LA MIGRACION GEOQUIMICA DEL NIQUEL EN LAS CORTEZAS DE INTEMERISMO FERO-NIQUELIFERAS: IMPLICACIONES EN LA EXPLORACION DE EXPLOTACION

José Nicolás Muñoz Gómez[(1)], Arturo Luis Rojas Purón[(1)], Roberto Díaz Martínez[(1)]

(1) – Departamento de Geología – ISMMM

RESUMEN

En los yacimientos de menas lateríticas de Fe – Ni – Co, la existencia de elevadas concentraciones de Ni (0,2% – 3,0%), en los diferentes horizontes de los yacimientos minerales, constituyen el fundamento para establecer los límites de explotación de las menas; en particular la limonita de balance – LB – y la serpentina de balance – SB.
Los valores de los contenidos del níquel en todo el perfil laterítico responden a la migración geoquímica del metal desde los minerales primarios en las ultramafitas serpentinizadas: olivino y piroxenos ortorrómbicos, hasta los minerales hipergénicos: óxidos, hidróxidos, smectitas, minerales del grupo de la serpentina y en menor grado cloritas niquelíferas.
Partiendo de estudios avanzados en la mineralogía y geoquímica de las menas lateríticas en el yacimiento Punta Gorda, mediante la difracción de rayos X, (Difractómetro Panalytical X'Pert PRO MPD, en geometría Bragg-Brentano - Radiación: Kα1+Kα2 del Cu, filtro de Ni, microsonda electrónica de barrido (microsonda electrónica SX-50) y microscopía de luz reflejada, ha permitido el establecimiento y comportamiento del modelo teórico de la migración geoquímica del níquel en el perfil laterítico.
El establecimiento de los esquemas y modelos de la migración geoquímica del níquel en las cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas del yacimiento Punta Gorda, tiene implicaciones técnicas durante las tareas de exploración de explotación, dirigidas a incrementar la eficiencia del proceso de extracción de las menas, entre otras.
Palabras claves: olivino, piroxeno, níquel, rayos X, microsonda electrónica de barrido, migración geoquímica.

ABSTRACT

The most important aspect of laterite ore deposits is the geochemical migration of nickel content and the chemical and mineral composition, there are vary papers referred of this question. The target of present paper is the contribution to the migration of nickel in the laterite profile, - L-48 profile - of laterite ore deposit of Punta Gorda, Moa; and to will get a better economics operation during the exploitation of the Ni-Co ore in the Punta Gorda ore deposit.
The analysis from a scanning electronic microscope (Scanning electronic-SX-50), and difractometer panalytical X'Pert PRO MPD, in geometry Bragg-Brentano (Radiation: Kα1+Kα2 - Cu, filter de Ni). allows identification phases of minerals present in the profile as: geothita, chromite, gibbsite and manganese minerals; cobalt content are associated with the manganese minerals and nickel content are associated mainly of goethite.
The Punta Gorda ore laterite deposits is located in the northeast of Cuba, the Ni-Co ores has a high number of mineral in the ore and its necessary the increment of control during the operation of exploitation of the ore, and others operations.

INTRODUCCIÓN

La migración geoquímica del níquel está condicionada por el carácter geoquímico del metal en diferentes condiciones geotectónicas, a saber, magmáticas, condiciones hidrotermales y las vinculadas con las condiciones exógenas, en las cortezas de intemperismo de las ultramafitas

serpentinizadas, además, la geoquímica del metal está controlada por el comportamiento geoquímico de los metales de la familia del hierro: Fe, Cr, Co, Mn, Ti, V, entre otros.
El níquel, es un metal divalente – Ni^{+2} – con un radio iónico de 0,78ºA, similar en longitud sub-microscópica al magnesio divalente – Mg^{+2} – con radio atómico de 0,78ºA, por tal razón la existencia de ambos elementos químicos se sustituyen mutuamente en las rocas del manto superior, lo que caracteriza su presencia en las condiciones que existen en la parte inferior de la corteza. En las condiciones endógenas el níquel se asocia a los magmas de composición gabroide, en los yacimientos de licuación, de sulfuros de níquel, cobre y metales del grupo del platino.
En el presente trabajo se exponen las consideraciones de los autores sobre la migración del níquel en las condiciones supergénicas, en el ejemplo del yacimiento de Punta Gorda.

MATERIALES Y MÉTODOS

La migración geoquímica del Ni, en las cortezas ferro-niquelíeras, parte de su existencia primaria en las litologías de ultramáficas del complejo ofiolítico aflorado en todo el norte del país y en particular en el nordeste de Cuba oriental. Las investigaciones geológicas desarrolladas desde el inicio del pasado siglo identificaron la existencia de rocas ultramáficas serpentinizadas. (Hayes, C.W., Vaughan, T.W. and Spencer, A.C., 1901); (Burch, A. and Burchard, E.F., 1919); (Thayer, P.T., 1942).

Después del triunfo de la Revolución, se llevaron a cabo trabajos de mayor amplitud y precisión, los que permitieron caracterizar, desde el punto de vista petrológico las litologías básicas y ultramáficas del complejo ofiolítico y sus vínculos con las litologías de los arcos volcánicos del Cretácico y Terciario. (Adamovich, A. y Chejovich, V., 1962), (Kenarev, V., 1962-1963), (Nagy, E., et.al, 1976), (Gyarmati, P. et al., 1990), (Fonseca, E., et al., 1991), (Cobiella, J.L. et. Al. 1984); (Iturralde Vinent, a) 1990; b) 1994), entre otros.

En correspondencia con las investigaciones geológicas realizadas, se concluye que el protolito de las ultramafitas del macizo ofiolítico estaban integradas en lo esencial por ultramafitas piroxénicas, dunitas, harzburgitas, lherzolitas y wherlitas de acuerdo con la clasificación de Streckeisen, A., 1975.

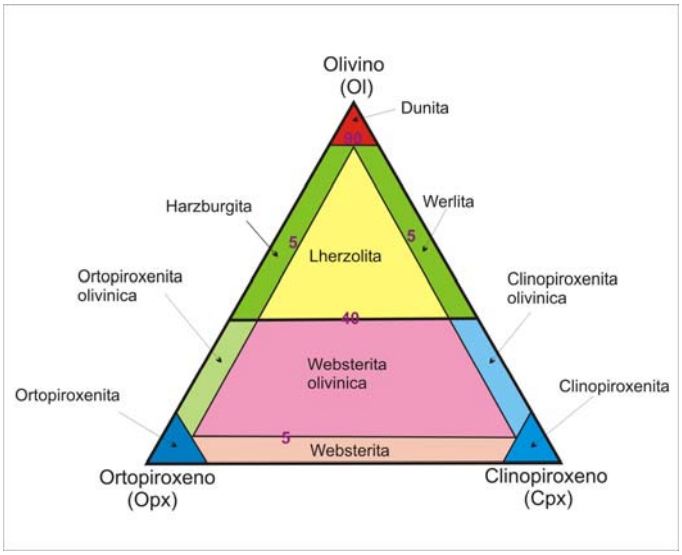

Figura 1 Esquema de las ultramafitas piroxénicas, en función del olivino (ol), ortopiroxeno- (opx), clinopiroxeno (cpx), según Streckeisen, A., 1975

En las litologías ultramaficas anteriormente señaladas la existencia del níquel se localiza en la estructura del olivino, mineral primario que es el componente principal de las ultramafitas piroxénicas, constituyendo casi el 100% de las dunitas y aproximadamente el 90% de la harzburgitas.
El olivino, como se conoce pertenece al grupo de los silicatos ferro-magnesiales – nesosilicatos – y su expresión química de la celda unidad del mineral está dada en la formula:

Olivino – $(Mg, Fe, Ni, Mn, Co)_2SiO_4$

su peso molecular es aproximadamente 153,31 g y cristaliza en el sistema ortorrómbico – dipiramidal (2/m 2/m 2/m); *a= 4,78; b=10,25; c=6,3*y grupo espacial Pbnm, el grupo del olivino está integrado por las fases minerales siguientes:

fayalita – Fe_2SiO_4 – Pbnm – 2/m 2/m 2/m – (fa)
forsterita – Mg_2SiO_4 – Pbnm – 2/m 2/m 2/m – (fo)
liebenbergita – Ni_2SiO_4 – Pbnm – 2/m 2/m 2/m
teflorita – Mn_2SiO_4 – Pbnm - 2/m 2/m 2/m
laihunita – Fe Fe_2SiO_4 – P 2/b 2/m

La composición química responde a los contenidos siguientes:

Mg – 25,37% - (42,06% - MgO)
Fe – 14,57% - (18,75% - FeO)
Si – 18,32% - (39,19% - SiO_2)
O- 41,74%
(Ni + Co + Mn) – 0,02 – 0,100%

Como se puede valorar la forma primaria de existencia del níquel en las ultramafitas es en forma de liebenbergita – Ni_2SiO_4 – se puede afirmar que a partir de este mineral del grupo del olivino comienza la migración del níquel en las cortezas de intemperismo lateríticas, mediante el complejo proceso de lateritización. Es necesario esclarecer que los minerales primarios de las ultramafitas piroxénicas, de acuerdo a la clasificación de Streckensen, A., 1975, han estado sometidas a eventos geológicos que han incido en la composición primaria de las litologías mantélicas y han producido transformaciones en la composición primaria de los minerales componentes en primer lugar el proceso de obducción y en segundo lugar el proceso de serpentinización de las litologías ultramáficas, es por ello que en la gran mayoría de los cortes y perfiles lateríticos las ultramafitas están parcial o completamente serpentinizadas antes de iniciarse el proceso de lateritización. La existencia del olivino y sus transformaciones químicas en las litologías ultramáficas afloradas del macizo ofiolítico - mediante la acción de los agentes de la meteorización – originaron los diferentes horizontes del perfil lateríticos y con ello las complejas menas de Fe- Ni y Co.

Tabla No. 1 Resultados de análisis de microsonda de muestras de olivino en dunitas, harzburgitas y otras ultramafitas (Muñoz Gómez, J.N. 1997)

Muestras	Punto	Mineral	Litología	SiO_2%	FeO%	MgO%	NiO%	MnO%	Total
96-1a	431	Olivino	harzburgita	41,3619	8,5253	50,6060	0,3702	0,5647	101,4281
96-1b	429	Olivino	harzburgita	39,3514	8,9373	51,3242	0,3655	0,8569	100,8354
96-1c	430	Olivino	harzburgita	40,9098	8,6868	51,7280	0,3693	0,2354	101,9293
96-1d	425	Olivino	harzburgita	40,0105	8,7308	51,7578	0,4069	0,1452	101,0512
96-10Ba	466	Olivino	pl-lherzolita	40,7160	9,4940	50,8756	0,4473	0,3658	101,8987
96-10Bb	467	Olivino	pl-lherzolita	40,1054	9,3074	51,0578	0,3919	0,2547	101,1171
96-10Bc	469	Olivino	pl-lherzolita	41,0117	9,4678	51,0855	0,3796	0,7458	102,6904
96-2a	393	Olivino	pl-lherzolita	41,4084	10,5707	49,3786	0,3872	0,2569	102,0018
96-2b	394	Olivino	pl-lherzolita	41,4467	10,6608	49,7078	0,5319	0,1456	102,4928
96-2c	391	Olivino	pl-lherzolita	40,0196	10,4962	49,8069	0,3947	0,9564	101,6738
96-3Aa	413	Olivino	pl-wehrlita	42,0563	11,7333	48,4239	0,3280	0,5879	103,1294

96-3Ab	409	Olivino	pl-wehrlita	40,6040	11,7050	48,6243	0,3204	0,6584	101,9121
96-3Ac	408	Olivino	pl-wehrlita	39,9267	11,8067	48,7276	0,2124	0,6954	101,3688
96-3Ad	411	Olivino	pl-wehrlita	39,2061	11,8622	48,8512	0,2199	0,5247	100,6641
96-3Ae	410	Olivino	pl-wehrlita	40,3991	11,7322	49,1538	0,3439	0,8745	102,5035
96-3Af	407	Olivino	pl-wehrlita	39,9196	11,6389	50,3066	0,3486	0,7451	102,9588
96-7a	440	Olivino	harzburgita	41,0723	8,8346	50,5858	0,3458	0,4158	101,2543
96-7b	451	Olivino	harzburgita	40,3012	8,8432	51,7259	0,3467	0,5680	101,7850
96-7c	441	Olivino	harzburgita	41,5910	8,7790	51,8324	0,4783	0,8451	103,5258
96-8a	459	Olivino	dunita	40,5989	9,1921	51,2965	0,3477	0,4421	101,8772
96-8b	457	Olivino	dunita	40,6302	9,4206	51,8804	0,2922	0,5689	102,7923
96-8c	458	Olivino	dunita	41,1197	9,2833	51,9560	0,3242	0,7128	103,3960
P-PA1-61a	500	Olivino	dunita	40,6140	8,5830	51,6907	0,4135	0,6943	101,9954

Como se puede valorar de los valores de los contenidos de las muestras de olivinos en varias de las litologías ultramáficas los valores del NiO, oscilan entre los 3000 y 4000 ppm.

Proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas y la migración geoquímica del níquel

El proceso de lateritización de las litologías ultramafitas serpentinizadas mediante la acción conjunta de los agentes del intemperismo, en particular la acción de las aguas meteóricas, variaciones de temperaturas, ácidos, Ph y otros factores físico – químicos y geológicos originaron la destrucción en primer lugar de la estructura del olivino.

Delvine et al, 1979, analizó en detalle las principales transformaciones del olivino y con ello la migración del níquel, asimismo, Wilson, M. J. 2004, destaca el papel de los minerales primarios y su papel en las reacciones de transformación de la molécula del olivino.

La acción de los agentes de la meteorización sobre las litologías máficas y ultramáficas van produciendo la destrucción de los minerales primarios, en particular los minerales ferro-magnesiales, olivino y piroxenos. Las transformaciones que se llevan a cabo en la corteza de meteorización se realizan a través de reacciones químicas:

- Oxidación
- Hidratación
- Hidrólisis
- Diálisis

La *oxidación* es la más frecuente de las transformaciones que tienen lugar durante el proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas, la oxidación está condicionada por la acción del oxígeno de la atmósfera sobre los elementos químicos que se liberan durante le proceso de transformación de los minerales primarios en particular del hierro, aluminio y manganeso entre otros.

El resultado de las reacciones de oxidación es la formación de óxidos e hidróxidos en la corteza de meteorización, formándose en unos casos compuestos solubles que migran de la corteza, en cambio otros elementos forman minerales estables los que vienen a constituir la composición fundamental de las cortezas ferro-niquelíferas cubanas y en otras regiones del planeta. Un ejemplo de lo anteriormente expresado, está dado en la composición de los horizontes del perfil laterítico del yacimiento Punta Gorda, en los que existe un predominio de minerales oxidados.

La *hidratación* está relacionada con las transformaciones de los minerales primarios, desde el mismo inicio del proceso de lateritización de las ultramafitas serpentinizadas, la hidratación se pone de manifiesto en los procesos de adsorción de moléculas de agua en la superficie de los minerales en formación en la corteza de intemperismo, y por otra parte, se produce la incorporación de moléculas de agua a la red de los nuevos minerales que se van formando, ejemplo de lo anterior lo constituyen la existencia de hidróxidos de hierro en las menas lateríticas.

La *hidrólisis* incluye las reacciones que se desarrollan entre los minerales primarios de las rocas ultrabásicas serpentinizadas con el H^+ del agua disociada; la intensidad del proceso de hidrólisis está condicionada por el valor del Ph del medio acuoso y la existencia de otros ácidos como el carbónico y el incremento de la temperatura del sistema. Durante la hidrólisis, los silicatos de los minerales primarios son destruidos y en su lugar surgen minerales arcillosos del grupo de las esmectitas niquelíferas.
La *diálisis* incluye las reacciones que conllevan la lixiviación de los minerales arcillosos al favorecer la migración de los cationes metálicos presentes en la estructura cristalina de éstos minerales. Las reacciones de oxidación, hidratación, hidrólisis y diálisis se desarrollan casi simultáneamente en el proceso de *lateritización* de las ultramafitas serpentinizadas.
Para ejemplificar las transformaciones que se producen en los minerales ferro-magnesianos usaremos el olivino, que como se conoce es el componente principal en la composición mineralógica de las ultramáficas serpentinizadas y es a la vez, como se demostró anteriormente, el portador principal primario de cobalto, hierro y níquel, en las cortezas de imtemperismo, una vez que ha sido destruida su red y pasan los elementos químicos a solución acuosa en el proceso de lateritización, de acuerdo al esquema de Golightly, J.P., 1981.

OLIVINO SUSTITUIDO POR SMECTITAS Y GOETHITA

$$\underset{\text{(forsterita)}}{4\,Mg_2SiO_4} + 10H^+ \longrightarrow \underset{\text{(saponita)}}{Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2} + 5Mg^{2+} + 4H_2O \text{ – (hidrólisis)}$$

$$\underset{\text{(fayalita)}}{Fe_2SiO_4} + 4O_2 + 8H^+ \longrightarrow \underset{\text{(nontronita)}}{Fe_2Si_4O_{10}(OH)_2} + \underset{\text{(goethita)}}{6FeO(OH)} \text{ - (oxidación – hidrólisis)}$$

$$\underset{\text{(olivino de Ni)}}{4Ni_2SiO_4} + 10H^+ \longrightarrow \underset{\text{(pimelita)}}{Ni_3Si_4O_{10}(OH)_2} + 5Ni^{2+} + 4H_2O \text{ – (hidrólisis)}$$

De la reacción anterior se demuestra la transformación más común que se desarrolla en el proceso de lateritización, que es la formación de ***goethita*** en el *horizonte limonítico* y la absorción desde la solución del Ni^{2+} que queda libre, este proceso caracteriza el horizonte limonítico en las menas lateríticas del yacimiento de Punta Gorda, tal como ha sido demostrado por Oliveira,et al. 2001, Galí, S. et al, 2006.
La **goethita** es el mineral predominante y el principal portador del níquel en la ***limonita de balance (LB)***, cálculos conservadores, consideran que la goethita constituye del 68,0 – 80,0 por ciento en peso de las menas del horizonte limonitico, conclusiones a la que había llegado Golightly, J.P., 1981, al expresar: *"The in situ limonite zone consist of fine-grained nickeliferous goehtite and amorphous ferric hydroxides with rare minor gibbsite"* (Golightly, J. P., 1981); (Oliveira, et al 2003).
La otra transformación del olivino, muestra la formación de cuarzo y goethita, proceso que también tuvo lugar en el yacimiento de Punta Gorda.

OLIVINO SUSTITUIDO POR CUARZO Y GOETHITA

$$\underset{\text{(forsterita)}}{Mg_2SiO_4} + 2H^+ \longrightarrow \underset{\text{(cuarzo)}}{SiO_2} + 2Mg^{2+} + H_2O \text{ – (hidrólisis)}$$

$$\underset{\text{(fayalita)}}{Fe_2SiO_4} + O_2 + 2H^+ \longrightarrow \underset{\text{(goethita)}}{SiO_2 + 2FeO(OH)} \text{ - (oxidación – hidrólisis)}$$

$$\underset{\text{(liebenbergita)}}{Ni_2SiO_4} + 2H^+ \longrightarrow \underset{\text{(ópalo, calcedonia)}}{SiO_2} + 2Ni^{2+} + H_2O \text{ - (hidrólisis)}$$

El proceso de absorción del Ni^{2+} por la ***goethita*** también tiene lugar en la transformación del olivino al formar cuarzo y goethita.

El proceso de transformaciones de los minerales también tiene lugar en los minerales del grupo de la serpentina, los que tienen un predominio en el *horizonte serpentínitico* (SB) en el yacimiento de Punta Gorda, en la reacción que sigue mas abajo se presenta la transformación de la serpentina en el horizonte serpentínitico. (Golightly, J. P., 1981); modificado en el presente trabajo.

HORIZONTE SERPENTINITICO - SB

$$\underset{\text{(serpenita – lizardita))}}{Mg_3Si_2O_5(OH)_4} + 3Ni_{ag} \rightleftharpoons \underset{\text{(serpentina-Ni - nepouita)}}{Ni_3Si_2O_5(OH)_4} + 3Mg^{2+}$$

En la reacción anterior la liberación del **Ni^{2+}** en la solución acuosa proveniente de la transformación del olivino y piroxenos rómbicos y liberado de la estructura de la goethita de la zona de limonita de balance sustituye al **Mg^{+2}** en la estructura de la serpentinita niquelífera – lizardita – formándose la **nepouita,** con composición muy similar a la **serpentina –Ni,** obsérvese que el **Mg^{2+}** que está en solución acuosa es removido de la corteza en forma solución que migra a horizontes inferiores o pasa formar parte de la magnesita la que, en ocasiones, rellena grietas en horizontes profundos de las ultramafitas.

En el caso específico del yacimiento Punta Gorda en el perfil L-48 se pone de relieve la existencia de la lizardita – muestra MN-5, de acuerdo a investigaciones recientes (Galí, S., et. al., 2006).

Perfil laterítico y minerales portadores del níquel

El perfil laterítico que se analiza es el L-48 del yacimiento Punta Gorda donde se expone las muestras estudiadas y su distribución espacial y los principales minerales identificados, con lo que se corrobora la migración geoquímica del níquel y los principales portadores

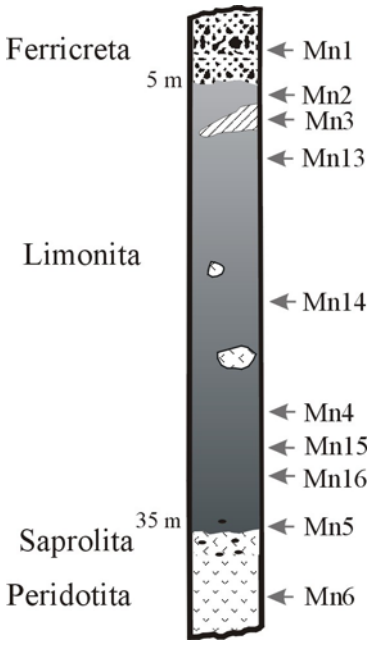

Figura. 2. Corte esquemático del perfil laterítico (L-48) con la localización de las muestras estudiadas.

La distribución de los minerales por las muestras estudiadas se expresan el la tabla No.2 así como el tanto por ciento en peso de cada mineral y su profundidad en el corte

Tabla No. 2 Principales fases minerales identificadas mediante DRX (% en peso)

Muestra	Profundidad	lizardita	olivino	enstatita	maghemita	goethita	hematites	gibbsita	asbolana	otros
MN1	2.5 m	0	0	0	0.3(3)	77(1)	13(1)	10.1(8)	NO	
MN2	5 m	0	0	0	0.3(3)	68.1(2)	15(1)	16.7(1)	NO	
MN3	10 m	0	0	0	0	86.6(8)	0	13.4(8)	SI	
MN13	11 m	0	0	0	5.7(3)	79.7(7)	8.1(7)	6.5(3)	NO	
MN14	22 m	0	0	0	3.3(5)	61.6(9)	35.1(9)	0	NO	
MN4	29 m	0	0	0	0.5(1)	98.1(2)	0	0	NO	pirocroita: 1.5(2)
MN15	31 m	0	0	0	14.4(4)	59.1(8)	22.6(7)	4.0(4)	NO	
MN16	33 m	19(3)	0	0	7.3(6)	68(3)	4.4(6)	0	NO	cuarzo: 1.6(2)
MN5	36 m	74(2)	0	0	5.7(5)	20(2)	0	0	NO	
MN6	40 m	63(2)	5.2(7)	31(1)	10.4(7)	0	0	0	NO	

Desde el primer horizonte de escombro – ferricreta – se manifiesta el predominio de la geothita con contenido del 77, 0% en peso, seguido por gibbsita, con valores entre 0% hasta 16,7%.
En el horizonte de limonita de balance, desde la muestra MN-2 hasta la muestra MN-16 los contenidos de goethita varían en el intervalo 61,9% - 98,1%, corroborando que el mineral constituye el componente principal del horizonte limonita de balance y el principal portador del níquel, le sigue en ese orden la hematita, con valores desde 0% - 35, 1% (muestra MN-14), la asbolana principal portador del cobalto, solo se identificó en una muestra, finalmente la maghemita, está presente en todo el perfil con la excepción de una muestra.
Como se aprecia, en la porción mas profunda del horizonte limonita de balance se identifica la existencia de la lizardita – $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ – hasta el horizonte de saprolita e incluso en las ultramafitas serpentinizadas, con contenidos desde 19,0% hasta 64,0%, la presencia del olivino solo se registra en la muestra MN-6, a 40 metros de profundidad, demostrando la existencia de la roca fresca serpentinizada, en el resto del perfil no se detecta la existencia del mineral.

Modelo teórico de la migración del níquel en el perfil laterítico

El modelo teórico de la migración del níquel en las cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas, en el ejemplo del yacimiento Punta Gorda, parte del concepto que los minerales primarios portadores del metal es el olivino y en menor grado los aportes de los ortopiroxenos en particular la enstatita – ferrosilita ($Mg_2Si_2O_6$ – $Fe_2Si_2O_6$), la desintegración del olivino genera la formación de óxidos e hidróxidos, hasta la formación de minerales de composición estructural mas complejos que los minerales primarios, el modelo que se expone está ejemplificado con la mineralogía identificada mediante las técnicas analíticas de avanzada.

a) Fase de desintegración del olivino

Olivino $\longrightarrow$ (proceso de intemperismo – lateritización): liberación de cationes**:** $\mathbf{Ni^{++}}$**,** Co^{++}, $Mn^{++,}$ Mg^{++}; lixiviación del Si y la formación de fases amorfas, ópalo y calcedonia.

b) Fase de formación de óxidos e hidróxidos

Oxidación del hierro: Fe^{++} $\longrightarrow$ Fe^{+++}; formación de hidróxidos de Fe, Al y Mn: la formación de **goethita** como principal portador del Ni^{++}, según la concepción de Ramdhor, P. (1984)

α - Fe_2O_3. H_2O [Ni^{++}, Co^{++}, Mn^{++}, Al_2O_3, SiO_2, BaO, MnO], al incrementarse el grado de cristalización de la goethita, se libera de los cationes adheridos en la superficie de la molécula

β - Fe_2O_3 . H_2O $\longrightarrow$ $\mathbf{Ni^{++}}$ (en solución acuosa)

c) Formación de silicatos de Ni

La formación de los silicatos de níquel en la zona inferior del horizonte de limonita de balance y la zona de saprolitas, se fundamenta en la sustitución del **Mg^{++}** por **Ni^{++},** permitiendo la formación de **smectitas niquelíferas, cloritas níquelífras** y los **minerales del grupo de la serpentina** portadores del metal, la liberación del níquel en forma catiónica desde la goethitas, origina un proceso de enriquecimiento secundario, lo que está fundamentado por los altos valores de los contenidos del metal en esta zona del perfil laterítico; el modelo de la migración geoquímica del Ni en las cortezas de intemperismo se puede resumir de la forma siguiente:

Olivino (liebenbergita) → **Goethita + Asbolana** → **Silicatos de Ni**

Implicaciones técnico – organizativas durante la exploración de explotación

La migración geoquímica del níquel y la complejidad mineralógica de las *menas lateríticas* y en particular la composición química y mineralógica de los horizontes meníferos, ***limonita de balance (LB)*,** con predominio de óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio, representados en la existencia de maghemita, goethita, gibbsita, espinelas cromíferas, hematita, asbolana y psilomelano y el horizonte ***serpentina de balance (SB),*** donde la composición mineralógica se caracteriza por la existencia de minerales del grupo de las smectitas niquelíferas (montmorrillonita, nontronita, beidelita, halloysita y saponita), cloritas de níquel (schucardita y revdinskita) y minerales del grupo de la serpentina (nepouita, pecorita, pimelita, willemsita, vermiculita y nimita), minerales primarios de las ultramafitas serpentinizadas y en ocasiones minerales de origen hidrotermal; esa diversidad mineralógica que se extiende desde óxidos hasta silicatos niquelíferos hidratados constituyen las ***menas lateríticas*** que alimentan el proceso de lixiviación carbonato – amoniacal de la Empresa "Cmdte Ernesto Ché Guevara", como promedio unos ***30 minerales*** de diferente composición química entran constantemente al proceso metalúrgico.

De los minerales que componen las menas lateríticas, son pocos los que constituyen los portadores del níquel y del cobalto, así en el horizonte de *limonita de balance (LB)*, con predominio de óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio, la ***goethita*** (Fe_2O_3. H_2O), es el mineral principal portador de níquel – aproximadamente el 89,8% del Ni - y representa entre el **60% - 98,0%** del peso del horizonte limonítico (Tabla No. 2) y es además portador de cobalto, aproximadamente el 6%; el cobalto se concentra además en los óxidos de manganeso entre ellos la asbolana (wad de cobalto), pirolusita y psilomelano.

En el horizonte *serpentina de balance (SB*, donde hay existencia de minerales del grupo de la serpentina – más de 20 minerales – ricos en magnesio se produce el enriquecimiento de Ni, llegando a contenido del 2,0% - 3,0%, producido por la sustitución del Mg^{++} por el Ni^{++} dada la similitud de sus respectivos radios iónicos; en tales condiciones el Ni se concentra en la nepouita – $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ – karspinskita – $(Ni, Mg)_2Si_2O_5(OH)$- pimelita – $Ni_3Si_4O_{10}(OH)$ – nontronita – $Na_{0.3}Fe_2(Si,Al)_4\ O_{10}\ (OH)_2$. nH_2O y otros más, además se incluyen talco, smectitas niquelíferas y en menor grado clorita y silicatos niquelíferos hidratados.

Al llevarse a cabo la explotación de las menas laterítcas, en ambos horizontes productivos, en los frente de extracción no existe un control sistemático – permanente- por parte de geólogos y mineros, en consecuencia, la explotación de las menas, quedan en manos de los operarios del equipamiento de arranque y transportación de la materia prima mineral a la planta metalúrgica.

Dada la realidad que la explotación de las menas lateríticas de ambos horizontes se lleva a cabo mediante el control de los contenidos del Ni, Co, Fe, Al, Si y otros y elementos y no por la composición mineralógica, se hace indispensable, incrementar el control de la extracción de las menas, de forma tal que por cada frente de explotación esté presente un minero para que proyecte, dirija y ejecute la explotación y un geólogo para que controle la calidad de las menas, en particular los contenidos de los principales parámetros exigidos por el proceso metalúrgico, lo que permitirá en primer lugar la calidad de las menas así como la eliminación de agregados minerales estériles como lo son los bloques y diques de gabros, diabasas, gabro-pegmatitas y otras litologías máficas que

originan – una vez dentro del proceso – la caída de los valores de los contenidos de Ni. Co e Fe, con el consiguiente consumo de electricidad, petróleo y otros insumos y la baja recuperación del níquel y cobalto.(Muñoz Gómez, et, al, 2004)

CONCLUSIONES

- Se demuestra que el olivino – liebenbergita – es el mineral primario portador del Ni en las cortezas de imtemperismo y es la fuente primaria de la migración geoquímica del metal.
- Se corrobora que la desintegración del olivino, mediante el proceso de lateritización conduce a la formación de óxido e hidróxidos de hierro, como proceso geoquímico fundamental y vehículo de la migración del Ni.
- Por primera vez se establece un modelo de la migración geoquímica del níquel en los yacimientos lateríticos cubanos, caracterizados por la formación de perfiles oxidados.
- Se demuestra que el incremento del níquel hacia la zona de las saprolitas está condicionado por la migración del níquel desde los horizontes superiores, produciendo un enriquecimiento secundario, concentrándose el metal en tres grupos de minerales silicatados.
- Queda demostrado que el mineral predominante en las menas lateritas de níquel y cobalto, en el horizonte limonítico (LB) en el yacimiento Punta Gorda es la goethita**,** y representa alrededor del 80,0% en peso de las menas del horizonte.
- Las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda son sumamente complejas y están constituidas por óxidos, smectitas, cloritas niquelíeras, minerales del grupo de la serpentina y minerales primarios de las ultramafitas serpentinizadas; no menos de 30 minerales entran al proceso metalúrgico de la planta metalúrgica Cmdte Ernesto Che Guevara.

Recomendaciones

- Implantar un control durante la explotación en cada frente, de forma tal*, que siempre esté presente un minero y un geólogo* que decidirán las menas lateríticas a explotar y cuales no deben entrar al proceso metalúrgico.
- Creación de *un sistema de depósitos*, para incrementar la *homogenización* de los minerales que integran las menas lateríticas, teniendo presente que las menas provienen de dos horizontes (LB + SB), los que presentan características químicas y mineralógicas diferentes.
- Valorar la conveniencia de *no explotar el yacimiento durante las horas nocturnas* y realizar una evaluación tecnológica y económica de su aplicación; la no explotación del yacimiento durante la noche redundaría sobre la calidad de las menas lateríticas a extraer y la eliminación de estériles al proceso de beneficio; de otra manera, establecer las condiciones de iluminación y de control similar a la explotación diurna.
- Cesar el envío al proceso metalúrgico de las *menas lateríticas en tiro directo*, lo que evitaría la caída de los parámetros de contenido de hierro, níquel y cobalto, exigidos por el proceso de lixiviación carbonato-amoniacal.
- Analizar la eficiencia y resultados del sistema de muestreo, desde los frente de explotación hasta el producto final y estudiar el equipamiento necesario que permitan determinaciones de alta precisión de los contenidos de los minerales en las menas lateríticas, del producto final y las colas industriales.
- Implementar métodos avanzados para la modelación de los yacimientos, que permitan mejorar el pronóstico de las diferentes variables geológicas y la cuantificación de recursos y reservas minerales en los yacimientos.
- Continuar las investigaciones de la composición química, mineralógica y textural de las menas lateríticas, productos metalúrgicos y colas industriales para lograr incrementar la eficiencia del proceso y aumentar la extracción del níquel, cobalto y otros metales existentes en las menas lateríticas.

- Continuar las investigaciones geoquímicas, mineralógicas de las menas lateríticas que permitan esclarecer la existencia de los altos valores de aluminio en el perfil laterítico, así como establecer el protolito serpentizado antes del proceso de lateritización.

BIBLIOGRAFÍA

Almaguer, A. 1995 Cortezas de intemperismo. Algunas particularidades de sus partículas finas. Minería y Geología 12, 9-19.

Brand N.W., Butt C.R.M., Elias M. (1998). AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, 17, 81-88.

Capote. N. Rojas-Puron, L.A. Bassas, P.R. Determinación de la distribución del níquel en las macrofases de mineral laterítico. Minería y Geologñía 10 17-23.

Dalvi A.D., Bacon, W.G., Osborne R.C. (2004). En: Imrie W. P., Lane D. M. (eds.),International Nickel Laterite Symposium TMS 2004 – 133rd Annual Meeting and Exhibition, Charlotte, N. Carolina, 23.

Elias, M. Nickel laterite deposits – geological overwiew, resourses and exploitation. In: Giant ore deposits: Characteristic, genesis an explotation. CDES Special Publication 4, Center for ore deposits research, University of Tasmania, pp, 205-220.

Formell, F. 1979 Clasificación morfogenética de las cortezas de intemperismo sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. Ciencias de la Tierra y del Espacio 1, 33-49.

Galí, S., Proenza, J.A., Labrador, M. Melgarejo, J.C., Tauler, E., Muñoz-Gómez, N., Rojas-Purón, A., Orozco-Melgar, O. (2006): Caracterización mineralógica de los perfiles lateríticos tipo óxido: yacimiento Punta Gorda (Cuba Oriental). /Macla/a, 6, 197-199.

Golightly, J. P. 1981, The nickelipherous laterite deposits. Economic Geology, 75th. Anniversary Volume, 710 – 735 pp.

Morimoto, N. et.al. (1988) Nomenclature of pyroxenes. American Mineralogist, vol.73, pp.1113-1123

Muñoz Gómez, J. N. et. al. 2004, Mineralogía de las menas lateríticas del yacimiento Punta Gorda: Implicaciones técnico – organizativas durante la explotación, VI Congreso de la Sociedad Cubana de Geología.

Labrador, M., Proenza, J.A., Galí, S., Melgarejo, J.C., Tauler, E., Rojas-Purón, A., Muñoz-Gómez, N., Rodríguez-Vega, A. (2006): Minerales de Mn-Co-Ni en las lateritas de Cuba Oriental: resultados preliminares. >/Macla/, 9, 281-284.

Oliveira et, al. Ochreous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba. Journal of South American Earth Sciences 14 (2001) 307-3017

Proenza, J.A. Melgarejo, J. C. Gervilla, F. Comments on the paper “Ochreous laterite: a nickel ore from Punta Gorda, Cuba by Oliveira et, al. Journal of South American Earth Sciences (2003)

Ramdorhr, P. (1980) The ore minerals and their intergrowths, 2nd. edn. Oxford, 2 vols, pp. 1205. Pergamon P*ress.* RFA.