

Níquel laterítico y el proceso RKEF

Ejemplo de caso: mina de Onça Puma - Brasil

Oscar Jesús Choque Fernández

Engenharia de Materiais, Instituto Federal do Pará, Brasil,
Faculty of Geociences, University of Halle, Alemania
ochoque.fernandez@gmail.com

Herbert Pöllmann

Faculty of Geociences, University of Halle, Germany

Resumen

Los depósitos lateríticos de níquel tiene cada vez mayor importancia en la producción del metal níquel. Se utilizan procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos para la obtención del metal, pero la elección de la ruta tecnológica y del producto final depende directamente de las características de la mena a ser alimentada a la planta. El níquel laterítico saprolítico es la fuente principal para la producción de aleaciones Fe-Ni para la industria del acero. En el estudio realizado sobre níquel laterítico de Onça Puma, el níquel ocurre en la serpentina (lizardita-crisotila), esmectita (nontronita/saponita - montmorillonita) y clorita (chamosita \uparrow Fe/clinochloro \downarrow Mg). En las serpentinas con fórmula química $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, Mg y Si están siendo substituidos con cantidades menores de Fe y Ni (tenor medio de 1,7% de níquel), formando soluciones sólidas de substitución. Los análisis químicos y la mineralogía del perfil laterítico de los saprolitos, establece que el proceso de extracción metalúrgica RKEF tiene las operaciones metalúrgicas necesarias para la obtención de aleaciones de hierro-níquel.

Palabras clave: laterita, hierro-níquel, RKEF.

Lateritic nickel and RKEF process

Case of study: Onca Puma mine - Brazil

Abstract

Lateritic nickel deposits are present greater importance in the production of nickel. Hydrometallurgical and pyrometallurgical processes are used to obtain this metal, but the choice of technological route and the final product depends directly on the ore characteristics feed to the plant. The saprolitic lateritic nickel is the main raw material for the production of Fe-Ni alloy to the steel industry. In the studies of lateritic nickel about Onca Puma mine, the ore occurs in serpentine (chrysotile-lizardite), smectite (nontronite/saponite - montmorillonite) and chlorite (chamosite \uparrow Fe/clinochloro Mg \downarrow). The Mg and Si with chemical formula $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ of serpentines are replaced by Fe and Ni, forming (average grade of 1.7% nickel) solid solution substitutions. The chemical analysis and the mineralogy of saprolite from lateritic profile indicate that metallurgical extraction process - RKEF are the unit operations necessary to produce iron-nickel alloys.

Keywords: laterite, iron-nickel, RKEF.

Níquel laterítico e o processo RKEF

Caso de estudo: mina de Onça Puma - Brasil

Resumo

Os depósitos lateríticos de níquel estão apresentando cada vez mais maior importância na produção de níquel. Os processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos são usados na obtenção desse metal, porém a escolha da rota tecnológica e do produto final depende diretamente das características do minério alimentado a usina. O níquel laterítico saprolítico é a matéria prima principal para a produção de ligas de Fe-Ni para uso na indústria do aço. Nos estudos realizados sobre níquel laterítico de Onça Puma, o níquel ocorre na serpentina (lizardita-crisotila), esmectita (nontronita/saponita - montmorillonita) e clorita (chamosita \uparrow Fe/Clinocloro \downarrow Mg). Nas serpentinas com fórmula química $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ o Mg e Si são substituídos com teores de Fe e Ni, formando (teor médio de 1,7% de níquel) soluções sólidas de substituição. As análises químicas e a mineralogia do perfil laterítico para os saprolitos estabelece que o processo de extração metalúrgica RKEF apresenta as operações necessárias para produzir ligas de ferro-níquel.

Palavras chave: laterito, ferro-níquel, RKEF.

1. Introducción

El níquel es duro y maleable, resistente a la corrosión y mantiene sus propiedades físicas y mecánicas inclusive si es sometido a temperaturas extremas. Por eso, no es sorprendente que un 60% de la producción mundial de este metal sea destinada para la producción de acero inoxidable [1].

Las menas para la producción de níquel básicamente son de dos tipos:

- Menas sulfuradas: depósitos primarios asociados con rocas máficas y ultramáficas.
- Menas lateríticas: depósitos oxidados cerca de la superficie formados por encajantes ricos en olivino seguidos de interperismo intenso.

Los depósitos de sulfuros de níquel ocurren como sulfuros macizos o como menas diseminadas. El primero tiene contenido de minerales sulfurados en torno de 90-95%, el segundo es una mezcla de sulfuros y roca silicosa como ganga. Principalmente, el níquel en los sulfuros ocurre en el mineral pentlandita $(Ni,Fe)_9S_8$. Las operaciones de explotación de níquel son realizadas principalmente en el norte de Canadá y Siberia (Rusia) [1, 2]. En Brasil los depósitos más importantes están en Mirabela (BA) y Fortaleza de Minas (MG).

Las operaciones para explotar níquel laterítico están localizadas principalmente en islas tropicales (Nueva Caledonia, Filipinas, Indonesia y Cuba) y en la región tropical de Sudamérica.

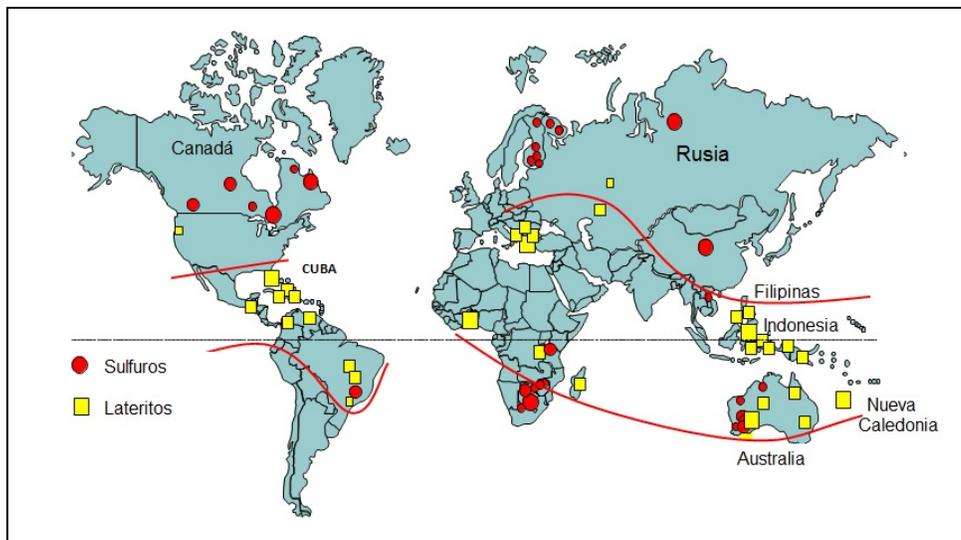


Figura 1. Localización de los principales depósitos de níquel (Modificado de Freyssinet et al. 2005 y Superiadi 2007).

Otras fuentes significativas de níquel se encuentran al Sudeste de África y Australia Occidental.

Las menas de níquel poseen reservas y depósitos conocidos, suficientes a nivel mundial para la explotación por más de 100 años. La producción de las menas sulfuradas han sido la dominante debido a las elevadas leyes de níquel y su fácil tratamiento en comparación con los de lateritos [3, 4, 5, 6, 7].

A nivel mundial, la producción de níquel, proviene de Rusia, Canadá, Nueva Caledonia, Australia, Brasil, Indonesia, Filipinas y Cuba (figura 1). La producción del níquel está en el margen de 1.500.000 toneladas/año. La producción de níquel primario en un 60 % corresponde a sulfuros y el restante de lateritos, con una tasa de crecimiento de 4%; entretanto las reservas de sulfuros son cerca de 30% y níquel laterítico 70%. La extracción de níquel a partir de sus menas se realiza cerca del lugar donde la mena es explotada, con algunas excepciones.

En Brasil existen varios depósitos lateríticos, siendo las más destacados: Goiás (Barro Alto, Iporá, Jaupacé, Água Branca, Morro do Engenho, Níquelândia, Santa Fe, así como Jussara, Crixás, Diorama, Goianésia, Montes Claros de Goiás), Pará (Vermelho, Onça Puma, Jacaré y Jacarezinho, Quatipuru, Serra do Tapa y Vale dos Sonhos), Piauí (São João do Piauí), Minas Gerais (Morro do Níquel), Tocantins (Serra do Quatipuru, Lonta y Vila Oito), entre otros [8, 9, 10, 11].

1.1 Lateritos de níquel. Mineralogía

Los lateritos son productos geológicos resultantes de los procesos de lateritización, o sea, formados por el intemperismo

tropical y paelotropical de rocas expuestas a la interacción atmósfera-hidrosfera, manifestándose a través de perfiles lateríticos, colectivamente denominados de formaciones lateríticas. Esos productos dieron como resultado una diferenciación textural, estructural, mineralógica, composición química (dominio de Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , SiO_2 e H_2O , predominantemente), e isotópica durante la formación del perfil a lo largo del tiempo geológico (desde el Proterozoico), en varios eventos distintos. Como resultado del proceso se formaron depósitos con minerales de níquel.

Los perfiles pueden ser truncados por la erosión, transportados, deformados por tectónica, alterados por el metamorfismo, diagenesis y petrogenesis, lo que imprime variación mineralógica, química y textural. El estudio en detalle de las características texturales, mineralógicas y geoquímicas permite identificar aun la naturaleza de la roca madre y su grado de evolución en los perfiles [12, 13, 14, 15]. Los perfiles y coloración de las rocas lateríticas, varían ampliamente en sección vertical, dando origen a la clásica sucesión característica de los horizontes: - costra, - horizonte moteado/arcilloso, - saprolito, - roca madre.

El proceso genético que actúa en la formación de un depósito laterítico de níquel (garnierita y limonitas níquelíferas), ocurre por la destrucción del mineral primario y la formación de minerales secundarios más ricos que el mineral primario en el elemento de interés. Esto significa que los elementos más solubles, migran en el perfil de alteración y precipitan como fases secundarias en los horizontes que presenten condiciones propicias para ese hecho [14].

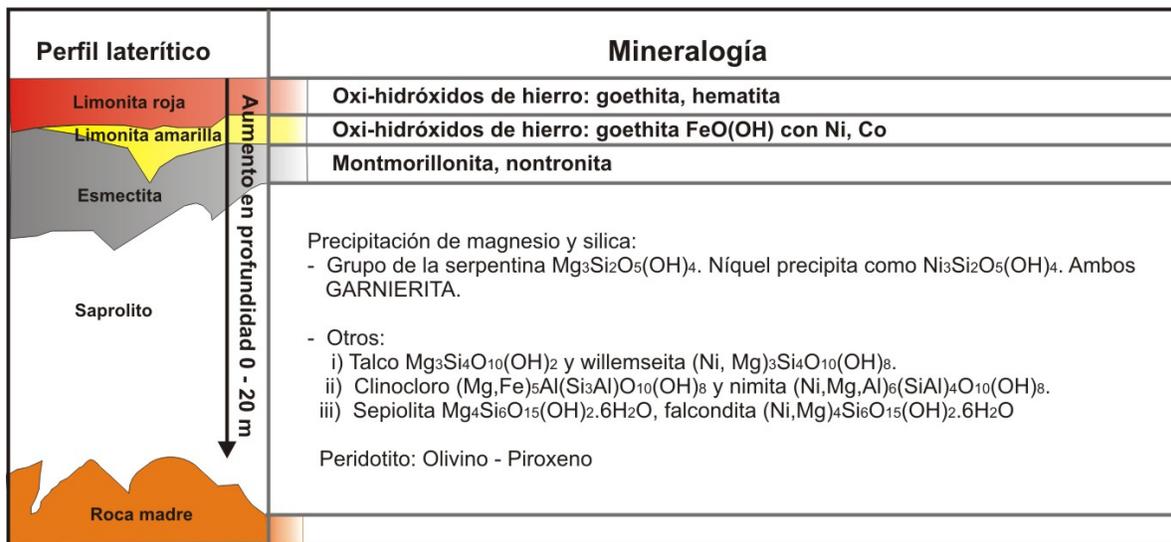


Figura 2. Mineralogía del perfil laterítico de níquel (Modificado de Freyssinet et al. 2005 y Crundwell et al. 2011).

Debido a que el níquel posee menor movilidad que otros metales, éste forma elevadas concentraciones residuales con otros metales móviles lixiviados a lo largo del perfil laterítico, como resultado dio lugar a mezclas con variados minerales (figura 2) de oxi-hidróxidos de hierro y silicatos de magnesio hidratados, con contenidos variables de níquel en los diferentes horizontes del perfil.

A veces el laterito resultante de serpentina esta formado por hierro y níquel (con aproximadamente 1,5% de níquel) como ocurre en Cuba y en Filipinas. Los lateritos resultantes de peridotito, dunito o piroxenito, se conocen como silicatos de níquel y/o silicatos portadores de níquel. El contenido de níquel excede 1,5% y sus principales depósitos ocurren en Nueva Caledonia, Indonésia, Venezuela y Brasil.

El níquel está presente en la roca original ultrabásica incorporado en el reticulo cristalino de los olivinos, serpentinas y, en menor grado, en los piroxenos. Esos minerales son fácilmente alterados, dando origen a nuevos minerales como la serpentina, talco, clorita y la goethita enriquecidos en níquel. El control litológico es muy importante en este caso, pues las rocas ultrabásicas son las únicas con contenidos de níquel suficientes para generar depósitos por intemperismo. En este caso, también, el factor climático cuenta mucho, siendo las regiones de clima con más contraste las más favorables para las genesis de depósitos de níquel laterítico.

1.2 Los lateritos de níquel y su relación con la metalurgia

Del níquel como metal refinado o hierro-níquel, se usa aproximadamente el 60% en la fabricación de acero inoxidable. Otro 14% es destinado a la producción de superaleaciones o aleaciones no-ferrosas. Ambas familias de aleaciones son ampliamente usadas debido a su alta resistencia a la corrosión. La industria aeroespacial es la primera consumidora de superaleaciones basadas en níquel, otros son los álabes de turbina, discos y otras piezas críticas de los motores jet. También se usan las superaleaciones basadas en níquel para la fabricación de turbinas de combustión de uso terrestre, tales como los encontrados en las estaciones de generación eléctrica. El 26% restante del consumo se distribuye entre la producción de aceros-aleaciones, revestimiento metálico, productos de fundición, baterías recargables, acuñado de monedas, catalizadores y otros químicos [1, 2].

1.3 Procesos de producción de níquel laterítico

Para la producción de níquel son usados procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. La elección de la ruta tecnológica y del producto final a ser producido depende directamente de las características de la mena a ser alimentada a la planta (figuras 2 y 3).

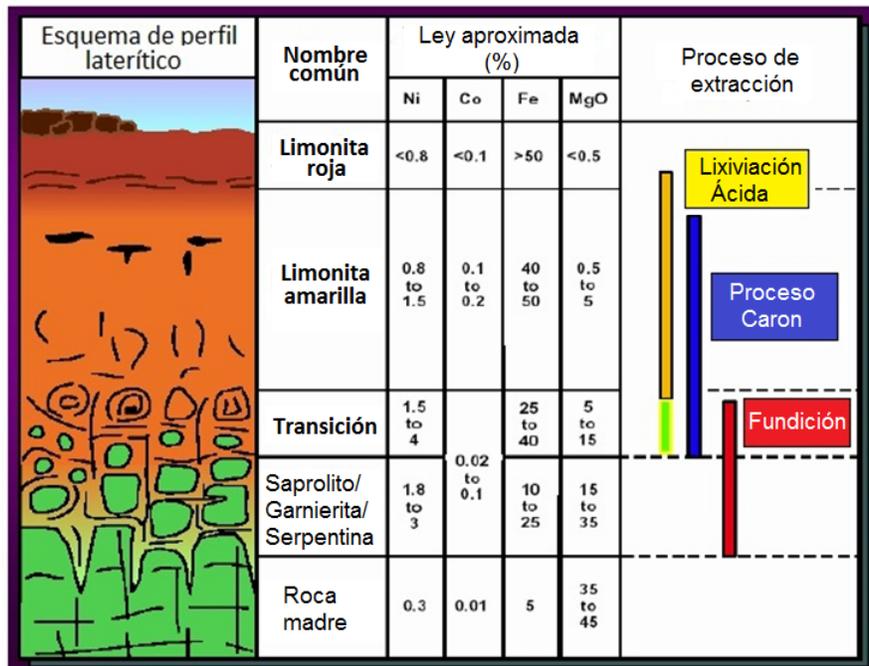


Figura 3. Procesos de extracción de níquel da una mena laterítica en función del perfil laterítico y los contenidos de Ni, Co, Fe y MgO.

Los procesos metalúrgicos para la obtención de Ni y FeNi a partir de lateritos de níquel son:

Fundición	Lixiviación ácida (HPAL)	Lixiviación amoniacal (Caron)
<i>Upgrade de la mena</i>		
Secado	Lixiviación a elevada presión y temperatura	Secado
Calcinación	Precipitación y redisolución (opcional)	Calcinación
Reducción	Purificación y recuperación	Lixiviación amoniacal
Refino o Conversión		Purificación y recuperación
Hierro-níquel o mata	Níquel (Cobalto)	Níquel (Cobalto)

Figura 4. Procesos de tratamiento de menas de lateritos de níquel (Adaptado de Inco, Crundwell et al. 2011, Vignes 2013).

1.3.1 Proceso Pirometalúrgico. Fundición RKEF (Rotary Kiln-Electric Furnace)

Es adecuado para menas conteniendo predominantemente saprolito (+/- enriquecimiento de la garnierita supergénica). Esas menas contienen proporcionalmente menos cobalto y hierro comparadas con las menas limoníticas. La relación Ni/Co en la alimentación a la planta de fundición esta alrededor de 40. Una operación de lixiviación puede consumir más ácido para disolver el silicato de magnesio haciendo difícil la extracción del níquel [16]. Esas menas son fundidas para producir aleaciones hierro-níquel o mata.

1.3.2 Proceso Hidrometalúrgico Caron

El proceso Caron puede ser empleado para el tratamiento de menas limoníticas o una mezcla de limonita y saprolito de la zona de transición. El proceso puede tolerar mayores cantidades de magnesio que en el del proceso PAL. Después del secado y la calcinación se realiza la lixiviación amoniacal y luego la purificación y recuperación para la obtención de níquel (cobalto).

1.3.3 Proceso Hidrometalúrgico Lixiviación Ácida con Alta Presión (HPAL)

El proceso HPAL requiere menas que sean predominantemente limoníticas, es el caso de los lateritos que contienen esmectita (nontronita). La mena es sometida a intensa lixiviación con ácido sulfúrico. Después de la precipitación, purificación y recuperación se obtiene el níquel electrolítico, a veces óxidos de níquel o briquetas de níquel. Algunas plantas producen materiales intermedios (sulfuros mixtos o hidróxidos mixtos), que son refinados en otras plantas.

El objetivo del presente trabajo consiste en relacionar la mineralogía de un perfil laterítico y el tipo de metalurgia que se hace necesaria para producir aleaciones de Fe-Ni.

2. Materiales y métodos

Las muestras fueron colectadas en la mina de Onça-Puma el 2012. Diferentes métodos analíticos fueron usados para la caracterización de la mena laterítica. La microscopía óptica de luz transmitida fue usada para identificar las facciones de las fases y sus relaciones texturales en láminas delgadas; la difracción de rayos-X fue usada para la determinación de fases, para eso fue usado un difractómetro X'Pert PRO de PANalytical; los ensayos químicos fueron realizados usando la fluorescencia de rayos-X con el espectrometro SRS Siemens 3000 Secuencial Ray-X. Esos análisis fueron realizados paralelamente en el Instituto Federal do Pará (Curso de Ingeniería de los Materiales)-Brasil y el Instituto de Geociencias de la Universidad de Halle, Alemania.

3. Resultados y discusión

3.1 Níquel laterítico de la mina de Onça Puma

Los minerales de mena son silicatos hidratados de níquel o portadores de níquel de variada composición química y estructura, de granulación muy fina, y frecuentemente pobremente cristalizada. La precisión en la identificación mineralógica con frecuencia es difícil, especialmente cuando forma mezclas en el nivel de celda unitaria.

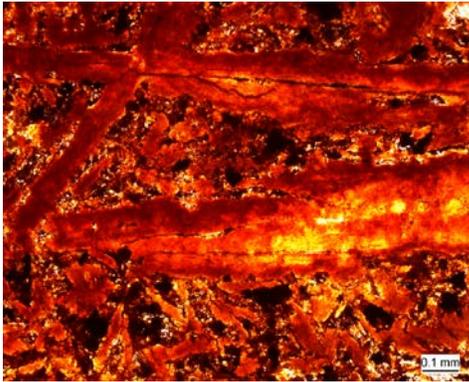
Los fragmentos colectados *in situ* de la zona saprolítica expuestos en el *pit* de Onça-Puma, muestran garnierita y limonitas en variados tonos de color marrón clara a oscura con tonos verduzcos, así como de aspecto ocre. Los mismos presentan vetillas o coberturas expuestas a lo largo de fisuras y superficies fracturadas.

Un grupo de fragmentos presenta una matriz marrón finamente granulada de clorita (chamosita formada a partir de piroxeno) (figura 5a). Un segundo grupo muestra esmectita con caolinita tipo acordeón (roca original consistía de flogopita rica y piroxeno) (figura 5b). Pero el principal grupo de fragmentos

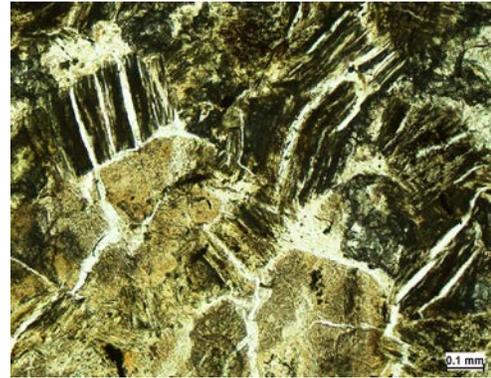
estudiados muestra minerales neoformados como reticulados irregulares formando una matriz predominantemente rica en serpentina con cuarzo (a veces goethita), (figura 5c). El tejido de las mallas en escala microscópica revela bandas paralelas con variación química de Fe y Mg (figura 5d), y su respectivo análisis

químico. En esa tabla química, puede observarse que la banda central m6 presenta semejanza química con la cavidad externa m13, indicando fases con formación temporal semejante, pero diferentes de las demás bandas.

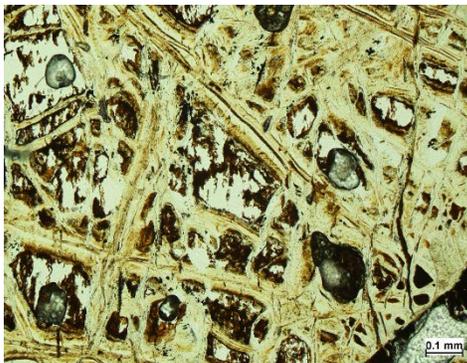
A



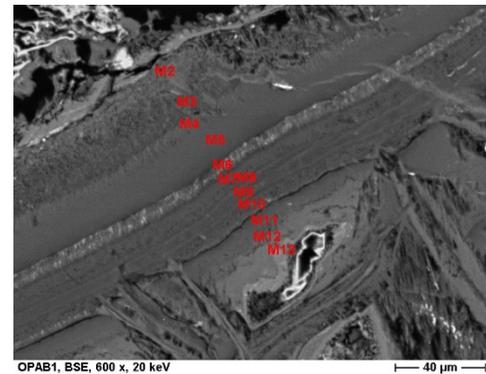
B



C



D



OPAB1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10	m11	m12	m13
Elemento	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
O	46,1	44,0	45,3	44,5	40,9	44,1	40,5	42,7	43,2	44,1	49,2	46,3
Mg	21,7	21,4	20,6	21,5	13,8	21,6	20,7	22,3	22,3	19,4	21,3	18,3
Al		0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4	
Si	18,7	18,6	18,5	21,4	13,9	20,6	22,0	20,6	20,7	20,0	18,1	13,2
Cr					0,3							
Fe	10,0	11,1	9,4	6,6	26,0	8,1	9,5	7,4	8,3	8,8	7,8	20,4
Ni	3,5	4,6	5,8	5,6	4,6	5,1	6,6	6,4	5,0	7,3	3,1	1,8
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figura 5. Fases minerales identificadas. a) Clorita, b) Esmectita c) Serpentina. Imágenes de luz transmitida, n//. d) Variación química de las bandas de la malla de la serpentina y su análisis químico. Imagen por MEB y microanálisis por SED.

Los espectros difractométricos indican serpentinas (lizardita-crisotila), cloritas (clinocloro-chamosita) y esmectitas (nontronita/saponita) (figura 6), con picos bien definidos. Las serpentinas cuando son comparadas con sus modelos difractométricos sugieren ser principalmente lizardita ((Mg Fe)₃(Si₂O₅)(OH)₄) (PDF:00-011-0386) y/o crisotila (Mg₃(Si₂O₅)(OH)₄) (PDF: 00-002-0094), asociadas con maghemita (γ-Fe₂O₃) (PDF: 01-089-5892) y cuarzo (SiO₂) (PDF: 00-005-0490). En los espectros ocurre sobreposición de picos en la serpiente, lo que hace difícil una identificación precisa de las fases, pudiendo ocurrir también nepouíta (Ni₃Si₂O₅(OH)₄). La presencia de

hierro es notoria, pues el background está levemente inclinado. En el caso de las cloritas, sugiere ser la fase chamosita (↑Fe)/clinocloro (↓Mg), asociada con goethita y caolinita. Entretanto la esmectita, probablemente nontronita, (PDF: 00-002-0026), está asociada con caolinita. Cuando se realizan los ensayos correspondientes para minerales de arcilla (figura 6b), existe un nítido desplazamiento del pico con distancias reticulares de 14Å para 16Å, confirmando su ocurrencia como filosilicato esmectita, lo que también indica tamaños de grano muy finos.

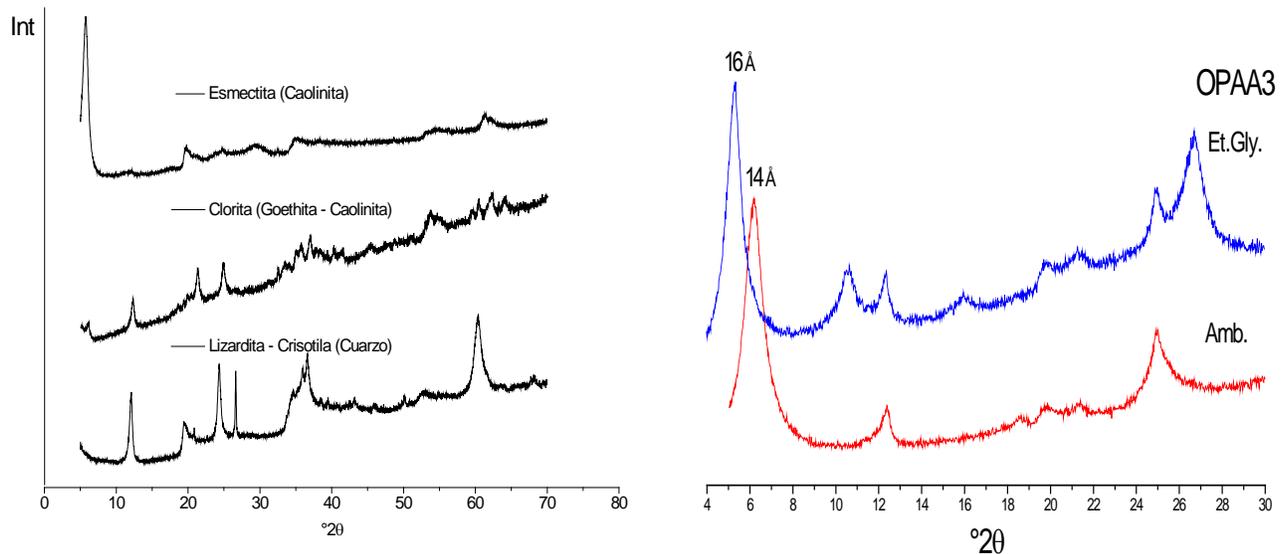


Figura 6. Espectros difractométricos identificando las fases portadores de níquel del perfil laterítico (izquierda). A la derecha espectro de DRX indicando nontronita/saponita.

Los análisis químicos (tabla 2), muestran los componentes químicos con contenidos diversos para las muestras analizadas, pudiendo clasificar tres tipos de variación en el perfil laterítico.

- Serpentina: lizardita (crisotila - fibras ?), (nepouíta – Ni-mineral ?)
- Esmectita: nontronita/saponita (montmorilonita)
- Clorita: chamosita (↑Fe)/clinocloro (↓Mg)

Otros minerales son: caolinita, hematita, magnetita, trevorita, cuarzo, goethita y cromita.

La fórmula genérica de la garnierita puede ser considerada como [Mg(Ni,Co)]₃Si₂O₅(OH)₄, para representar las menas saprolíticas en las reacciones químicas de los procesos metalúrgicos [1].

En los estudios mineralógicos, no fueron identificadas fases de níquel, entretanto si fases portadoras de níquel que corresponden a crisotilas y/o lizarditas. Las serpentinas con fórmula química Mg₃Si₂O₅(OH)₄ donde Mg y Si están siendo substituidos con tenores menores de Fe y Ni.

Los análisis químicos y las fracciones mineralógicas en el perfil idealizado de la figura 3 y la tabla 3, confirman la zona y el proceso de extracción metalúrgica RKEF.

El proceso pirometalúrgico RKEF entonces es adecuado para el tratamiento de las menas garnieríticas por dos motivos: leyes con poco hierro (15%), (tabla 3), de modo que produce hierro-níquel rico en níquel (20% -30% de Ni) y que contiene cantidades considerables de magnésio (MgO), que consumiría ácido sulfúrico en exceso si este fuese lixiviado [1].

Tabla 1. Analisis químicos por fluorescencia de rayos-X (FRX) de las muestras colectadas en la mina.

Muestra	OPAA2	OPAA6	OPAB1	OPA RET	OPAA1	OPAA3	OPAA4
MgO (%)	28,812	23,5	31,124	31,129	3,529	2,914	2,442
Al ₂ O ₃ (%)	0,13	0,226	0,981	0,16	18,965	14,844	16,839
SiO ₂ (%)	37,196	31,863	35,025	38,246	25,582	42,31	43,795
P ₂ O ₅ (%)	0	0	0	0	0,015	0	0
SO ₃ (%)	0,039	0,027	0,025	0,04	0,045	0,019	0
Cl (%)	0	0	0	0,028	0	0	0
K ₂ O (%)	0	0	0,009	0,012	0	0,02	0,018
CaO (%)	0,009	0,01	0,015	0,013	0,039	0,108	0,111
Sc ₂ O ₃ (%)	0	0	0	0	0,016	0,008	0,011
TiO ₂ (%)	0,012	0,014	0,037	0,011	2,358	0,947	1,116
Cr ₂ O ₃ (%)	0,356	0,48	0,757	0,695	1,017	0,403	0,487
MnO (%)	0,215	0,308	0,099	0,126	0,579	0,14	0,033
Fe ₂ O ₃ (%)	15,024	24,023	13,498	8,739	30,718	16,882	13,98
CoO (%)	0,156	0,138	0,073	0,181	0,255	0,092	0,055
NiO (%)	5,711	5,577	3,307	5,079	3,096	2,321	1,992
ZnO (%)	0,05	0,024	0,02	0,009	0,098	0,052	0,045
Y ₂ O ₃ (%)	0	0	0	0	0,005	0,015	0,016
ZrO ₂ (%)	0	0	0	0	0,025	0,015	0,021
LOI (%)	12,29	13,81	15,03	15,53	13,65	18,91	19,04
	100	100	100	100	100	100	100
	Saprolito			Clorita		Esmectita	

Tabla 3. Mineralogía y analisis químicos del perfil laterítico de Onça Puma junto al proceso RKEF.

Muestra	Ni (%)	Co (%)	Fe (%)	MgO (%)	
Clorita OPAA1	2,4	0,2	49,0	3,6	
Esmectita OPAA3 OPAA4	1,5- 1,8	< 0,1	22,3- 26,9	2,4-2,9	
Saprolito OPAA2 OPAA6 OPAB1 OPARET	2,5- 4,4	< 0,1	13,9- 38,6	23,5-31,1	RKEF

3.2 Níquel laterítico y su procesamiento por RKEF

El proyecto Onça Puma desarrollado por la Empresa Vale (división Mineração Onça Puma Ltda - MOP), es una planta de fundición de hierro-níquel que produce 40.000 toneladas/año de níquel a partir de la mena de laterito. La planta usa el proceso RKEF. Las operaciones comenzaron en la fase de *ramp up* en marzo de 2011 (Vale 2011).

La mena de níquel proveniente da mina es empilada por un Stacker, para luego ser transportada para el secado. La mena está constituida por los minerales de mena saprolíticos, principalmente serpentinas lizardita/crisotila.

La mena húmeda se alimenta a la operación de secado (figura 7) exponiéndose a gases calientes, descargando el material a aproximadamente 75 °C. Cerca de 10,5% de la alimentación al secador sale como polvo. El secador reduce la humedad de la

mena de un máximo de 32% a 10%. Parte de la humedad está expresada en los análisis químicos de la tabla 2 (LOI 12% a 20%).



Figura 7. Secador rotatorio de la fundición de Onça-Puma.



Figura 8. Área de calcinación de la fundición de Onça Puma.

El material seco y los aglomerados se alimentan a un calcinador rotatorio (figura 8), siendo en una etapa inicial separados la humedad residual presente en ellos. A medida que el material laterítico atraviesa el calcinador, la estructura de las fases que componen los saprolitos se modifica, debida a las condiciones de reducción impuesta por el carbón reductor. La calcina se descarga a 950 °C como óxidos de NiO y Fe₂O₃, pudiendo ser formado también Ni metálico, FeO y Fe₃O₄, permitiendo la separación total de agua estructural de los compuestos.

En el proceso RKEF, la reducción se realiza en hornos eléctricos (figura 9), siendo la calcina fundida. Las reacciones de reducción

de NiO, Ni metal, Fe₂O₃, FeO, Fe metal se completan usando el carbón alimentado en el calcinador y el producto fundido. La escoria se remueve a 1.650 °C y el hierro-níquel a 1.550 °C. Los análisis químicos de la tabla 2, muestran tenores de Mg y Si que junto con el Fe y Ca, son los principales constituyentes de la escoria.

Las fases lateríticas muestran tenores menores de SO₃ (<0,045%), bien como PO₃ (<0,015%), (al margen de carbono y silicio), los cuales son refinados usando ollas de refinación. El producto final es un material granulado de Fe-Ni



Figura 9. Área de fundición de la empresa Onça-Puma.

5. Consideraciones finales

No hay duda que sobre los trópicos se encuentran los paisajes íntimamente relacionados con la formación de lateritos de níquel. Desde los años 80 existe una expansión en el conocimiento sobre los procesos de laterización, permitiendo la identificación en terrenos paleotropicales, estando muchos de ellos en América. En el Brasil se dio más énfasis al estudio de los depósitos de níquel a partir de los años 90', aportando con mayor conocimiento mineralógico.

En Bolivia se cuenta con condiciones climáticas tropicales conjugados con la complejidad de sus terrenos precambrianos, se han formado diversos depósitos lateríticos de níquel, que necesitan mayores estudios mineralógicos. El país representa una frontera importante para investigaciones en nuevos depósitos minerales no solamente de lateritos de níquel, sino también otros, en este siglo XXI.

El conocimiento de lateritos de níquel en la Amazonia Brasileña, de modo general, aún es bastante preliminar. Se hace necesario invertir en estudios básicos, para el desarrollo de una tecnología de prospección e investigación adaptada a la realidad regional, para tener mejor conocimiento de los recursos minerales. Aun así, los trabajos ejecutados en las últimas décadas ya dieron expresivos resultados sobre la riqueza del subsuelo. Algunos yacimientos de clase mundial ya

fueron dimensionados e indican que la Amazonia ocupará un lugar destacado en la producción del mineral níquel.

Existe también una preferencia por la exploración de reservas sulfuradas, esto se explica por el hecho de que este tipo de mena de níquel puede ser fácilmente concentrada y así usar procesos pirometalúrgicos para su extracción, ya que la mena laterítica necesita de procesos más complicados que involucran alto consumo de energía. Pero como de lejos las reservas son del tipo laterítico, este tipo de menas están siendo las más exploradas.

En el estudio realizado sobre níquel laterítico de Onça Puma, se sugiere que el níquel esté formando nuevas fases minerales, principalmente nepouita, pero también es posible que Mg esté siendo sustituido en la garnierita con infimas cantidades de níquel y hierro.

Referencias bibliográficas

1. CRUNDWELL, F.; MOATS, M.; RAMACHANDRAN, V.; ROBINSON, T.; DAVENPORT, W.G. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals*. Elsevier. 2011.
2. <http://www.nickelinstitute.org>. Nickel Institute. Acceso en 02 de febrero de 2016.
3. DIAZ, C. M.; LANDOLT, C. A.; DALVI, A. D.; BACON, W. G.; OSBORNE, R. C. "The past and the future of nickel laterite". En: *Prospectors and Developers Association of Canada International Convention*. Canadá: Trade Show & Investors Exchange, publications, p. 1-27, 2004.
4. MÄKINEN, T.; TASKINEN, P. "State of the art in nickel smelting: direct Outokumpu nickel technology". *Min. Process. Extract. Metall.* (Trans. Inst. Min. Metall. C), 117(2), p. 86-94, 2008.
5. ECKLEMAN, E. J. "Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of global nickel industry". *Resources, Conservation and Recycling*. 54(3), p. 256-266, 2010.
6. PARISER, H. H.; PARISER, G. C. "Changes in the Ferro Chrome & Ferro Nickel Markets". En: *The twelfth International Ferroalloys Congress Proceedings*. VARTIAINEN Ed. Helsinki, Finland: Outotec Oyj, p. 641-652, 2010.
7. JANWONG, A. "The agglomeration of nickel laterite ore". A dissertation submitted to the faculty of The University of Utah in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, Dezembro 2012.
8. OLIVEIRA, S. "Estágio atual do conhecimento acerca do Minério Laterítico de Níquel no Brasil e no mundo". *Revista IG*. São Paulo, 11(2), p. 49-57, jul./dez. 1990.
9. OLIVEIRA, S.; TRESCASES, J.; MELFI, A. "Lateritic nickel deposits of Brazil". *Mineralium Deposita*. 27(2). 1992.
10. MACAMBIRA, E. *Projeto platina e associados prospecção geológica e geoquímica no corpo máfico-ultramáfico da Serra da Onça-Pará, CPRM*. Informe de Recursos Minerais, Série Metais do Grupo da Platina e Associados, 26, 2001.
11. KOTSCHOUBEY, B.; HIERONYMUS, B.; ALBUQUERQUE, C. A. R. "Disrupted peridotites and basalts from the Neoproterozoic Araguaia belt northern Brazil): Remnants of a poorly evolved oceanic crust?". *Journal of South American Earth Sciences*. 20, p. 211-230, 2005.
12. COSTA, M. L. "Lateritos na Amazônia". *Revista Brasileira de Geociências*. 1991.
13. COSTA, M. L. "Introdução ao intemperismo laterítico e à lateritização". In: Licht et al. 2007.
14. TEIXEIRA W.; TOLEDO, M.C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. *Descifrando a Terra*. Ed. Oficina de Textos. SP., 2003.
15. FREYSSINET, PH.; BUTT, C. R. M.; MORRIS, R. C.; PIANTONE, P. "Ore-forming processes related to lateritic weathering". In: *Economic Geology*. J.W.HEDENQUIST, J.F.H THOMPSON, R.J. GOLDFARB & J.P.RICHARDS (Eds.). p. 681-722, 2005.
16. VIGNES, A. *Extractive Metallurgy*. Wiley, ISTE. Vol. 1,2,3, 2011.
17. DNPM 2008. *Níquel*. Cristina Silva. Departamento Nacional de Produção Mineral. 6º Distrito/GO. 130p. 2008.
18. MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. NÍQUEL. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=4183&refr=3257>> Acceso en: 22 de abril de 2015.
19. BUNJAKU. A. "The effect of mineralogy, sulphur, and reducing gases on the reducibility of saprolitic nickel ore". Aalto University School of Chemical Technology Department of Materials Science and Engineering Metallurgical thermodynamics and modelling, Aalto University publication series doctoral dissertations 18/2013.
20. SUPERIADI, A. "Processing Technology vs Nickel Laterite Ore Characteristic". Pt.Inco. Tbk., 2007.
21. VALE (Relatorio Vale 2011, <http://www.vale.com/pt-br/investidores/press-releases/Documents/PREPORT1T11p.pdf>). 2011.