico Camarioca Norte. Se utilizó la espectroscopía de emisión atómica con fusión inductiva, modelo Spectro ARCOS con modo de observación radial y la fluorescencia de rayos X. La evaluación realizada de la base de datos de exploración en el yacimiento Camarioca Norte permitió revelar que las espinelas cromíferas presentan una distribución uniforme en todos los horizontes de la corteza laterítica. Los mayores valores de cromo (1,85 % en peso) se localizan en los horizontes 1, 2 y 4 del perfil laterítico. Entre los elementos pesados reportados, el cromo presenta los mayores valores en porcentaje en peso, en relación con el níquel y el cobalto en la corteza laterítica. El análisis granulométrico de la mineralización cromífera indicó que el 95,0% del volumen de las muestras se corresponde con la fracción menor que 0,84 mm en la que se determinó

un contenido de cromo de 3,49 %, dos veces superior al valor promedio de la fracción menor de 0,84 mm en la mena laterítica que ingresa al proceso metalúrgico de lixiviación ácida a presión. Se aprecia que los contenidos de cromo son significativos en la corteza laterítica del yacimiento Camarioca Norte.

Palabras clave: mineralización de espinelas cromíferas, mena laterítica, minería de datos

ABSTRACT

The chromium contents of chromiferous spinels from Camarioca Norte lateritic deposit were determined. For this purpose the inductive fusion atomic emission spectroscopy (ICP-AES) and Spectro ARCOS model with radial observation mode and X-ray fluorescence were used as well as (XRF, AxiosmAX Minerals Minerals). Assessment of the exploring database at Camarioca Norte deposit shows that chromiferous spinels have a uniform distribution in all lateritic crust horizons. The highest chromium values (1,85 % by weight) are found in horizons 1, 2 and 4 of the lateritic profile. Among the heavy elements reported, chromium has the highest values in percent by weight, relative to nickel and cobalt in the lateritic crust. Granulometric analysis of chromiferous mineralization indicates that 95,0 % of the sample volume corresponds to the fraction less than 0,84 mm in which a chromium content of 3,49 % was determined, twice the average value of the fraction less than 0,84 mm in lateritic ore entering the metallurgical process of acid pressure leaching. In addition, it is appreciated that the chromium contents are significant in the lateritic crust of the Camarioca Norte deposit.

Keywords: chromiferous spinel mineralization, lateritic ore, data mining

Recibido: 15/05/2024

Aceptado:01/06/2024

INTRODUCCION

Las espinelas cromíferas se localizan en depósitos minerales y minerales accesorios de las peridotitas piroxénicas serpentinizadas; cuando las peridotitas se alteran mediante el proceso de laterización, los minerales portadores de cromo se concentran en los horizontes de la corteza de meteorización laterítica (Leblanc & Nicolas, 1992; Muñoz, 1997).

Las espinelas cromíferas son óxidos múltiples que responden a la estructura: $[X+2]_8 [Y+3]_{16} O_{-2}^{32}$, presentando dos posiciones $[X - Y]$ en las que se ubican átomos no equivalentes, con la excepción del Fe^{2+} y Fe^{3+} que comparten ambas posiciones, respectivamente. La distribución del oxígeno en la celda unidad forma un empaquetamiento cúbico compacto; en la celda cristalográfica unidad (8.34 A_0), los cationes bivalentes se sitúan en $[X^{2+}]$: Mg^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} entre otros; los cationes trivalentes se ubican en la posición $[Y^{3+}]$: Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Ti^{3+} , V^{3+} entre otros menos comunes. Se ha podido comprobar que los cationes bivalentes forman soluciones sólidas completas y los cationes trivalentes forman soluciones sólidas incompletas. A esas características químicas se les atribuye la amplia variedad de propiedades físicas de las espinelas cromíferas (Hurburt, 1984).

Los minerales de espinelas cromíferas forman parte de las menas lateríticas y constituyen un grupo de minerales portadores del metal cromo que están asociados a los complejos estratiformes, *Alaskan type* y podiformes. Estos últimos se localizan en las zonas de transición entre los complejos máficos y ultramáficos de la antigua corteza oceánica de la asociación ofiolítica en Cuba y en otras regiones del planeta (Leblanc & Nicolas, 1992; Muñoz, 1997).

En el yacimiento Camarioca Norte ubicado en el municipio de Moa, Cuba, se han efectuado investigaciones geológicas que han permitido ahondar en el conocimiento de las cortezas lateríticas (De Jesús & Escartín, 2017; Govin *et al.*, 2022) donde se han identificado concentraciones de espinelas cromíferas en las menas lateríticas de hierro, níquel y cobalto (Sitnikov, 1976; Muñoz, Rodríguez & Barea, 2015).

La base de datos utilizada en el presente estudio cuenta con 44 390 análisis químicos de cromo de la corteza laterítica, distribuidos en 5 931 pozos de exploración con distancia entre pozos según una red de 33 m x 33 m (Lavaut, 2004).

La empresa Moa Nickel S.A. tiene como misión producir sulfuros mixtos de níquel y cobalto, a partir de la explotación de menas lateríticas, tipo óxido, con contenido industriales de hierro, níquel y cobalto para su posterior refinación en la planta de COREFCO, Alberta, Canadá. En el proceso metalúrgico de lixiviación ácida a presión, los minerales de las espinelas cromíferas se concentran en los residuos sólidos finales del proceso metalúrgico que son enviados a la presa de colas.

Entre las estrategias de procesamiento se ha evaluado la posibilidad de concentrar y extraer las espinelas cromíferas con antelación al suministro de las menas lateríticas a los procesos metalúrgicos de lixiviación ácida a presión, con el fin de obtener un subproducto de valor comercial.

Uno de los yacimientos que explota actualmente la empresa Moa Nickel S.A. es Camarioca Norte, donde se han identificado concentraciones de minerales cromíferos que superan el 1,0 % en peso del contenido en las menas lateríticas; los minerales de espinelas cromíferas entran en la composición química de las menas lateríticas, localizándose diseminados dentro de la corteza de meteorización.

La explotación actual de las menas lateríticas presta mayor interés a los contenidos de níquel y de cobalto, quedando pendiente profundizar el estudio de otros elementos reportados en estas cortezas de meteorización laterítica, como los minerales de espinelas cromíferas, en

específico en el yacimiento Camarioca Norte, por lo que se propone en este estudio determinar los contenidos de cromo de las espinelas cromíferas en el yacimiento laterítico anteriormente referido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los contenidos de cromo en el yacimiento Camarioca Norte se determinaron en muestras tomadas en el área 14 (A-14), que constituye un área tipo del yacimiento (Figura 1).

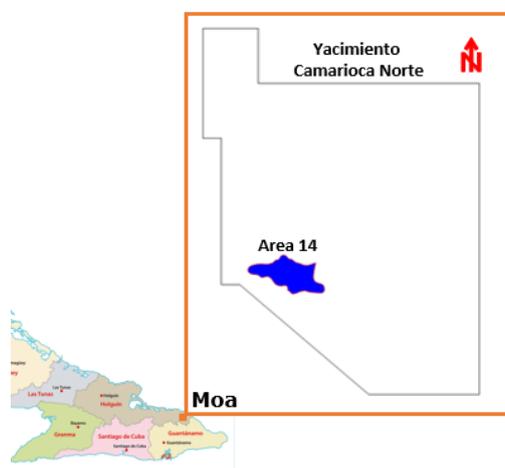


Figura 2. Mapa de ubicación del yacimiento Camarioca Norte.

Para determinar los contenidos de cromo de las espinelas cromíferas se utilizó la espectroscopia de emisión atómica con fusión inductiva (ICP-AES), modelo Spectro ARCOS con modo de observación radial. Con base en los resultados de los análisis químicos se seleccionaron las áreas con mayores concentraciones de espinelas cromíferas; para la toma de muestras se empleó el muestreo de surco.

A partir de los datos obtenidos se caracterizaron los principales elementos químicos por tipo de horizonte según la clasificación que usa la compañía Moa Nickel S.A., la cual considera los contenidos de hierro y níquel (Figura 2).

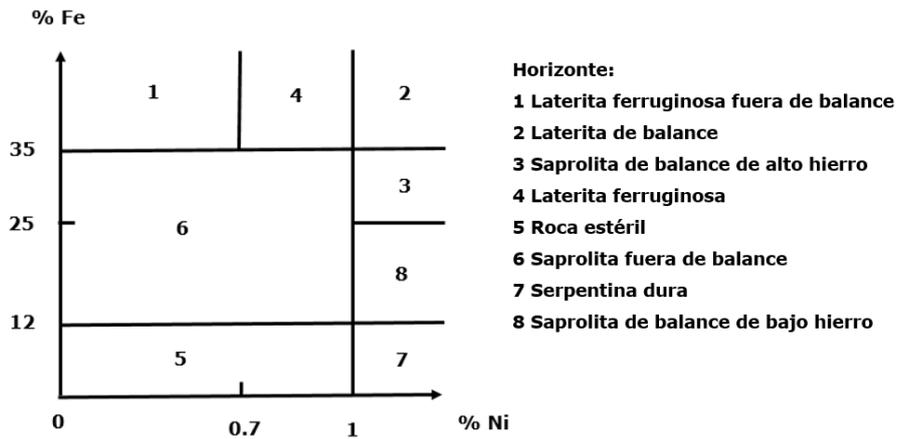


Figura 2. Clasificación de los horizontes del perfil laterítico, tipo óxido, aplicados en la compañía Moa Nickel S.A.

En las muestras del horizonte laterita de balance (2, en el gráfico Figura 2) se determinaron los contenidos de cromo, níquel, cobalto, hierro, magnesio, aluminio, sílice y manganeso. Los valores de los contenidos de los elementos químicos fueron determinados por el método de fluorescencia de rayos X (XRF, *AxiosmAX Minerals Minerals*) en el laboratorio de Moa Nickel S.A.

El análisis granulométrico se orientó para determinar la composición química de los elementos principales en la fracción granulométrica menor que 0,84 mm hasta la mayor que 0,15 mm. El procesamiento granulométrico se realizó utilizando el agitador marca IKA, empleando un rango de velocidad del impelente entre 500 rpm y 700 rpm.

Las muestras de menas lateríticas fueron mezcladas con agua a partes iguales. La pulpa obtenida por agitación mecánica de cada muestra se clasificó granulométricamente atendiendo a la fracción menor que 0,84 mm. Las menas lateríticas tamizadas de la malla de 0,84 mm se clasificaron para la fracción menor que 0,150 mm.

A partir de los datos obtenidos en investigaciones geológicas precedentes, se procedió a realizar el análisis estadístico mediante la minería de datos.

RESULTADOS

La aplicación de los programas de minería de datos permitió identificar altas concentraciones de espinelas cromíferas en las menas lateríticas de níquel y cobalto del yacimiento Camarioca Norte. Los resultados químicos registrados en los pozos de exploración indican que el cromo se concentra en los horizontes superiores de la corteza de meteorización. Los mayores valores de cromo se identificaron en los horizontes 1, 2 y 4. En el horizonte 3 las concentraciones llegan a alcanzar hasta 1,50 % en peso (Figura 2).

Composición química por tipo de horizonte

El horizonte 2, laterita de balance (Figura 2) regulado por: % Fe \geq 35 y % Ni \geq 1, valores que exige el proceso tecnológico de lixiviación ácida a presión, reporta el valor más alto de cromo (2,05 % en peso), lo que equivale a 20,5 kg de cromo por tonelada métrica de la mena laterítica, como promedio, seguido del horizonte 4 con 1,99 % en peso de cromo (Figura 3).

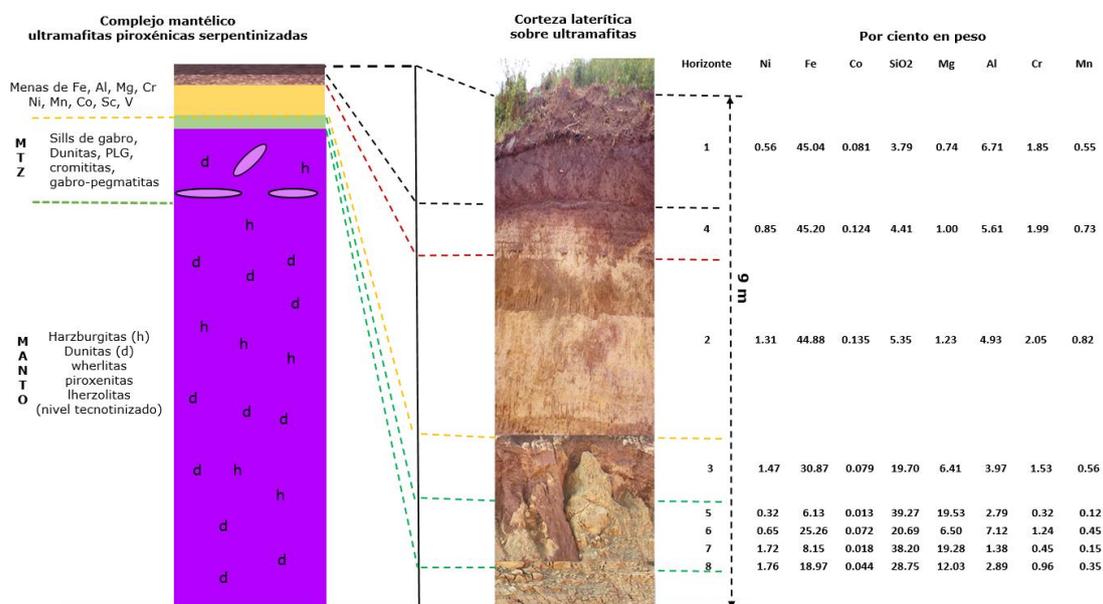


Figura 3. Perfil de la corteza laterítica, tipo óxido, del yacimiento Camarioca Norte, desarrollada sobre el complejo mantélico: ultramafitas piroxénicas serpentinizadas.

La composición química por elementos se visualiza con mayor precisión, en orden ascendente, para los ocho horizontes del perfil laterítico del yacimiento Camarioca Norte (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química por elementos del perfil laterítico, tipo óxido, del yacimiento Camarioca Norte

Contenidos en por ciento en peso								
Horizonte	Ni	Fe	Co	SiO₂	Mg	Al	Cr	Mn
1	0,56	45,04	0,081	3,79	0,74	6,71	1,85	0,55
2	1,31	44,88	0,135	5,35	1,23	4,93	2,05	0,82
3	1,47	30,87	0,079	19,70	6,41	3,97	1,53	0,56
4	0,85	45,20	0,124	4,41	1,00	5,61	1,99	0,73
5	0,32	6,13	0,013	39,27	19,53	2,79	0,32	0,12
6	0,65	25,26	0,072	20,69	6,50	7,12	1,24	0,45
7	1,72	8,15	0,018	38,20	19,28	1,38	0,45	0,15
8	1,76	18,97	0,044	28,75	12,03	2,89	0,96	0,35

Los resultados de análisis químicos de las menas lateríticas en las perforaciones de la red de exploración del yacimiento Camarioca Norte revelan que los contenidos de cromo se concentran en los horizontes superiores de la corteza de meteorización. Los mayores contenidos se localizan en los horizontes 1, 2 y 4; en el horizonte 3, hasta 1,50 % en peso. En los horizontes 5, 7 y 8 (Figura 2) los contenidos de hierro están por debajo de 20,0 % en peso, reportan los valores más bajos de cromo: 0,32 % en peso, 0,45 % en peso y 0,96 % en peso, respectivamente (Figura 4).

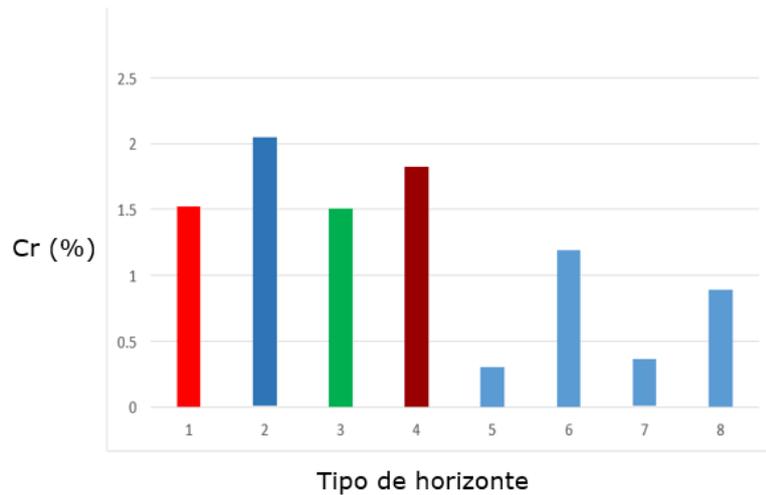


Figura 4. Distribución de los contenidos de cromo, del presente estudio, por tipo de horizonte del perfil laterítico del yacimiento Camarioca Norte.

Los resultados de análisis químicos del área A-14 mostraron que los contenidos de cromo se distribuyen de manera similar al resto del yacimiento, no obstante, en el horizonte 7 no se reportaron contenidos de cromo; los valores relativos en este horizonte son inferiores al resto del área (Figura 5).

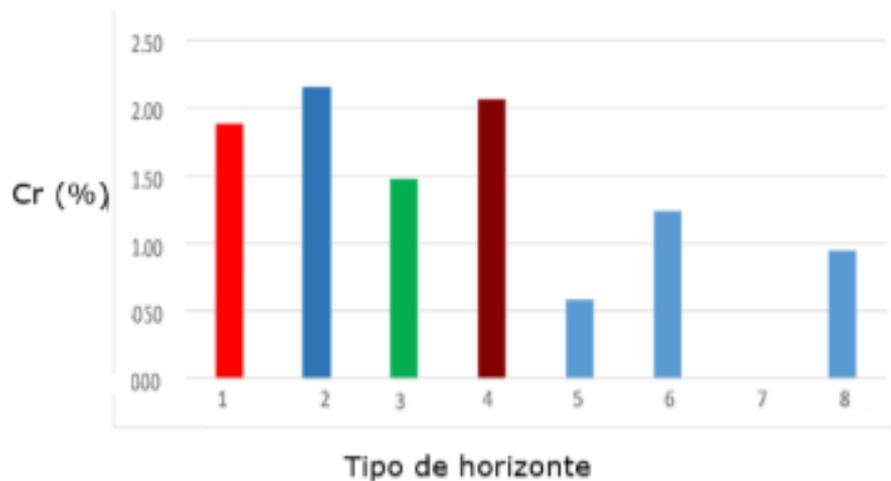


Figura 5. Distribución de los contenidos de cromo en la corteza laterítica por horizonte, según el presente estudio, en el área A-14 del yacimiento Camarioca Norte.

Fundamentado en la clasificación propuesta por Lavaut se determinó que la corteza del yacimiento Camarioca Norte (Figura 6) clasifica como

laterítica (95 % del volumen total) y en menor medida sialítica (4,6 %). En las zonas investigadas la distribución de la corteza bauxítica es escasa (0,4 %) y se relaciona con los valores más bajos (0,03 como promedio) del # Cr (Lavaut, 2018). El predominio del tipo de corteza laterítica y sialítica indica la presencia de cuarzo, gibbsita, hematita, goethita y espinelas cromíferas.

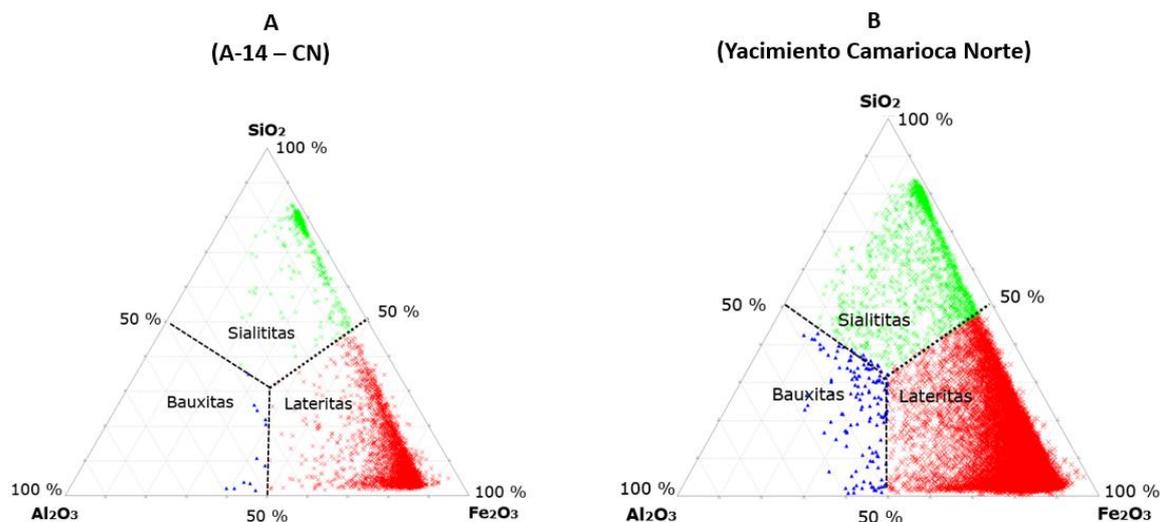


Figura 6. Tipos de cortezas del yacimiento Camarioca Norte, según la clasificación propuesta por Lavaut (2023).

Granulometría de las espinelas cromíferas por fracción en la laterita de balance del área A-14, yacimiento Camarioca Norte

El resultado del análisis granulométrico de las muestras de menas de lateríticas de balance (LB-1, LB-2 y LB-3) se expone en la **iError! No se encuentra el origen de la referencia..** La fracción granulométrica menor que 0,84 mm hace como promedio el 95,04 % del volumen total procesado.

Las muestras de menas lateríticas están compuestas por partículas de tamaño inferior al milímetro (menor que 0,84 mm) siendo característico de las menas lateríticas de balance. El contenido más alto

de fracción menor que 0,84 mm se obtuvo en las muestras LB-1 y LB-3.

Tabla 2. Resultados del análisis granulométrico para las muestras de laterita de balance del A-14 del yacimiento Camarioca Norte

Fracción granulométrica	UM	LB-1	LB-2	LB-3	Promedio
Mayor que 0,84 mm	%	2,56	7,53	4,80	4,96
Menor que 0,84 mm	%	97,44	92,47	95,20	95,04

El valor promedio de cromo en la fracción menor que 0.84 mm fue de 1,61 % en peso. El valor más elevado se obtuvo en la muestra LB-3 con 1,73 %, donde se observó una alta correlación con los valores más elevados de Ni, Mg y SiO₂ con 1,89 %, 3,03 % y 8,59 % respectivamente (Tabla 3).

Tabla 2. Composición química por elementos del perfil laterítico, tipo óxido, en la fracción menor que 0,84 mm en laterita de balance

Por ciento en peso (%)						
Muestra	Cr	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
LB-1	1,46	1,64	0,146	48,60	0,48	3,57
LB-2	1,65	1,82	0,100	41,70	2,49	7,85
LB-3	1,73	1,89	0,098	39,40	3,03	8,59
Promedio	1,61	1,78	0,115	43,23	2,00	6,67

La muestra LB-1 reportó el valor más bajo de contenido de cromo (1,46%), y los valores más bajos de Mg (0,48 %) y SiO₂ (3,57 %). Adicionalmente, a la fracción menor que 0,84 mm se le determinó la granulometría del tamaño de partícula comprendido entre 0,84 mm y 0,150 mm, denominada *arena* en el proceso de lixiviación ácida a presión (Tabla 4). El resultado promedio de la fracción granulométrica menor que 0,84 mm fue de 17,50 %. La mayor concentración se obtuvo en la muestra LB-1, en la fracción de la mena laterítica retenida.

Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico de la fracción *arena* del proceso de lixiviación ácida a presión

Fracción granulométrica	UM	LB-1	LB-2	LB-3	Promedio
0,150 mm-0,84 mm (<i>arena</i>)	%	24,36	15,09	13,03	17,50

En la fracción granulométrica *arena* se incrementa el contenido de cromo (Tabla 5). Los resultados de la fluorescencia de rayos X en esta fracción indicaron un contenido de cromo de 3,49 %, dos veces superior al valor promedio de la fracción menor que 0,84 mm en la mena laterítica que ingresa al proceso metalúrgico de lixiviación ácida a presión.

Tabla 5. Resultados de los análisis químicos de la fracción *arena*

Muestra	Porcentaje en peso					
	Cr	Ni	Co	Fe	Mg	SiO₂
LB-1	3,36	1,30	0,198	36,70	2,33	5,26
LB-2	3,52	1,38	0,125	23,80	7,35	11,88
LB-3	3,59	1,60	0,112	18,90	10,59	15,74
Promedio	3,49	1,43	0,145	26,47	6,76	10,96

Los mayores valores de contenido de cromo se alcanzaron en la muestra LB-3 (3,59 %) en correlación directa con los mayores valores de Ni, Mg y SiO₂ reportados para esta fracción. El valor más bajo de cromo (3,36 %) se obtuvo en la muestra LB-1, coincidiendo igualmente con los más bajos de Ni (1,30 %), Mg (2,37 %) y SiO₂ (5,26 %).

Distribución de los contenidos de cromo en el perfil laterítico de Camarioca Norte

En los pozos de exploración se comprobaron espesores de corteza laterítica de níquel y cobalto de 8,0 m como promedio; el 95,0 % se encuentra entre 2 m y 18 m. El contenido de cromo promedio en el perfil laterítico fue de 1,42 %.

Los contenidos de cromo inferiores a 1,0 % en los primeros 10 m del perfil laterítico se relacionan con muestras ubicadas próximas al

basamento, constituidas por peridotitas piroxénicas serpentinizadas, con bajos contenidos de hierro (Figura 7).

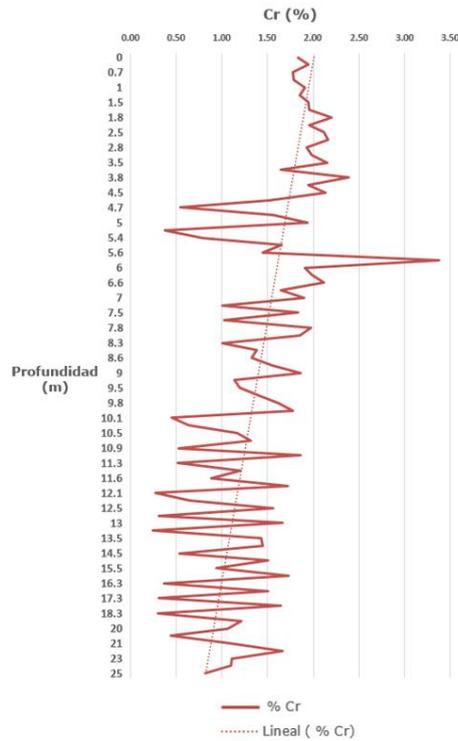


Figura 7. Distribución del contenido de cromo en la corteza laterítica, del presente estudio, en A-14 del yacimiento Camarioca Norte.

Para calcular el número de cromo ($\#Cr$) y el número de magnesio ($\#Mg$) se aplicaron las fórmulas de Meade (2010). Los valores bajos del $\#Cr$ en la corteza laterítica están relacionados con intercalaciones de menas saprolíticas, las que presentan contenidos de hierro inferior a 8,0 % en peso. La distribución del $\#Cr$ y $\#Mg$ promedio del perfil laterítico en profundidad se muestra en la Figura 8, en el área 14 de Camarioca Norte (A), a partir de los valores promedios reportados en los pozos de exploración.

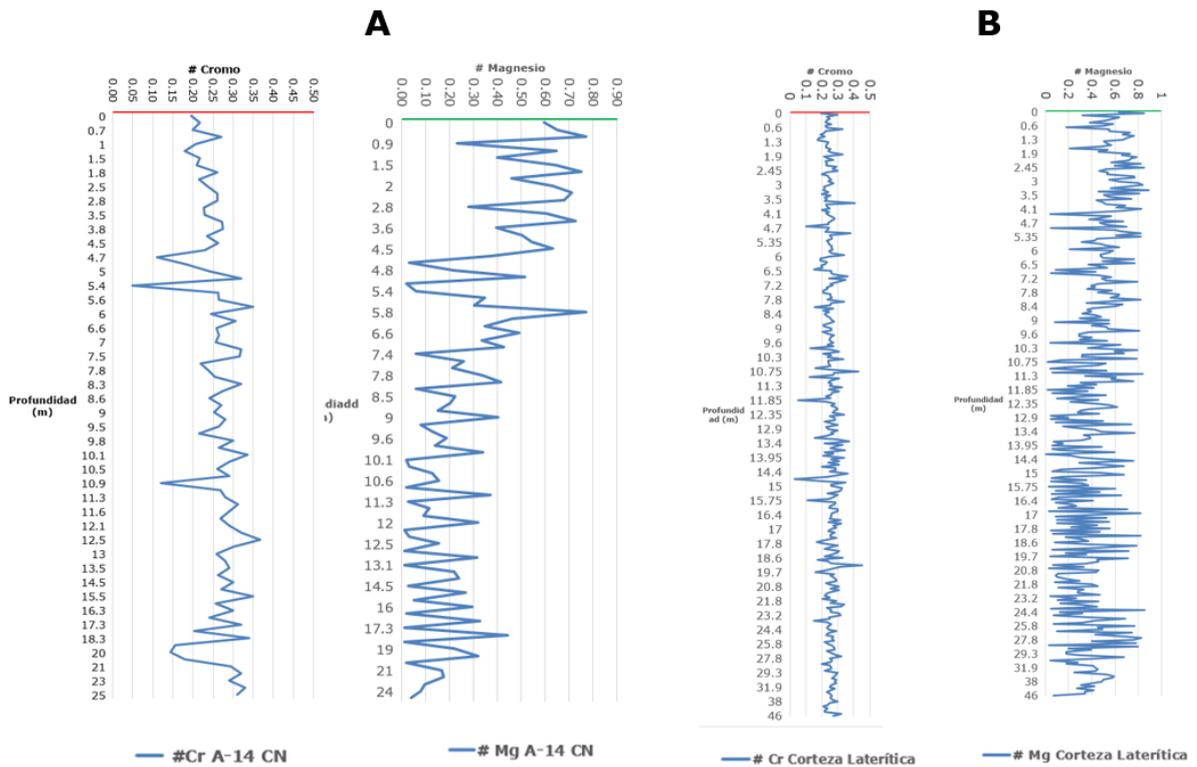


Figura 8. Distribución del número de cromo (# Cr) y número de magnesio (#Mg) (A) área-14 del yacimiento Camarioca Norte y (B) corteza laterítica de níquel y cobalto de Moa.

En relación al #Cr global del perfil de la corteza laterítica de níquel y cobalto de Moa (B) se observa la misma tendencia en profundidad con una baja variabilidad. En relación al # Mg de la corteza existe una tendencia a disminuir en las profundidades superiores a los 10 m.

En la corteza, los valores de #Cr y el #Mg, no notifican cambios relevantes. El #Mg manifiesta valores bajos en las profundidades de: 11,05 m, 14,80 m y 15,75 m, lo que se interpreta con peridotitas poco alteradas o intercalaciones de rocas gabroides en el perfil laterítico. La distribución del cromo en el perfil laterítico de níquel y cobalto del A-14 de Camarioca Norte presenta baja variabilidad.

CONCLUSIONES

- La mineralización cromífera del yacimiento Camarioca Norte se concentra en los horizontes superiores de la corteza laterítica; los mayores valores de cromo se ubican en los horizontes 1, 2 y 4, donde alcanzan valores superiores a 1,80 % en peso.
- Se demuestra, en el análisis granulométrico, que la fracción granulométrica mayor de 0,15 mm y menor de 0,84 mm presenta un contenido de cromo de 3,49 % en peso, equivalente a 2,2 veces el valor promedio en toda la fracción menor que 0,84 mm.
- Los valores reportados de contenidos de cromo en la corteza laterítica del yacimiento Camarioca Norte apunta a evaluar la posibilidad de concentrar y extraer las espinelas cromíferas con antelación al suministro de las menas lateríticas a los procesos metalúrgicos de lixiviación ácida a presión; ello permitiría disminuir su participación en este proceso y obtener un subproducto de valor comercial.

REFERENCIAS

- De Jesús, R. & Escartín, E. R. (2017). Caracterización geoeléctrica de cortezas lateríticas a partir de sondeos eléctricos verticales de polarización inducida (SEV-PI). *Minería & Geología*, 33(4), 415-428. Consultado: 21/12/2023. Disponible en: https://www.revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art4_No4_2017
- Govin, A., Leal, G., Sánchez, M. I., Ramírez, M. C. & Pons, J. A. (2022). Solubilización de níquel y cobalto presente en un escombro laterítico mediante el empleo de *Acidithiobacillus Thiooxidans*. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 53(2), 197-206. Consultado: 21/12/2023. Disponible en: <https://www.revista.cnic.cu/index.php/RevBiol/article/view/1430>
- Hurburt, J. K. (1984). *Manual de mineralogía de Dana*. Reverté S.A.

- Lavaut, W. (10-14 abril de 2023). *Sistema Jerárquico de Clasificación de las Rocas de la Meteorización. GEO01-010*. (Ponencia).
Congreso de Geología-Geología Regional Geociencias' 2023, Cuba.
- Lavaut, W. (2004). *Reporte de actualización del modelo geológico de los yacimientos Camarioca Norte y Sur*. Empresa Geólogo Minera de Santiago de Cuba.
- Lavaut, W. (2018). A Geological Classification for the Rocks of Weathering. *Petroleum Science and Engineering*, 2(1), 1-6,
<http://doi:10.11648/j.pse.20180201.11>
- Leblanc, M. & Nicolas, A. (1992). Les chromites ophiolitiques.
Chronique de la Recherche Minière, 507, 3-26.
- Meade, F. (2010). Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide.
The Geographical Journal, 176, 375-376. Consultado: 21/12/2023.
Disponible en:
<https://www.proquest.com/openview/21c83775f6fe781a9c545893213a0cd1/1?pq-origsite=gscholar&cbl=42292>
- Muñoz J. N. (1997). Geoquímica y mineralogía de la mineralización cromífera asociada al complejo ofiolítico de Moa-Baracoa, Cuba. (Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico). Consultado: 21/12/2023. Disponible en:
<http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1145>
- Muñoz, N., Rodríguez, A. & Barea, I. (2015). Variabilidad de los perfiles lateríticos en los yacimientos ferroniquelíferos de Moa.
Minería & Geología, 31(2), 21-33. Consultado: 21/12/2023.
Disponible en:
<https://www.revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/1057>
- Sitnikov, V. (1976). *Informe sobre la exploración orientativa del yacimiento Camarioca con el cálculo de reservas*. Oficina Nacional de Recursos Minerales. La Habana.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Los tres autores contribuyeron por igual.