

## Movilidad geoquímica y grado de meteorización del yacimiento San Felipe, Camagüey Cuba

### Geochemical mobility and weathering degree of San Felipe deposit in Camagüey, Cuba

Alfonso Chang-Rodríguez<sup>1</sup>, Arturo L. Rojas-Purón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Empresa Geominera Camagüey, Cuba.

<sup>2</sup>Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

---

#### Resumen

San Felipe es un yacimiento residual de corteza de intemperismo distintivo por su alto contenido de sílice. El propósito de este trabajo fue determinar los índices de intemperismo y los coeficientes de movilidad geoquímica en la corteza de meteorización. Utilizando los coeficientes de meteorización de Ginsburg (1946) y Rudnik (1966) se calculó la acumulación y extracción de los principales componentes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El análisis de los índices de intemperismo y del grado de acumulación-extracción absoluto permitió evaluar la movilidad, distribución y concentración de los elementos y esclarecer el mecanismo de migración y evacuación del níquel. El balance de masas reveló cómo ocurre la reducción de los componentes más móviles (magnesio, sílice) y el aumento de los acumulativos (hierro, aluminio) hacia arriba en el perfil, evidenciando que el contenido de sílice supera los valores atribuibles a un proceso de meteorización.

**Palabras clave:** grado de meteorización; índice de intemperismo; lateritas; movilidad geoquímica; níquel; sílice; depósito San Felipe.

## **Abstract**

San Felipe is a distinctive residual deposit of crust weathering due to its high silica content. Determining the weathering indexes and the coefficients of geochemical mobility in the weathering crust was the aim of this work. The accumulation and extraction of the main components ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) was calculated by using the weathering coefficients of Ginsburg (1946) and Rudnik (1966). The weathering indexes analysis and the extraction-accumulation degree allowed to evaluate the mobility, concentration, and distribution of the elements and clarifying the mechanism of migration and evacuating of nickel. The mass balance showed how the reduction of the most movable components (magnesium, silica) and the increase of the cumulative (iron, aluminum) occurs, showing that the silica content exceeds the attributable values to a process of weathering.

**Keywords:** degree of weathering; weathering index; laterites; geochemical mobility; nickel; silica; San Felipe deposit.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

El comportamiento de los elementos químicos en las cortezas de meteorización se determina, en lo fundamental, por tres factores: sus propiedades químicas (condiciones de acidez-alcalinidad y redox), el tipo de paisaje geoquímico y la composición mineralógica de las rocas primarias. Perelman (1972) determinó las series de las intensidades de extracción de los elementos químicos de las cortezas de meteorización atendiendo a sus intensidades de migración en medio acuoso, de acuerdo con las magnitudes de los coeficientes de migración acuosa. Como tendencia general, en el transcurso de la formación de las cortezas de meteorización se pone de manifiesto la extracción de los elementos más móviles (sílice, magnesio) y el consiguiente enriquecimiento relativo en ellas de los elementos menos móviles, particularmente aluminio y hierro.

Muñoz-Gómez, Rojas-Purón y Díaz (2007) plantean que la movilidad geoquímica del níquel está condicionada por el carácter geoquímico del metal en diferentes condiciones: geotectónicas, magmáticas, hidrotermales y las vinculadas con las condiciones exógenas imperantes durante el intemperismo de las ultramafitas serpentinizadas. Ginsburg (1946) reconoce cuatro zonas geoquímicas: hidrólisis final; hidrólisis parcial y lixiviación final; hidratación e hidrólisis inicial; hidratación inicial y lixiviación de la roca madre agrietada. De modo que la formación de cada una de estas zonas implica la disolución de los macrocomponentes (principalmente

SiO<sub>2</sub>, MgO, parcialmente FeO) en la roca a partir del proceso de hidratación inicial, donde el Ni<sup>2+</sup>, entre otros, puede migrar progresivamente y ser sorcionado durante la hidrólisis y formación de nuevos minerales, hasta la hidrólisis final en los óxidos de Fe (particularmente goethita) en los estadios finales del intemperismo.

Sobre el control litológico-mineralógico de la mineralización de las cortezas de intemperismo sobre ultramafitas en la región de Moa, Lavaut-Copa (1987) declara la influencia del tipo de roca subyacente en la formación de un determinado perfil de alteración intempérica, estableciendo determinadas asociaciones de minerales para cada perfil.

Para caracterizar los tipos de perfiles de meteorización del yacimiento San Felipe es posible aplicar la clasificación de Lavaut-Copa (1998). Aunque debe tenerse en cuenta que las clasificaciones por criterios geoquímicos y mineralógicos conducen a una agrupación que no siempre coincide con los límites de la zonalidad litológica natural visualmente observable en el terreno, por lo que resulta necesario investigaciones analíticas complejas realizadas a escala de laboratorio (Lavaut-Copa 2004).

Proenza-Fernández (2015) y Bucher, Stober y Muller (2015) reconocen la zonalidad geoquímica vertical que presentan los perfiles lateríticos mediante la aparición secuencial de la asociación de minerales, desde la roca madre hasta las zonas superiores del perfil de alteración.

Entre los años 1998 y 2004 en la corteza de intemperismo de la meseta San Felipe se realizaron los trabajos de prospección para níquel por parte de la Asociación Económica Internacional Geominera S.A. & San Felipe Mining Ltd., que consistieron en la perforación de pozos en las redes de 1 000x1 000 m y 500x200 m. En los sectores más prospectivos se densificó en redes de 200x200 m y pasando a exploración 100x100 m. Además, se realizaron laboreos mineros (cinco pozos criollos y un tajo minero) que permitieron realizar investigaciones tecnológicas para la caracterización metalúrgica de las menas.

A partir de 2013 se revelan con mayor precisión los aspectos geoquímicos de los perfiles saprolíticos del yacimiento San Felipe (Chang-Rodríguez 2013); además se establecen las fases minerales portadoras de níquel en sus horizontes saprolíticos (Chang-Rodríguez y Rojas-Purón 2015), y se llega a caracterizar geoquímicamente este depósito laterítico de níquel (Chang-Rodríguez *et al.* 2015, 2016 y Chang-Rodríguez 2016).

Trabajos relacionados con la movilidad geoquímica y el grado de meteorización de la corteza de intemperismo del yacimiento San Felipe son escasos y caen en el campo de las investigaciones especializadas; no obstante constituye una de las tareas pendientes, pues sus resultados pueden ser aplicados en varios campos, desde la extracción minera del material saprolítico-laterítico hasta la obtención de un producto tecnológico más rico en Ni, sin excluir el análisis de su comportamiento en los procesos geológicos.

El objetivo fundamental del presente trabajo fue esclarecer la movilidad geoquímica de los principales componentes y el grado de intemperismo del yacimiento San Felipe.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente estudio se valoraron 1 700 sondeos, con un total de 38 000 muestras de pozos de perforación (Figura 1) pertenecientes al yacimiento San Felipe (Chang-Rodríguez 2016).

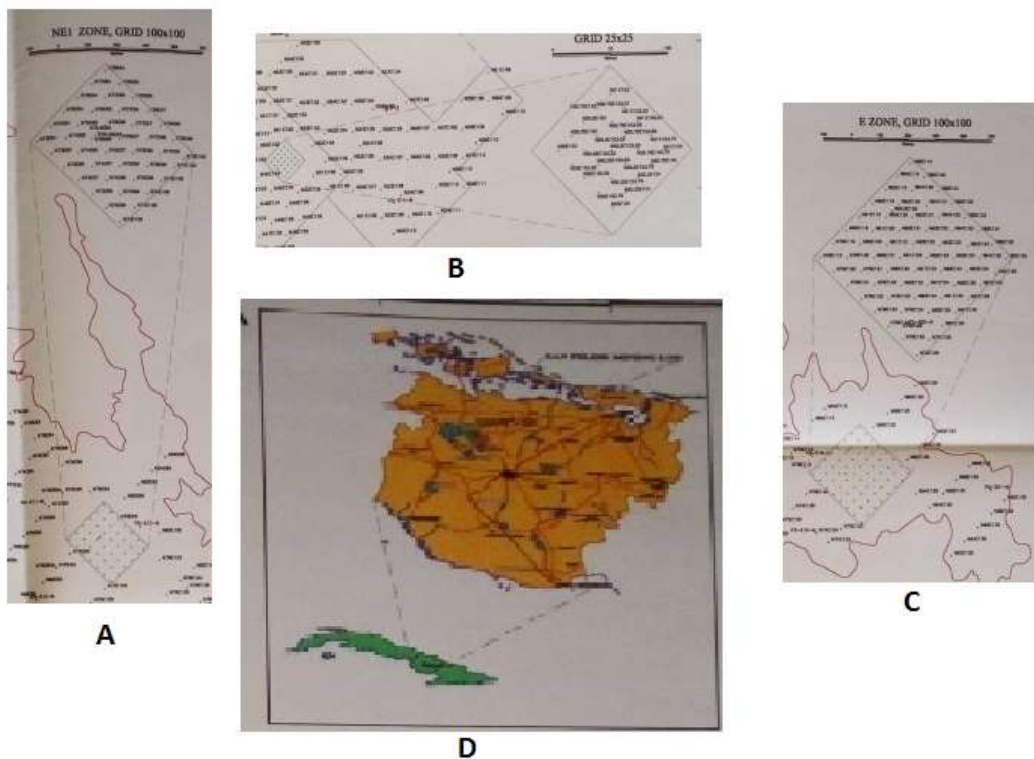


Figura 1. Esquema de localización geográfica (D) del yacimiento San Felipe y ubicación de los pozos muestreados, A: sector nordeste, B: sector central, sector este. Tomado de San Felipe Mining Ltd (2004).

Se aplicó la toma de muestra puntual siguiendo los horizontes y terminología utilizada por Formell-Cortina y otros investigadores (1998) para estos perfiles lateríticos (Figura 2).

| Prof. (m) |  | Zona geoquímica  | Código |
|-----------|--|--|--------|
| 0-1 m     | <b>L<br/>A<br/>T<br/>E<br/>R<br/>I<br/>T<br/>A<br/>S</b>       | ± Ferricreta (Coraza Fe/Si) 1 m potencia                   | 1      |
| 5 m       |  | Ocres no texturales con perdigones ± Coraza (4 m potencia) | 2      |
| 7 m       |  | Ocres no texturales sin perdigones (2 m potencia)          | 3      |
| 8 m       | <b>S<br/>A<br/>P<br/>R<br/>O<br/>L<br/>I<br/>T<br/>A<br/>S</b> | Ocres texturales lateríticos (1 m potencia)                | 4      |
| 17 m      |  | Ocres texturales nontroníticos (~9 m potencia)             | 5      |
| 21 m      |  | Serpentinitas nontronitizadas (~4 m potencia)              | 6      |
| 22 m      |  | Serpentinitas lixiviadas (1 m potencia)                    | 7      |
| >22 m     | <b>B<br/>A<br/>S<br/>E</b>                                     | Peridotita (harzburgita) serpentinizada                    | 8      |

Figura 2. Esquema del perfil laterítico del yacimiento San Felipe utilizada por Formell-Cortina y otros investigadores (1998).

Se realizaron las determinaciones de Ni, Fe, Co, CaO, K<sub>2</sub>O, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub> y Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> empleando espectroscopía de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS en inglés) en el laboratorio acreditado Elio Trincado de la Empresa Geominera Oriente.

Los valores del peso volumétrico se tomaron de los informes geológicos y estimaciones de recursos realizados por la compañía San Felipe Mining Ltd.

## 2.1. Procedimientos para el cálculo de los coeficientes de meteorización y movilidad geoquímica

Para conocer el grado de descomposición de las rocas primarias, o grado de meteorización de la corteza de intemperismo, en el yacimiento San Felipe se calcularon los coeficientes de meteorización aplicando las fórmulas de Ginsburg (1946). Los coeficientes de acumulación y extracción absolutas de los componentes se obtuvieron por la fórmula propuesta por Rudnik (1966). La determinación del grado de meteorización fue realizada de acuerdo a lo planteado por Brimhall y Dietrich (1987).

Las fórmulas matemáticas según Ginsburg (1946), son las siguientes:

$\text{SiO}_2 / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O})$  - lixiviación;

$\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3$  - siferritización;

$\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{MgO}$  - desintegración;

$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  - sialitización;

$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ inicial}$  - alitización;

$\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ inicial}$  - ferritización;

$\text{NiO} / \text{NiO} \text{ inicial}$  y  $\text{CoO} / \text{CoO} \text{ inicial}$  - mineralización.

El coeficiente de movilidad geoquímica relativa es una ecuación que, sobre la base de los análisis químicos, permite cuantificar la cantidad del componente que se lixivia o concentra, teniendo en cuenta los pesos volumétricos y asentamientos de los productos del intemperismo, en porcentajes de la cantidad absoluta de este componente en la zona inicial.

Fórmula propuesta por Rudnik (1966):

$$K_p = \frac{\Delta P \cdot 100\%}{N} - \text{coeficiente de movilidad geoquímica}$$

$$N = \frac{P \cdot d}{100\%}$$

$P$  – contenido de los óxidos en % en peso,

$N$  – concentración de los óxidos en  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,

$d$  – peso volumétrico de las rocas que componen el horizonte en  $\text{g/cm}^3$ ,

$$\Delta P = \left( \frac{C_0}{C_k} P_k - P \right) \frac{d_0}{100} - \text{acumulación y extracción absolutas de los componentes en } \text{g/cm}^3,$$

$P_0$  – contenido en la zona en % en peso,

$P_k$  – contenido en la zona siguiente en % en peso,

$C_0$  – contenido del componente inerte ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) en la zona en % en peso,

$C_k$  – contenido del componente inerte ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) en la zona siguiente en % en peso,

$d_0$  – peso volumétrico de las rocas en la zona inicial en  $\text{g/cm}^3$ .

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Coeficientes de intemperismo y movilidad geoquímica**

La corteza de intemperismo del yacimiento San Felipe presenta una zona silicatada con un bajo grado de lixiviación, reflejado por un coeficiente de lixiviación que oscila entre 1,3 y 3,2 (Tabla 1). En el horizonte de ocres nontroníticos este coeficiente alcanza valores de 10,2 y se incrementa significativamente hacia la parte superior del perfil, llegando hasta 75,2 en la coraza ferruginosa. Ello es indicativo de que la intemperización de las serpentinitas tuvo condiciones favorables en la etapa inicial de desarrollo de la corteza; luego de la formación del material ocroso, al parecer, cesó o disminuyó notablemente la alteración de los minerales silicatados, en tanto continuó la lateritización del material ocroso ya formado, lo cual explica los muy bajos valores del coeficiente de desintegración para la zona serpentinizada (1,3 a 6,5) y los altos valores desde el horizonte de ocres nontronizados (28,9, casi 30 veces superior) hasta el horizonte de coraza.

Los procesos de ferritización y alitización a través del perfil en San Felipe siguieron una tendencia normal respecto a la concentración del aluminio y el hierro en la parte superior. Sin embargo, son significativos los valores de la sialitización en la zona de ocres, donde varían desde 4,9 en los ocres laterítico hasta 1,6 en la coraza ferruginosa, resultando altos para los horizontes de los estadios finales del intemperismo, lo que conduce a pensar en un proceso de enriquecimiento de sílice independiente al proceso de intemperismo, lo cual deberá ser estudiado pues aún no existe una explicación satisfactoria a este fenómeno.

Tabla 1. Índices de intemperismo en la corteza de meteorización de San Felipe

| Zona                               | Lixiviación | Siferritización | Desintegración | Sialitización | Alitización | Ferritización | Mineralización Ni | Mineralización Co |
|------------------------------------|-------------|-----------------|----------------|---------------|-------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Coraza ferruginosa                 | 75,2        | 0,4             | 259            | 1,6           | 9,2         | 5,8           | 1,1               | 1,5               |
| Ocres no texturales con perdigones | 39,2        | 0,5             | 105,6          | 2,0           | 8,4         | 5,9           | 1,4               | 2,0               |
| Ocres no texturales sin perdigones | 31,8        | 0,7             | 53,7           | 3,3           | 7,4         | 5,4           | 1,7               | 2,5               |
| Ocres texturales lateríticos       | 25,3        | 1,0             | 28,9           | 4,9           | 5,9         | 4,5           | 2,8               | 4,5               |
| Ocres texturales nontroníticos     | 10,2        | 1,7             | 6,5            | 10,6          | 3,3         | 3,3           | 4,0               | 4,0               |
| Serpentinitas nontronitizadas      | 3,2         | 2,4             | 1,3            | 14,5          | 2,2         | 2,4           | 4,4               | 2,0               |
| Serpentinitas lixiviadas           | 1,6         | 3,7             | 0,4            | 22,5          | 1,3         | 1,4           | 2,1               | 1,5               |
| Serpentinitas descompuestas        | 1,3         | 4,8             | 0,2            | 30,7          | 1,0         | 1,0           | 1,0               | 1,0               |

En San Felipe, la zona menífera para el Ni se localiza en las serpentinitas y ocres nontronizados, donde llega a alcanzar hasta 4,4 veces su valor en las serpentinitas descompuestas, mientras el Co se concentra, con un incremento también de 4,5 veces su valor inicial, en la zona laterítica intermedia.

Los valores de la acumulación y extracción de los principales componentes (Si, Mg, Fe, Al, Mn, Ni, Co, Ti y Cr) en el perfil de meteorización del yacimiento niquelífero San Felipe (Tabla 2) reflejan la lixiviación del MgO, y parcialmente del SiO<sub>2</sub>, hacia los horizontes superiores, y una marcada tendencia de concentración del Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Llama la atención el hecho de que la parte superior de la corteza de este yacimiento es una típica coraza ferruginosa constituida básicamente por sílice y óxidos de Fe.

El TiO<sub>2</sub> tiene un comportamiento prácticamente inerte a través de todo el perfil, en tanto el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muestra una clara tendencia de concentración a partir de los ocres lateríticos hasta la coraza ferruginosa.



Tabla 2. Grado de extracción y acumulación absolutas de los componentes en la corteza de meteorización de San Felipe

| Zona del perfil  | Componentes químicos |                  |                                |                                |        |         |        |        |                                |                  |          |
|--|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|---------|--------|--------|--------------------------------|------------------|----------|
|  |                      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO    | MnO     | MgO    | NiO    | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CoO      |
| Coraza ferruginosa (d=1,46 g/cm <sup>3</sup> )                 | P*                   | 20,3             | 12,90                          | 51,80                          | -      | 0,390   | 0,200  | 0,390  | 1,900                          | 0,0800           | 0,0300   |
|  | N                    | 0,30             | 0,190                          | 0,760                          | -      | 0,006   | 0,003  | 0,006  | 0,030                          | 0,0010           | 0,0004   |
|  | ΔP                   | -0,08            | -0,003                         | -0,09                          | -      | -0,002  | -0,004 | -0,002 | 0                              | 0,00002          | -0,0002  |
| Ocres no texturales con perdigones (d=1,38 g/cm <sup>3</sup> ) | P                    | 23,9             | 11,70                          | 52,50                          | -      | 0,460   | 0,500  | 0,500  | 1,700                          | 0,0700           | 0,0400   |
|  | N                    | 0,33             | 0,160                          | 0,720                          | -      | 0,006   | 0,007  | 0,007  | 0,020                          | 0,0010           | 0,0006   |
|  | ΔP                   | -0,17            | -0,001                         | -0,03                          | -      | -0,004  | -0,006 | -0,002 | 0                              | 0,00002          | -0,0002  |
| Ocres no texturales sin perdigones (d=1,27 g/cm <sup>3</sup> ) | P                    | 34,7             | 10,40                          | 48,30                          | -      | 0,740   | 0,900  | 0,600  | 1,500                          | 0,0600           | 0,0500   |
|  | N                    | 0,44             | 0,130                          | 0,610                          | -      | 0,009   | 0,010  | 0,008  | 0,020                          | 0,0008           | 0,0006   |
|  | ΔP                   | -0,15            | 0,0002                         | -0,02                          | -      | -0,004  | -0,008 | -0,006 | 0                              | -0,00002         | -0,0006  |
| Ocres texturales lateríticos (d=1,14 g/cm <sup>3</sup> )       | P                    | 40,8             | 8,300                          | 40,40                          | 0,170  | 0,920   | 1,400  | 1,000  | 1,200                          | 0,0500           | 0,0900   |
|  | N                    | 0,46             | 0,090                          | 0,460                          | 0,002  | 0,010   | 0,020  | 0,010  | 0,010                          | 0,0006           | 0,0010   |
|  | ΔP                   | -0,16            | 0,020                          | 0,050                          | -0,002 | -0,0007 | -0,03  | -0,006 | 0                              | 0,00002          | -0,00006 |
| Ocres texturales nontroníticos (d=1,04 g/cm <sup>3</sup> )     | P                    | 49,0             | 4,600                          | 29,10                          | 0,380  | 0,830   | 4,500  | 1,450  | 1,000                          | 0,0400           | 0,0800   |
|  | N                    | 0,51             | 0,050                          | 0,300                          | 0,004  | 0,009   | 0,050  | 0,020  | 0,010                          | 0,0004           | 0,0008   |
|  | ΔP                   | -0,09            | 0,004                          | 0,040                          | -0,003 | 0,002   | -0,12  | -0,004 | 0                              | 0,00002          | 0,0003   |
| Serpentinitas nontronitizadas (d=1,13 g/cm <sup>3</sup> )      | P                    | 48,0             | 3,300                          | 19,60                          | 0,610  | 0,500   | 15,00  | 1,580  | 0,800                          | 0,0300           | 0,0400   |
|  | N                    | 0,54             | 0,040                          | 0,220                          | 0,007  | 0,006   | 0,170  | 0,020  | 0,009                          | 0,0003           | 0,0005   |
|  | ΔP                   | -0,17            | 0,0005                         | 0,0006                         | -0,006 | -0,0007 | -0,20  | 0,003  | 0                              | -0,00002         | -0,00006 |
| Serpentinitas lixiviadas (d=1,32 g/cm <sup>3</sup> )           | P                    | 45,0             | 2,000                          | 12,10                          | 0,920  | 0,370   | 27,40  | 0,750  | 0,500                          | 0,0200           | 0,0300   |
|  | N                    | 0,59             | 0,030                          | 0,160                          | 0,010  | 0,005   | 0,360  | 0,010  | 0,007                          | 0,0003           | 0,0004   |
|  | ΔP                   | -0,12            | 0,003                          | 0,010                          | -0,01  | 0,001   | -0,18  | 0,004  | 0                              | 0,0001           | 0,00007  |
| Serpentinitas descompuestas (d=1,69 g/cm <sup>3</sup> )        | P                    | 43,0             | 1,400                          | 8,900                          | 1,360  | 0,210   | 32,80  | 0,360  | 0,400                          | 0,0100           | 0,0200   |
|  | N                    | 0,73             | 0,020                          | 0,150                          | 0,020  | 0,004   | 0,550  | 0,006  | 0,007                          | 0,0002           | 0,0030   |

Observaciones: \*: Contenido en % (P); Concentración en g/cm<sup>3</sup> (N); Acumulación-extracción en g/cm<sup>3</sup> (ΔP).

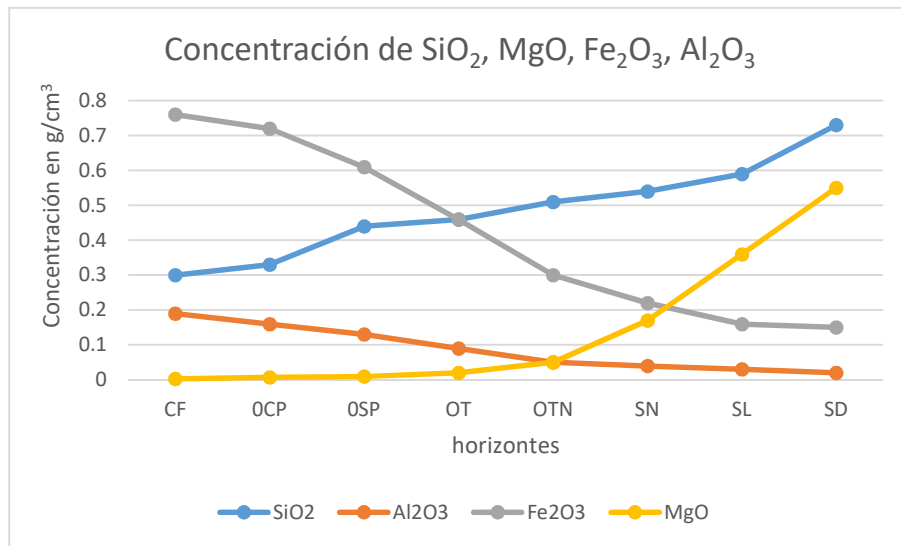


Figura 3. Tendencia de concentración de los principales componentes químicos (SiO<sub>2</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en la corteza de intemperismo en San Felipe.

### 3.2. Grado de meteorización a partir de los índices de intemperismo y los coeficientes de movilidad geoquímica

El coeficiente de lixiviación aumenta según avanza el intemperismo. Los valores tan elevados están relacionados con la redeposición de sílice. La siferritización se reduce, lo que atestigua un mayor arrastre de la sílice hacia los productos finales de la meteorización. El coeficiente de desintegración aumenta a medida que las rocas se intemperizan, mostrando una extracción del MgO hacia el tope. La sialitización es más alta en la base del perfil, lo que indica acumulación del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en las zonas superiores. Los coeficientes de alitización y ferritización son mayores en el techo del perfil constatando una concentración de alúmina y hierro.

El coeficiente de mineralización de níquel está enriquecido hacia las zonas de serpentinitas nontronitizadas y ocres texturales nontroníticos, relacionado con la presencia de abundantes minerales arcillosos que adsorben el níquel en su constitución. La mineralización de cobalto se concentra en la zona de ocres texturales lateríticos y, en menor medida, en los ocres nontroníticos, relacionado con la presencia de asbolanas en estas zonas.

En la Tabla 3 se exponen las características de la movilidad geoquímica de los elementos durante la meteorización de las ultrabasitas de San Felipe.

Tabla 3. Coeficientes de movilidad geoquímica y series de acumulabilidad en el yacimiento San Felipe

| Zona                               | Movilidad geoquímica (K <sub>p</sub> ) / Series de acumulabilidad               |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
|------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|------------------|-------|
|                                    | SiO <sub>2</sub>  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO   | MgO   | NiO   | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | CoO   |
| Coraza ferruginosa                 | -24,2   | -1,9                           | -12,5                          | -     | -33,3 | -57,1 | -28,6 | 0                              | +2,0             | -33,3 |
|                                    | Mg << Mn = Co < Ni < Si < Fe <sup>III</sup> < Al < Cr ~ Ti                      |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Ocres no texturales con perdigones | -38,6   | -0,77                          | -4,9                           | -     | -44,4 | -60,0 | -25,0 | 0                              | +25,0            | -33,3 |
|                                    | Mg < Mn < Si < Co < Ni << Fe <sup>III</sup> < Al ~ Cr < Ti                      |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Ocres no texturales sin perdigones | -32,6   | +0,25                          | -9,4                           | -     | -40,0 | -40,0 | -60,0 | 0                              | -3,3             | -60,0 |
|                                    | Ni = Co < Mg = Mn < Si << Fe <sup>III</sup> < Ti < Cr ~ Al                      |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Ocres texturales lateríticos       | -31,4   | +40,0                          | +16,7                          | -50,0 | -7,8  | -60,0 | -30,0 | 0                              | +5,0             | -7,5  |
|                                    | Mg < Fe <sup>II</sup> < Si ~ Ni << Mn ~ Co < Cr < Ti < Fe <sup>III</sup> << Al  |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Ocres texturales nontroníticos     | -16,7   | +10,0                          | +18,2                          | -42,9 | +33,3 | -70,6 | -20,0 | 0                              | +6,7             | +60,0 |
|                                    | Mg << Fe <sup>II</sup> << Ni < Si < Cr < Ti < Al < Fe <sup>III</sup> < Mn << Co |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Serpentinitas nontronitizadas      | -28,8   | +1,67                          | +0,38                          | -60,0 | -14,0 | -55,6 | +30,0 | 0                              | -6,67            | -15,0 |
|                                    | Fe <sup>II</sup> < Mg < Si < Co ~ Mn < Ti < Cr < Fe <sup>III</sup> ~ Al << Ni   |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |
| Serpentinitas lixiviadas           | -16,44  | +15,0                          | +6,67                          | -50,0 | +25,0 | -32,7 | +66,7 | 0                              | +50,0            | +23,3 |
|                                    | Fe <sup>II</sup> < Mg < Si < Cr < Fe <sup>III</sup> < Al < Co < Mn << Ti << Ni  |                                |                                |       |       |       |       |                                |                  |       |

Elementos: Acumulativos > 0; Inertes = 0; Poco móviles (0 a -30); Móviles (-30 a -60); Muy móviles (-60 a -100).

Los resultados del cálculo del grado de meteorización mostraron que el Fe<sup>2+</sup>, Mg tienen un fuerte agotamiento en la zona saprolítica (-72 %, -86 %, respectivamente), seguido del aumento en un +593 % Al, +327 % Fe<sup>3+</sup>, +438 % Mn, y +450 % Co. El enriquecimiento absoluto del Ni +439 % ocurre en las serpentinitas nontronitizadas. En la coraza el ritmo de agotamiento es -53 % de Si, y -99 % de Mg. El factor de enriquecimiento del Mn decrece con respecto a la zona saprolítica +238 % y el Co +150 %.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se establece la movilidad geoquímica y el balance de masas en el yacimiento saprolítico San Felipe, caracterizado por la formación de perfiles arcillosos silicatados.
- Se esclarece el mecanismo de migración geoquímica y evacuación del níquel, cuantificando la ganancia o pérdida de los componentes a través del perfil de alteración. La proporción de níquel en los

minerales del protolito ultrabásico es baja, inferior al 0,3 %, por lo que forzosamente se ha concentrado en los filosilicatos ricos por un proceso de enriquecimiento supergénico.

- El análisis de los índices de intemperismo y del grado de acumulación-extracción absolutos de los componentes permite una evaluación de la movilidad, distribución y concentración (zonalidad geoquímica) de los elementos químicos en los perfiles ferrosialíticos de San Felipe.
- Los resultados del cálculo del balance de masas muestran cómo ocurre la reducción de los componentes más móviles (magnesio, sílice) y el aumento de los acumulativos (hierro, aluminio) hacia arriba en el perfil. Este hecho está relacionado con la extracción de los elementos químicos y los procesos de autoenvejecimiento del sistema coloidal por medio de la cristalización de los geles.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio acreditado Elio Trincado de la Empresa Geominera Oriente, por la realización de las determinaciones químicas a través de la espectrometría de emisión con plasma acoplado por inducción (ICP). A los laboratorios Bondar Clegg, Chemex Labs, Ultratrace, de Canadá y QNI, de Australia, por realizar los controles externos.

## 6. REFERENCIAS

- Brimhall, G. H. y Dietrich, W. 1987: Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: Results on weathering and pedogenesis. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 51: 567-58.
- Bucher, K.; Stober, I. y Muller, H. 2015: Weathering crusts on peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 169(5): 26-41.
- Chang-Rodríguez, A. 2013: Nuevos resultados químicos que caracterizan al perfil de alteración saprolítico del yacimiento de níquel San Felipe, Camagüey, Cuba. *Revista Científica Cubana de Geociencias*, 1(octubre): 39-50. ISSN: 2310-0060.
- Chang-Rodríguez, A. y Rojas-Purón, A. 2015: Fases minerales portadoras de níquel en el horizonte saprolítico del yacimiento San Felipe. *Minería y Geología*, 31(4): 1-18. ISSN: 1993 8012.

- Chang-Rodríguez, A.; Tauler-Ferre, E.; Lavaut-Copa, W.; Rojas-Purón, A. L. y Proenza-Fernández, J. A. 2015: Caracterización geoquímica del perfil litológico del yacimiento laterítico de níquel San Felipe, Camagüey, Cuba. *Revista Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 16(2): 134-146. ISSN: 1729-3790.
- Chang-Rodríguez, A.; Tauler-Ferre, E.; Proenza-Fernández, J. A. y Rojas-Purón, A. L. 2016: Mineralogía del yacimiento laterítico niquelífero San Felipe, Camagüey, Cuba. *Minería y Geología*, 32(1): 28-47. ISSN: 1993 8012.
- Chang-Rodríguez, A. 2016: *Caracterización geoquímica y mineralógica de la corteza de meteorización del yacimiento San Felipe*. Tesis doctoral. La Habana. 135 p.
- Formell-Cortina, F.; Cobas, R.; Baryolo, L. y Ravelo, R. 1998: Reporte geológico. Primera fase de perforación. San Felipe Mining Ltd. 198 p.
- Ginsburg, I. I. 1946: Intemperización por etapas de los minerales. En: *Cuestiones de la mineralogía, geoquímica y petrografía*. Academia de Ciencias de la URSS, Moscú, p. 122-132.
- Lavaut-Copa, W. 1987: *Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral yacimientos Punta Gorda, Camariocas y Piloto*. Tesis doctoral. Moscú. 210 p.
- Lavaut-Copa, W. 1998: Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. *Minería y Geología*, 15(1): 9-16.
- Lavaut-Copa, W. 2004: Patrones de meteorización de rocas ofiolíticas de Cuba Oriental: su importancia para la minería. *Minería y Geología*, 20(3-4): 3-14.
- Muñoz-Gómez, J. N.; Rojas-Purón, A. y Díaz, R. 2007: La migración geoquímica del níquel en las cortezas de intemperismo ferro-niquelíferas: implicaciones en la exploración de explotación. En: II Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias' 2007). La Habana, 20-23 de marzo. ISBN 978-959-7117-16-2.
- Perelman, A. I. 1972: *Geoquímica de los elementos en la zona de hipergénesis*. Moscú: Nedrá. 422 p.
- Proenza-Fernández, J. A. 2015: Mineralogía y geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Macla Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, 20: 1-7. ISSN: 1885-7264.
- Rudnik, V. A. 1966: *Método átomo-volumétrico aplicado a la formación metasomática de minerales y rocas*. Moscú: Nedrá.

Recibido: 28/04/17  
Aceptado: 15/11/17

*Alfonso Chang Rodríguez*, profesor titular, Doctor en Ciencias Geológicas.  
Empresa Geominera Camagüey [alfonsochr@geocmg.minem.cu](mailto:alfonsochr@geocmg.minem.cu)