

## **NUEVOS RESULTADOS GEOQUÍMICOS QUE CARACTERIZAN AL PERFIL DE ALTERACIÓN SAPROLÍTICO DEL YACIMIENTO DE NÍQUEL “SAN FELIPE”, CAMAGÜEY, CUBA**

**ALFONSO CHANG RODRÍGUEZ**

Empresa Geominera Camagüey,  
Carretera Central Este, Km 5½. Camagüey 70600, Cuba.

Correo: [alfonsochr@gmcmg.gms.minbas.cu](mailto:alfonsochr@gmcmg.gms.minbas.cu)

### **RESUMEN**

Partiendo de estudios avanzados en la mineralogía y geoquímica de las menas saprolíticas en el yacimiento San Felipe, mediante la difracción y fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido y microsonda, se ha podido realizar la caracterización geoquímica del perfil laterítico, objetivo principal de esta investigación. Además se ha establecido (novedad científica) el modelo de la migración geoquímica del níquel en el perfil arcilloso silicatado de este yacimiento.

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, hasta los minerales hipergénicos: óxidos, hidróxidos, esmectitas, minerales del grupo de la serpentina y, en menor grado, cloritas niquelíferas.

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, en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe es la nontronita, y representa alrededor del 80,0% en peso de las menas del horizonte.

Los valores más elevados de níquel (mayores de 13% Ni) fueron medidos en minerales de Fe no silicatados y en óxidos e hidróxidos de Mn. Altos valores de Ni y particularmente altos valores de cobalto fueron encontrados en asbolanas.

Los minerales silicatados de las rocas saprolíticas contienen cantidades variables de Ni. Los valores más altos se midieron en las esmectitas-cloritas (4-9%), esmectitas-nontronitas (0.4-3%) y serpentina (0.8-2%).

### **ABSTRACT**

Applying advanced DRX, FRX, SEM-EDAX techniques, as well as microprobe analysis of the saprolitic ores of the San Felipe deposit, the geochemical characterization of the lateritic profile was obtained. Moreover, the pattern of Ni migration from the rocks (olivine and pyroxenes minerals) into the weathered profile (oxides, hydroxides, smectites, and minerals of the serpentine group and, in lesser degree, Ni-chlorites) was established. It is shown the increases of Ni concentration toward the saprolitic beds as migration produces secondary enrichment zones of three groups of silicate minerals.

The dominant mineral in Ni-lateritic ores within the saprolitic layer of San Felipe is nontronite, which represents near 80 percent of weight. Higher Ni values (> 13%) were measured in Fe non-silicate mineral ores, and also in Mn oxides and hydroxides. High values of nickel, and particularly cobalt, were also found in asbolanes.

Contents of Ni in saprolitic silicate mineral ores are variable, with higher values in the smectites-chlorites (4% to 9%), smectites-nontronites (0.4% to 3%), and serpentines (0.8% to 2%).

## INTRODUCCIÓN

El estudio geoquímico de la corteza niquelífera, localizada 30 Kms. al noroeste del municipio Camagüey, constituye una necesaria e importante contribución al conocimiento de la composición sustancial de la materia prima mineral de la cual se extraerá el níquel, teniendo en cuenta que la industria niquelera es uno de los renglones principales de la economía cubana actual.

Se parte de la necesidad de caracterizar geoquímicamente el horizonte saprolítico (menas silicatadas) del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, con vista a una extracción de Ni más eficiente y sustentable de acuerdo a las condiciones actuales.

El objetivo fundamental del presente trabajo se enfoca en la caracterización geoquímica del perfil de alteración saprolítico del yacimiento San Felipe, contribuyendo a enriquecer el conocimiento sobre un tema de singular importancia para el procesamiento metalúrgico de los minerales arcillosos silicatados portadores de níquel.

Muñoz *et al.*, (2007) plantean que la migración geoquímica del níquel está sujeta al carácter geoquímico del metal en diferentes condiciones geotectónicas, a saber, magmáticas, hidrotermales y las vinculadas con los procesos 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 0,78Å, similar en longitud submicroscópica al magnesio divalente –  $Mg^{+2}$  – con radio atómico de 0,78Å, por tal razón la existencia de ambos elementos químicos se sustituyen mutuamente en las rocas del manto superior, lo que caracteriza su presencia 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.

Durante el proceso de formación de la corteza de meteorización niquelífera a partir de las rocas ultrabásicas algunos elementos químicos resultan fuertemente lixiviados y extraídos, manifestando una significativa migración acuosa, al tiempo que otros menos móviles se concentran notablemente. Dentro de los primeros se destacan el Si, Mg, Ca, Na y K, mientras que dentro de los segundos lo hacen el Fe, Al, Cr, Ti, Mn, Ni, Co, Cu, Zn. Hay que destacar que en los productos residuales de las lateritas niquelíferas ocurre una significativa concentración de prácticamente todos los elementos minoritarios presentes en las rocas ultrabásicas (micro elementos) independientemente de la capacidad de migración acuosa de los mismos en las condiciones hipergénicas.

En el presente trabajo se exponen las consideraciones del autor sobre la geoquímica del níquel y demás elementos en las condiciones supergénicas, en el ejemplo del yacimiento San Felipe.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Akkerman *et al.*, (2002) consideran que la mejor forma de clasificar el depósito es utilizando el contenido de MgO para identificar los diferentes tipos de materiales, teniendo en cuenta la variabilidad en los contenidos de Fe y  $Al_2O_3$  que podrían afectar dicha clasificación, por ser componentes que juegan un papel fundamental durante la etapa de recuperación metalúrgica del mineral.

Los tipos de material con base en los contenidos de MgO así definidos por Chang (2001) son:

- Sin MgO (<2% de MgO)
- Bajo MgO (entre 2-8 % de MgO)
- Medio MgO (entre 8-24 % de MgO)
- Alto MgO (>24% de MgO)

Para realizar el trabajo se contó con técnicas analíticas de avanzada como: difracción y fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica de barrido y microsonda electrónica.

Los principales procesos del intemperismo químico y sus efectos en las rocas ultramáficas son los siguientes:

Procesos generales	Efectos en las rocas ultramáficas
1. Lixiviación de los constituyentes móviles: álcalis, alcalinotérreos.	Descomposición del olivino, piroxeno, serpentina y lixiviación del Mg, Ni, Mn, Co.
2. Formación de minerales estables secundarios: óxidos de Fe y Al, arcillas.	Formación de goethita, nontronita, adsorción del Ni desde disoluciones.
3. Lixiviación parcial de componentes menos móviles: sílice, alúmina, Ti.	Lixiviación de sílice en climas húmedos.
4. Movilización y reprecipitación parcial de constituyentes controlados por reacciones de redox: Fe, Mn.	Precipitación de óxidos de Mn y adsorción de Ni y Co desde disoluciones.
5. Retención y concentración residual de minerales resistentes: zircón, cromita, cuarzo.	Concentración residual de cromita.

## DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y COMPOSICIONAL DEL PERFIL DE INTEMPERISMO

Partiendo del desarrollo descendente, debe tenerse en cuenta la formación de los horizontes del perfil de intemperismo por los siguientes aspectos principales:

1. Cada horizonte propio del perfil de intemperismo pasó al estadio mineralógico-geoquímico de su infrayacente.
2. A consecuencia de una cubierta potente, que limita los procesos de interacción con componentes agresivos, la descomposición química-mineralógica se efectuó bajo ambientes neutrales a débilmente ácidos, con procesos químicos de intemperismo muy lentos e incompletos, y no comparables con las condiciones de formación de lateritas en el Oligoceno, ya que la hidrólisis no alcanza todavía su estadio final.

Según Zimmermann (1983), la descripción litológica y composicional de aquel perfil se considera de suma importancia, ya que con el mismo se vincula el enriquecimiento del níquel.

**Serpentinita lixiviada.** La serpentinita lixiviada se encuentra sobre la serpentinita. La palabra proviene del término francés lixivación y significa el enriquecimiento de los elementos Fe y Al con la disolución y transportación de Mg y Si, por lo que no es similar a la serpentinita descompuesta, sino definida como horizonte de alteración composicional según lo antes mencionado.

La serpentinita lixiviada se formó bajo las condiciones de hidrólisis inicial condicionada por aguas ácidas, las cuales a pesar de haber atravesado toda la cubierta laterítica, todavía mantienen algo de su agresividad cuando contactan con sus componentes  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  la roca serpentinita en ambientes de pH desde 7.4-7.6, por lo que descomponen los minerales formadores de serpentinitas. A consecuencia de que el MgO después de descomponerse la serpentinita  $\text{Mg}^3(\text{OH})^4\text{Si}_2\text{O}_5$  se mantiene existente en forma de  $\text{Mg}^{2+}$ , su desviación muy grande y caracteriza la alteración geoquímica principal en esta zona de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mientras el FeO desciende por la descomposición de las estructuras silicatadas.

El MgO que subsiste en esta zona se vincula con la serpentinita de las partes rocosas menos afectadas o de los complejos minerales de grupos de montmorillonitas, que se forman primeramente aquí. La nontronita es el representante principal del grupo de las montmorillonitas en la altiplanicie. Así se postula el proceso de la nontronitización inicial en el horizonte mineral, que precipita alrededor de pH 7-8.

La presencia de la serpentinita lixiviada en el perfil no es permanente, se estima su representación en sólo el 80% del territorio, por lo que en algunas zonas, la descomposición descendente ya ha progresado hasta su alteración completa, condicionadas por las favorables condiciones de la migración cerca de zonas de fallas, entre otras.

Tanto la limitación de las ofiolitas hacia la infrayacente como la suprayacente muestran un carácter transicional, aunque la limitación hacia arriba se considera más difícil.

**Saprolita.** En la suprayacente continúa el horizonte de saprolitas, un material que se encuentra descompuesto por vía química pero no transportada, y así preserva las estructuras originales de la roca madre.

El proceso de la nontronitización llega a su punto final y alcanza el grado mayor de la descomposición mineralógica-geoquímica del material, antes de su oxidación fuerte.

En cuanto a la disolución del MgO se observa otra disminución considerable en comparación con el horizonte de serpentinita lixiviada, aunque con menos diferencia que en el límite de las capas anteriores.

El ambiente es de reducción todavía y aparece la formación de minerales de arcilla. Los valores de pH descienden lentamente, provocando primero precipitaciones de hidróxido de Fe, ligado a valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  más altos. También la presencia de clorita indica procesos intensos a formar nuevas estructuras mineralógicas que le otorgan la coloración verde a gran parte de este horizonte.

Índices de la influencia de factores de migración no sólo verticales, sino también horizontales, son los relictos o zonas de serpentinita lixiviada preservada en el mismo horizonte de saprolitas. Eso está condicionado por ambientes muy locales, como el desvío de aguas entradas por sistemas de fallas cercanas o la mayor resistencia del material serpentinitico en esa localidad (zona local de serpentinita menos tectonizada, compacta).

Adecuado a esto, la apariencia de intercalaciones aisladas propias de ocre texturales limoníticos dentro de la saprolita, demuestra la influencia variable de factores laterales, creando ambiente de oxidación en zonas muy locales y limitadas (suministro adicional de  $\text{O}_2$  por la mayor permeabilidad del material adyacente).

Se le distingue macroscópicamente de la serpentinita lixiviada por no presentar serpentinita fragmentada y el dominio de los componentes arcillosos, limosas y su coloración abigarrada.

**Ocres texturales limoníticos (OTL) (zona de transición).** En la suprayacente de la saprolita continúa el horizonte de los OTL. Esta capa en la literatura internacional se reporta muy pocas veces, indicando que se le encuentra muy raro en los perfiles del intemperismo.

La presencia de este horizonte se considera como desarrollo muy particular de la altiplanicie San Felipe. Es expresión del descenso paulatino de la superficie por la denudación, a consecuencia de eso, la zona de oxidación se desplaza por debajo. La misma saprolita sufre una oxidación con las siguientes consecuencias principales:

- Fuerte precipitación de hierro en forma de hidróxidos y óxidos aunque la misma no alcanza a crear un horizonte de ocres compactos. La precipitación en general se limita a las grietas y viejos canales anteriormente rellenados con serpentina.

- El ambiente todavía lo determina valor pH neutral hasta poco ácido, en el cual la porción de nontronita se mantiene en partes estables, solamente cambiando la coloración a causa de la precipitación más fuerte de  $\text{FeOH}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hasta rojo parduzco.

En el comportamiento de los elementos principales estos procesos se manifiestan por el ascenso considerable del Fe, mientras el MgO solamente hace observar descensos menores, por lo que se mantiene igual la composición arcillosa. Se supone que la goethita desplaza una gran parte de la clorita, así se convierte de modo paulatino, la saprolita en OTL.

Proceso muy lento a consecuencia del horizonte limonítico (ocres no texturales) ya existente, que evitan la hidrólisis final de la lateritización típica.

Además puede notarse regionalmente una interacción entre los óxidos e hidróxidos de hierro de los ocres y de las saprolitas. De modo tal, que durante un largo plazo pueden disolverse menores porciones de Fe procedentes de las partes inferiores de la capa suprayacente, volviendo a precipitar y a enriquecerse adicionalmente en la zona de las saprolitas infrayacentes. En las partes superiores de la capa pueden observarse raramente algunos perdigones redepositados de los ocres suprayacentes (descenso por vía de la gravedad).

La presencia de este horizonte a lo largo del corte en la altiplanicie San Felipe es permanente. El límite hacia la infrayacente es paulatino y no siempre exactamente determinable. Se observan en este sentido zonas de transición desde 10/20cm hasta 1m de espesor. Hacia la suprayacente este horizonte es bien limitable por criterios macroscópicos.

## MINERALOGÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA

### Asociaciones minerales de níquel y cobalto:

Los valores más elevados de níquel (mayores de 13% Ni) fueron medidos en minerales de Fe no silicatados, y en óxidos e hidróxidos de Mn. Altos valores de Ni y particularmente altos valores de Co fueron encontrados en asbolanas (Chang, 2009).

Los minerales silicatados de las rocas saprolíticas contienen cantidades variables de Ni. Los valores más altos se midieron en las esmectitas-cloritas (4-9%), esmectitas-nontronitas (0.4-3%) y serpentina (0.8-2%). El contenido de Ni en la chamosita es pobre (<0.8%).

En las características del yacimiento San Felipe, en general, se distingue una zonalidad mineralógica bien definida según los distintos horizontes del perfil laterítico. Tabla I. (Alliston *et al.*, 1999).

La composición química de los minerales del grupo de la serpentina y de las esmectitas determinada por análisis de microsonda electrónica se muestra resumidamente en las Tablas II y III.

Los resultados de análisis mineralógicos y químico completo realizados a una muestra compósita se resumen en las Tablas IV, V y VI.

## GEOQUÍMICA DEL PERFIL DE INTEMPERISMO EN SAN FELIPE

Distribución espacial y cuantificación de los elementos útiles y nocivos

### Ni y MgO

El valor medio de Ni para la corteza total (CT) es de 0.8%, mientras que para la corteza útil (CU) es de 1.3%. La relación contenido de Ni en CU / contenido de Ni en CT es de 1.62, lo que constituye una expresión de su mayor movilidad relativa respecto al Co y hierro durante el proceso de formación de la corteza.

Los mayores contenidos de Ni por grado y potencia se encuentran asociados a los materiales de bajo y medio MgO, representando aproximadamente el 93 % de la mineralización. Los mayores valores de Ni se distribuyen hacia el borde de la meseta, en una franja de

Tabla I. Composición mineralógica de la corteza de intemperismo San Felipe

Fase minerales	Contenido por horizonte (%)		
	Laterítico	Saprolítico	Serpentinítico
Goethita	37	10	3
Cromita	8	2	1
Magnetita	2	1	0.5
Hematita	3	1	-
Minerales de Mn	7	0.5	-
Gibbsita	5	1	-
Sílice libre	19	21	6
Esmectitas	15	51	12
Nepouita	-	4	2
Enstatita	-	1	3
Cloritas	2	4	3
Serpentina	2	5	69

Tabla II. Rangos de elementos en óxidos de la serpentina

Elementos	Serpentina
Óxidos	Rango
MgO	16-30%
FeO	10-25%
$\text{SiO}_2$	35-55%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0-4%
NiO	1-4%

Tabla III. Rangos de elementos en óxidos de las esmectitas

Elementos (Óxidos)	Clorita-esmectita	Fe-esmectita
MgO	10-25%	3-15%
FeO	5-15%	20-30%
$\text{SiO}_2$	30-50%	55-60%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	7-13%	0-5%
NiO	5-10%	1-4%

Tabla IV. Análisis mineralógico

Mineral, %	(1)	(2)
Crisotilo	0.07	-
Mica	0.09	-
Clorita	0.15	0.13
Sílice libre <sup>(1)</sup>	15.13	15.02
Óxido de hierro	17.91	10.09
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	5.65	5.27
Cromita (FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	1.71	1.24
Óxido de manganeso	0.71	1.95
Serpentina	10.09	8.22
Esmeclita	48.47	58.08

(1) ópalos, calcedonia, cuarzo y otros minerales de SiO<sub>2</sub>

Tabla V. Análisis granulométrico

% en peso	
Fración, [mm]	(2)
+ 10	11.10
-10 + 4.7	16.15
- 4.7 + 2.0	17.03
- 2.0 + 1.0	8.77
- 1.0 + 0.5	7.16
- 0.5 + 0.25	5.93
- 0.25 + 0.10	6.58
- 0.10 + 0.074	2.33
- 0.074	24.95

Referencias:

(1) Queensland Nickel Pty, compósito de 90 muestras de pozos de perforación.

(2) CIPIMM, compósito de muestras de 1 Pozo Criollo.

Tabla VI. Análisis químico completo

Elementos / compuestos	(2) %
SiO <sub>2</sub>	45.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.7
CaO	<0.17
CuO	6.4x10 <sup>-3</sup>
Zn	0.038
Ti	4.1x10 <sup>-3</sup>
Sn	3x10 <sup>-3</sup>
Mo	1.3x10 <sup>-3</sup>
Na <sub>2</sub> O	<0.30
K <sub>2</sub> O	<0.15
Cr	1.02
Mn	0.41
Pb	3.1x10 <sup>-3</sup>
As	2.5x10 <sup>-3</sup>
Cd	1.3x10 <sup>-3</sup>
Sb	2.5x10 <sup>-3</sup>
Se	3.4x10 <sup>-3</sup>
V	4.0x10 <sup>-3</sup>
CO <sub>3</sub>	-
C total	-
S	-
% humedad	39.6
LOI	15.5

aproximadamente 1Km de ancho, donde las zonas más ricas del depósito en ocasiones sobrepasan el 1.4% en contenido de Ni (Fig. 1).

Los contenidos de MgO como era de esperar, tienden a incrementarse en profundidad, comenzando en el tope con un contenido promedio en el escombro de 0.6%, en la zona de bajo MgO de 4.5%, en la de medio 14.7 % y finalmente la de alto con un 27% aproximadamente (Fig. 2).

Se presentan algunas excepciones en la tendencia normal de variación en los contenidos de Ni y MgO en algunas partes de la meseta especialmente hacia el centro, debido a la presencia de sílice que disminuye los contenidos de MgO, Ni y otros. Evidencias de campo indican que aquellos sitios con abundante sílice libre en el centro de la meseta, están ubicados en zonas saturadas de

agua durante casi todo el año, lo que ocasiona estancamientos permanentes, ambiente óptimo para la acumulación de SiO<sub>2</sub>, (Formell *et al.*, 2003).

Por otra parte la distribución del MgO a lo largo del perfil no es del todo regular y se han identificado intercalaciones de medio MgO (bloques colgantes) embebidos en bajo MgO. Donde las arcillas probablemente han actuado como trampas que inhiben la migración de fluidos y la destrucción intensa de la roca.

En algunos lugares el material sin MgO aparece intercalado entre otros materiales sin ninguna relacionan con el escombro superior. Probablemente son zonas afectadas por alta oxidación, producto de soluciones ricas en hierro que migran de manera subterránea. Estas zonas oxidadas tienen usualmente de 1-3 m de ancho y siempre son pobres en Ni.



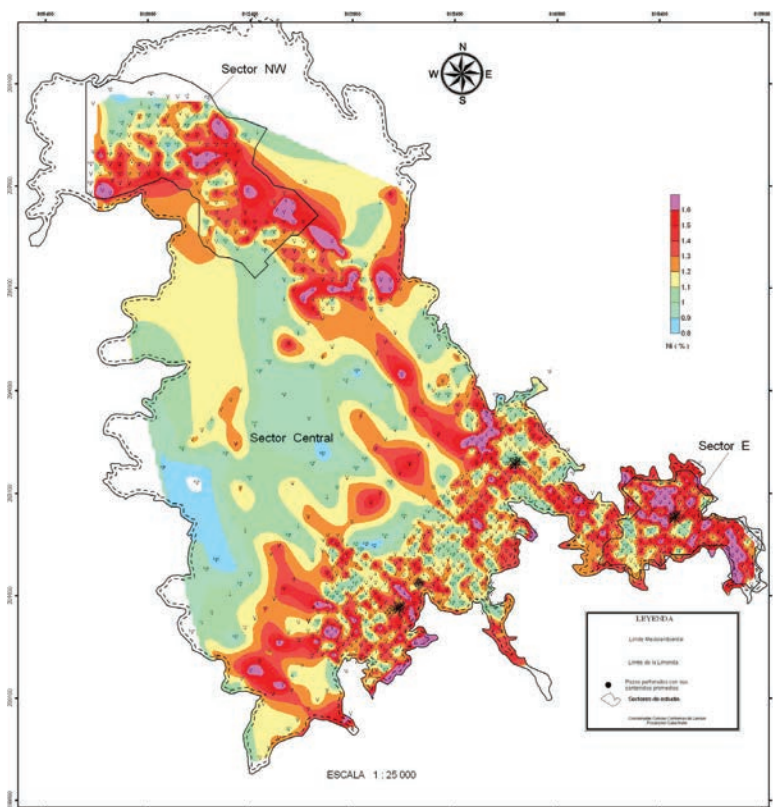


Figura 1. Mapa geoquímico de distribución del Ni en la capa útil del yacimiento San Felipe

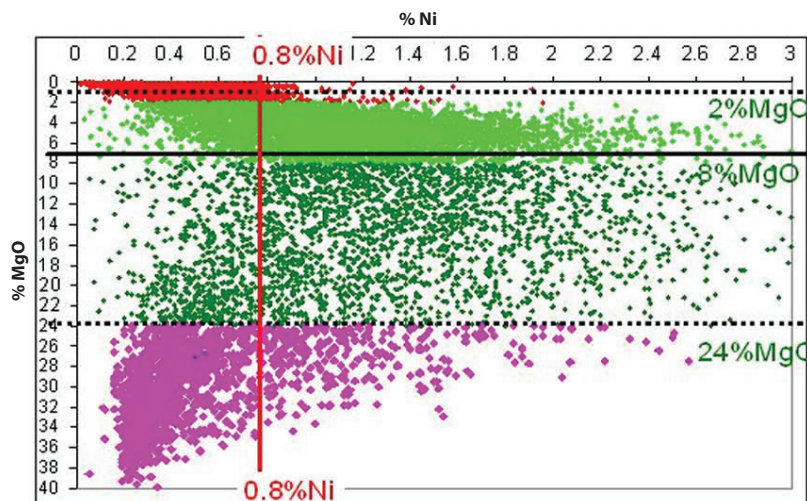


Figura 2. Gráfico de ploteo del MgO vs. Ni

Tabla VII. Estadística del Fe y Co según los tipos de MgO

Tipos MgO	Hierro			Cobalto		
	Min	Max	Prom.	Min	Max	Prom.
Sin	3.3	52.2	32.2	0.001	0.700	0.048
Bajo	0.5	44.0	21.4	0.030	0.636	0.057
Medio	0.6	30.8	13.9	0.002	0.227	0.032
Alto	2.4	15.3	8.6	0.002	0.043	0.016

## Fe y Co

El cobalto muestra un cuadro similar comparado con el Ni. Los valores más elevados son encontrados un poco más arriba en el perfil, en la parte baja de la zona limonítica debido a su menor solubilidad bajo condiciones ácidas. (Tabla VII y Fig. 3).

Las zonas oxidadas aparecen dispersas por toda la meseta, manifestando una tendencia a desarrollarse hacia lugares de descarga del flujo acuífero, que posiblemente están relacionados con las principales estructuras tectónicas.

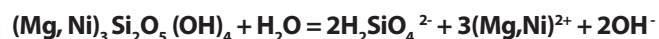
## DISCUSIÓN

### Origen y génesis del enriquecimiento de Ni en el perfil de intemperismo

El comportamiento de Ni en el proceso del intemperismo está determinado por dos propiedades principales.

1. Solubilidad de  $\text{Ni}^{2+}$  en soluciones de agua, su migración y precipitación.
2. Habilidad de sustituir elementos (ejem. el Mg), en complejos mineralógicos a formar minerales propios, o quedar en vez del  $\text{Mg}^{2+}$  en la red de minerales de arcilla.

El primer proceso químico que trae consigo un enriquecimiento relativo de Ni es la lixiviación de la serpentinita.



Ahora el  $\text{Ni}^{2+}$  con un radio de  $0.69 \text{ \AA}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  con radio de  $0.68 \text{ \AA}$ , se encuentra disuelto. Aunque debe considerarse que el Ni todavía se queda en su mayor parte durante el proceso de la lixiviación dentro de la misma serpentinita, en la cual puede enriquecerse hasta 2.0%. El níquel se precipita en ambiente con  $\text{pH}=6.6-7.0$ , por lo cual se explica la habilidad de la migración limitada del níquel a partir de este horizonte en solución. Su transporte se realiza en forma de bicarbonato  $\text{Ni} (\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ . Partimos de la cuestión que la mayoría del níquel de las serpentinitas lixiviadas se quedan enriquecidas de modo residual, mientras pocas cantidades se encuentran en las nontronitas y migrando en aguas subterráneas.



Al continuar el proceso de la descomposición, encontramos en la saprolita, la mayor parte de nontronita, la más importante portadora de Ni en la altiplanicie San Felipe. El níquel debe estar incorporado a la red atómica de estos materiales, en cantidades más altas que en la serpentinita. Disminuciones de contenido de Ni que ocurren a veces en las saprolitas, debían haber sido originada parcialmente por las intercalaciones de serpentinita lixiviada.

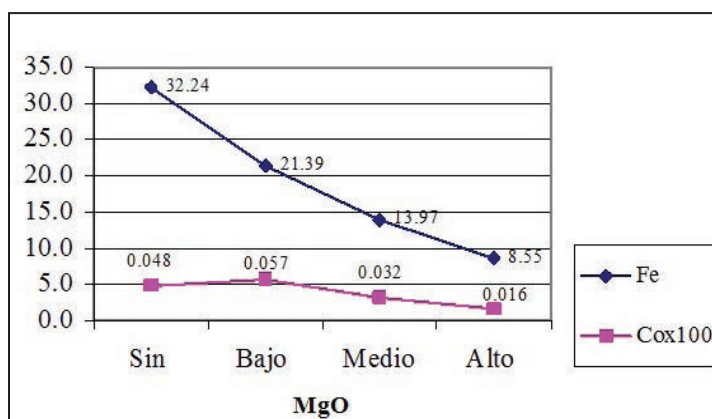
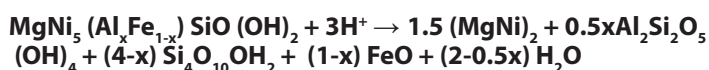
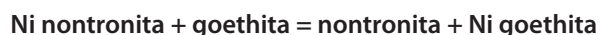


Figura 3. Comparación entre el comportamiento del Fe y el Co en el perfil de intemperismo

Al bajar el nivel de oxidación y formarse los ocreos texturales limoníticos, el valor pH en la altiplanicie no debe disminuir considerablemente. Sin embargo paulatinamente las montmorillonitas pierden su estabilidad descomponiéndose en hidróxidos de hierro y sílices, proceso en el cual el  $\text{Ni}^{2+}$  vuelve a disolverse según:



La parte de Ni liberado en este proceso, se queda vinculada de modo adsorbtivo en la goethita. Conviene mencionar que estas reacciones sólo tienen lugar si se mantiene estrictamente el equilibrio químico según:



A consecuencia de los resultados mineralógicos semicuantitativos se considera que en la mayor parte de los OTL, en la altiplanicie San Felipe, la clorita ha sido desplazada por el Fe, por lo que este disminuye su presencia en este horizonte a causa de la goethita. Menores cantidades de  $\text{Ni}^{2+}$  también pueden quedarse en solución corto tiempo, precipitándose en la saprolita, posiblemente condicionado por la influencia lateral de ambiente geoquímico, y la alternancia de períodos secos y lluviosos.

Otro aspecto que determina considerablemente la niqueliferación de dicho horizonte es la hidrólisis final, es decir, la descomposición completa de los componentes de la arcilla y la formación de caolinita y hematita, las cuales no incorporan el Ni. En este caso el horizonte saprolítico encuentra en bandas y manchas hasta relaciones de limonita y hematita, y con concentraciones de Ni < 0.8%.

Se puede afirmar que el manto saprolítico, que recubre a la harzburgita serpentinitica de San Felipe, es producto de un proceso de alteración superficial, activo bajo determinadas condiciones climáticas y topográficas. Los cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas de infiltración, alteran gradual y progresivamente a la roca,

predominando la acción geoquímica de disolución o ataque sobre la mecánica de erosión. Las aguas se infiltran por las fisuras o diaclasas producidas por efecto de los esfuerzos dinámicos, posiblemente durante el emplazamiento de la masa peridotítica, y ponen rápidamente en solución a los silicatos de magnesio y hierro anhidros. En esta etapa de alteración, la harzburgita serpentinitica tiene aproximadamente su estructura primitiva: lamelas de hidratos de hierro y de sílice residual.

Durante el proceso, la harzburgita serpentinitica adquiere un mayor grado de porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración y circulación de las aguas de infiltración y el ataque continuo a la peridotita fresca por reacciones geoquímicas. Se produce también la eliminación de los productos en solución durante algún tiempo después del período de lluvias intensas.

Al observar la masa saprolítica, se aprecia en la mayoría de los casos que la serpentinita alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie, a la vez que se produce el enriquecimiento en níquel; luego se observa un brusco empobrecimiento en níquel y magnesio, y enriquecimiento en hierro y cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en níquel de las enriquecidas en hierro generalmente es pronunciado. Se manifiesta en un cambio de color que se convierte en marrón oscuro al pasar de la saprolita terrosa mineralizada a la limonita.

El espesor de la saprolita representa el residuo insoluble de la masa de harzburgita infrayacente, de la cual teóricamente se ha liberado una cantidad de níquel, que puede concentrarse debajo de la saprolita o en sus cercanías. En contraste, las saprolitas que han sufrido transporte no proporcionan indicación alguna sobre la roca madre, ni sobre las eventuales concentraciones niquelíferas.

Las menas niquelíferas contienen proporciones variables de magnesio y níquel bajo la forma de esmectitas. Mineralógicamente, son nontronitas en las cuales el níquel reemplaza al magnesio en proporciones variables.

Según las investigaciones realizadas por Chang (2005) en San Felipe, la mineralización de níquel puede ser dividida en tres fases:

1. Mineralización inicial de la serpentinita lixiviada.
2. Enriquecimiento *in situ* de níquel en la saprolita por migración de otros elementos.
3. Concentración de níquel por migración descendente.

La primera fase comprende la serpentinitización de la harzburgita, variable según el grado de hidratación de los silicatos anhidros, originada por metamorfismo regional o hidrotermal mediante la impregnación permanente por aguas superficiales. Su tenor es el inicial de la roca madre, constante en el orden de 0.25% de níquel.

La segunda fase se produce en la saprolita, en la cual no ha habido pérdida de níquel durante la fase inicial. El enriquecimiento proviene de la pérdida más o menos total de sílice y magnesio que puede representar más del 75% de la composición de la

roca madre. El níquel se encuentra difuso en la masa saprolítica y sólo se evidencia en los análisis químicos; la mineralización contribuye a la concentración posterior que se produce en la tercera fase.

La tercera fase es la más compleja e importante. Es el límite frecuentemente brusco en el cuerpo laterítico entre la saprolita con mineralización niquelífera y la limonita. Este límite avanza progresivamente en sentido descendente a medida que se incorporan el magnesio y la sílice, combinados restantes en las saprolitas y la casi totalidad del níquel. El espesor de la limonita residual ferruginosa aumenta gradualmente.

Las aguas superficiales que se infiltran, probablemente ácidas, atraviesan la limonita porosa y se mantienen durante algún tiempo en la porción inferior plástica de esta zona. Estas ponen a los minerales que se encuentran en la saprolita en soluciones que pueden precipitarse al descender, constituyendo entonces las concentraciones explotables de níquel, o que también pueden ser arrastradas en solución.

Para que el proceso de concentración niquelífera se lleve a cabo se requieren de condiciones complementarias tales como:

- Libre circulación de las soluciones niquelíferas, ya sea en sentido vertical o en un plano más o menos inclinado sobre la horizontal a algunos metros de profundidad.
- Existencia de espacios en la zona de la saprolita alterada (poros, cavidades, diaclasas, fisuras) en las cuales quede retenido el mineral.
- Tiempo suficiente como para que se acumulen concentraciones de níquel provenientes de soluciones con tenores mínimos, durante el cual las condiciones del medio no sean afectadas por la erosión. Influye igualmente la periodicidad de la circulación de las aguas, la disolución del níquel al comienzo de las estaciones de lluvia y la concentración/saturación de soluciones durante las estaciones secas.

Las condiciones descritas constituyen solo una parte de los factores que influyen la mineralización niquelífera explotable; otros factores incluyen la acción de catalizadores naturales, acción geoquímica, variaciones del pH, etc.

Después del eventual relleno de los espacios disponibles (poros y cavidades) las soluciones niquelíferas circularían a modo de aguas subterráneas sobre la superficie impermeable de la harzburgita serpentizada, situada a cierta profundidad y deslizándose entre los bloques de peridotita y ciertas zonas serpentinosas impermeables. El níquel se concentraría únicamente al hallar las condiciones favorables para su precipitación en este proceso y a cierta profundidad, ya que estos precipitados no son estables ni insolubles si no están protegidos por una capa o recubrimiento laterítico.

## CONCLUSIONES

1. El depósito de saprolitas niquelíferas de San Felipe se clasifica dentro del perfil laterítico tipo arcilloso silicatado.
2. Se demuestra que el olivino es el mineral primario portador del Ni en la corteza de intemperismo y es la fuente primaria de la migración geoquímica del metal.
3. En el yacimiento se presentan todos los horizontes del perfil laterítico con un marcado predominio del tipo laterítico-saprolítico.
4. Los resultados de química mineral indican que la fase principal portadora de Ni, en el horizonte saprolítico de San Felipe, es la nontronita, representando alrededor del 80% en peso de las menas del horizonte.
5. Queda demostrado que el incremento del níquel hacia la zona de las saprolitas está condicionado por la migración del mismo desde los horizontes superiores, produciéndose un enriquecimiento secundario.

## BIBLIOGRAFIA

- Akkerman, J., C. Rodríguez, C. Rivers, A. Chang, 2002. *Reporte Final de la fase de Estudio Conceptual del yacimiento San Felipe*. San Felipe Mining Limited: 208p. (Inédito)
- Alliston, R., B. England, P. Shrestha, 1999. *Mineralogical Investigation of San Felipe Laterites*. Australia: Newcastle Technology Centre: 19p. (Inédito)
- Chang, A., 2001. *Reports on Distribution of Elements, geological controls, tectonics and morphology of San Felipe Plateau*. San Felipe Mining Limited: 47p.
- Chang, A., 2005. *Caracterización geólogo-geoquímica y mineralógica del yacimiento de lateritas niquelíferas San Felipe, provincia Camagüey*. Memorias, Trabajos y Resúmenes. I Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.
- Chang, A., 2009. *Principales fases minerales portadoras de níquel presentes en las menas silicatadas del yacimiento de lateritas San Felipe, Camagüey, Cuba*. Memorias, Trabajos y Resúmenes. III Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.
- Formell, F., 2003. *Diferencias en el desarrollo morfoestructural de las regiones metalogénicas exógenas de Oriente Septentrional y Camagüey Central y su influencia en la formación de las cortezas de intemperismo niquelíferas*, Taller Internacional de la Geología y Minería del Níquel Cubano, TGMNI 02, Memorias, Trabajos y Resúmenes. V Congreso Cubano de Geología y Minería, La Habana, Cuba.
- Muñoz Gómez, J. N. et. al., 2007. *La migración geoquímica del níquel en las cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas: implicaciones en la exploración de explotación*. Memorias, Trabajos y Resúmenes. II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, La Habana, Cuba.
- Zimmermann, A., 1983. *Lateritas ferroniquelíferas de la altiplanicie San Felipe*. Empresa Geominera Camagüey: 56p. (Inédito)