

# Goethita, maghemita y hematites como menas de Ni y Co en lateritas de tipo óxido: lecciones aprendidas del estudio del distrito de Moa, Cuba

Joaquín A. Proenza (1\*), Salvador Galí (1), Arturo Rojas-Purón (2), Cristina Villanova-de-Benavent (1), Diego Domínguez-Carretero (1), Nathalia Duque-Garcés (1), Cristina Domènech (1)

(1) Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. Universitat de Barcelona (UB), Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona (España)

(2) Departamento de Geología. Universidad de Moa, Las Coloradas, s/n, Moa, Holguín (Cuba)

\* corresponding author: [japroenza@ub.edu](mailto:japroenza@ub.edu)

**Palabras Clave:** Goethita, Maghemita, Laterita Ni-Co, Moa. **Key Words:** Goethite, Maghemite, Ni-Co laterite, Moa.

## INTRODUCCIÓN

El Ni y el Co son metales estratégicos en la construcción de sociedades sostenibles, sus propiedades físicas y químicas los hacen imprescindibles en la denominada transición energética que permitiría alcanzar los ambiciosos objetivos de descarbonización de la economía. Los yacimientos lateríticos de Ni-Co contienen alrededor del 70 % de las reservas mundiales de Ni y representan la segunda fuente de obtención de Co a nivel mundial. En consecuencia, los mayores productores de Ni en el 2021 fueron países que albergan grandes yacimientos lateríticos de Ni-Co (Indonesia y Filipinas; <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nickel.pdf>). Los enormes recursos de Ni en cortezas lateríticas desarrolladas sobre rocas ultramáficas ricas en olivino, unidos a su localización muy cerca de la superficie en comparación con los depósitos de sulfuros magmáticos de Ni, conlleva a que los yacimientos lateríticos sean la opción más atractiva para la industria del Ni.

Los depósitos lateríticos de Ni-Co suelen presentar una gran variabilidad vertical y horizontal. Los depósitos caracterizados por un mayor espesor de la zona oxidada, y con la mineralización de Ni localizada predominantemente en la parte inferior del horizonte limonítico (limonita inferior o amarilla), y en la más alta del horizonte saprolítico (saprolita ferruginosa), se denominan de “tipo óxido”. Excelentes ejemplos de este tipo de depósito se localizan en la parte de NE de Cuba (distrito de Moa o “Moa Bay”) (Proenza et al., 2003, 2007; Aiglsperger et al., 2016). Estos depósitos se desarrollan a partir de la meteorización de peridotitas mantélicas serpentinizadas y rocas ultramáficas y máficas serpentinizadas de la zona de transición manto-corteza (harzburgitas, dunitas, peridotitas impregnadas con plagioclasa y clinopiroxenos, sills/diques de gabro) de las ofiolitas de Moa-Baracoa. Esta variedad litológica del protolito tiene importantes implicaciones en la geoquímica y mineralogía de los perfiles lateríticos de Moa (Proenza et al., 2003).

En esta contribución se presentan los resultados de un estudio mineralógico detallado (mediante DRX,  $\mu$ DRX,  $\mu$ Raman, FE-SEM y EMPA) de los oxihidróxidos de Fe como fases portadoras de Ni-Co en los perfiles lateríticos de tipo óxido del distrito de Moa (yacimientos Punta Gorda, Yagrumaje Norte y Yamanigüey). Además, se valoran las implicaciones de la mineralogía de la mena en los procesos metalúrgicos (lixiviación ácida a presión -HPAL- con ácido sulfúrico y tecnología Caron) utilizados para la extracción de Ni y Co.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La goethita es la fase mayoritaria en los horizontes limoníticos de los depósitos estudiados, y en el horizonte saprolítico superior coexiste con lizardita (politipo dominante 1T) y maghemita. En la parte inferior del horizonte limonítico, la goethita puede constituir >90 % en peso de las fases identificadas mediante DRX y cuantificadas sobre la base del método de Rietveld. Hay varias generaciones de goethita, una de ellas muy rica en Al (hasta un 8 % en peso). Sistemáticamente la goethita de la parte más alta del horizonte saprolítico y limonítico inferior suele ser rica en Ni y Co, contiene hasta 4,3 % en peso de NiO y hasta 1,7 % en peso de Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sin embargo, hacia la parte alta de la zona limonítica los contenidos de Ni en la goethita llegan a ser inferiores a 0,25 % en peso. Los agregados de

goethita analizados mediante EMPA también presentan contenidos variables de Si (hasta 6 % en peso), Cr (hasta 2 % en peso) y Mn (hasta 1,2 % en peso). La goethita se forma predominantemente a partir de olivino y serpentina, y hacia la parte alta del perfil es reemplazada por hematites. El reemplazamiento provoca una pérdida de Ni, ya que la hematites neoformada no puede acomodar en su estructura todo el Ni contenido en la goethita. Una parte del Ni en la goethita se encuentra en solución sólida y otra como Ni adsorbido en la superficie. La sustitución de Ni<sup>2+</sup> por Fe<sup>3+</sup> en la estructura de la goethita queda balanceada por la sustitución de OH<sup>-</sup> por O<sup>2-</sup>. La superficie específica de la goethita en los depósitos de Moa varía entre 30 y 64 m<sup>2</sup>/g, confirmando su capacidad de adsorción de Ni y Co.

La maghemita está presente predominantemente en la parte superior del horizonte saprolítico, así como en la parte inferior y media del horizonte limonítico (generalmente a profundidades > 10 m; hasta 15 % en peso de las fases cuantificada mediante Rietveld). Sistemáticamente, el tamaño de grano de la maghemita es mayor que el de la goethita. La maghemita puede ser rica en Ni (1,8-8,1 % en peso de NiO en el yacimiento Yagrumaje Norte) y en Co (0,16-1,1 % en peso de Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), los contenidos de NiO presentan una correlación negativa con el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, y el enriquecimiento en Co no está asociado con el reemplazamiento de oxihidróxidos de Mn ricos en Co. La maghemita analizada en los depósitos de Moa, incluyendo sus residuos sólidos o colas (Rojas & Turro, 2003), también presenta cantidades menores de Si, Cr y Mn. Sin embargo, a diferencia de la goethita, la maghemita está empobrecida en Al (generalmente por debajo del límite de detección de la microsonda).

La hematites predomina hacia la parte media y alta del perfil de meteorización, constituyendo hasta un 35 % en peso de las fases cuantificadas mediante Rietveld. Consistentemente, la hematites presenta menores contenidos de Ni y Co que la goethita y la maghemita. El Cr, Mn y el Al también reemplazan al Fe en la estructura de la hematites. Además, en la zona limonítica se han identificado, en cantidades menores que los oxihidróxidos de Fe, lizardita, asbolana, litioforita, compuestos intermedios entre litioforita y asbolana, Cr-espinela rica en Al, Cr-espinela rica en Fe<sup>3+</sup>, gibbsita, cuarzo, zircón, ilmenita, Au, Ag y sulfuros de Cu.

Los resultados de la caracterización mineralógica de los depósitos de tipo óxido de Moa ponen de manifiesto que la maghemita es una fase portadora significativa de Ni y Co, que puede llegar a representar >10 % de la mena en la zona inferior del horizonte limonítico. Debido a su naturaleza relativamente refractaria, su presencia en la composición de la mena que entra al proceso hidrometalúrgico (eficaz para la extracción del Ni de la goethita) puede generar problemas de recuperación. Problemas similares pueden derivarse de la presencia de hematites como fase portadora de Ni-Co, sobre todo si se pretende procesar las menas pobres en Ni (“fuera de balance”) de la parte superior de los perfiles donde es una fase mayoritaria. Por otra parte, en el caso de la tecnología HPLA, contenidos altos de Al en la mena pueden dar lugar a la formación de alunita en el autoclave durante la lixiviación ácida (Elias, 2002). Las principales fases responsables de contenidos altos de Al en la mena limonítica son la goethita rica en Al, gibbsita, litioforita y compuestos intermedios litioforita-asbolana, y en menor medida Cr-espinela rica en Al. Finalmente, es muy importante la presencia de zonas enriquecidas en oxihidróxidos de Mn-Ni-Co en los niveles inferiores y superiores del horizonte limonítico. El proceso HPLA además de disolver Ni y Co puede también lixiviar Mn y por tanto reducir la eficiencia del proceso de tratamiento de las menas ricas en Mn-Ni-Co.

## REFERENCIAS

- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., Ďurišová, J. (2016): Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geol. Rev.*, **73**, 127-147. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.010.
- Elias, M. (2002): Nickel laterite deposits – Geological overview, resources and exploration. En cooke, D., Pontgratz, J., eds. *Giant ore deposits. Characteristics, genesis and exploration: CODES Special Publication 4*, Hobart, University of Tasmania, 205-220.
- Proenza, J.A., Melgarejo, J.C., Gervilla, F. (2003): Comments on the paper "Ochreous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba" by Oliveira et al. *J. South. Am. Earth Sci.*, **16**, 199-202. DOI: 10.1016/S0895-9811(03)00024-5.
- , Tauler, E., Melgarejo, J.C., Galí, S., Labrador, M., Marrero, N., Pérez-Melo, N., Rojas-Purón, A.L., Blanco-Moreno, J.A. (2007): Mineralogy of oxide and hydrous silicate Ni-laterite profiles in Moa Bay area, northeast Cuba. In: Andrew et al. (eds.), *Digging Deeper*, Irish Association for Economic Geology, Dublin, Ireland. 2: 1389-1392.
- Rojas-Purón, A. & Turro-Breff, A. (2003): Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Rev. Miner. Geol.*, **3-4**, 21-28.