

# MODELO GEOLÓGICO DESCRIPTIVO PARA LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS DE Fe-Ni-Co EN LA FAJA OFIOLÍTICA MAYARÍ-BARACOA DE CUBA ORIENTAL

*Descriptive geological modeling of Fe-Ni-Co lateritic  
deposits in Mayarí-Baracoa ophiolitic belt, eastern Cuba*

José D. Ariosa Iznaga<sup>1</sup>  
Waldo Lavaut Copa<sup>2</sup>  
Pedro Siboney Bergues Garrido<sup>2</sup>  
Roberto Díaz Martínez<sup>3</sup>

E-mail: jariosa@ri.uo.reduniv.cu

<sup>1</sup> Universidad de Oriente

<sup>2</sup> Empresa Geominera de Oriente

<sup>3</sup> Departamento de Geología Instituto Superior  
Minero Metalúrgico

## RESUMEN

Los modelos descriptivos de yacimientos minerales constituyen sistematizaciones de información geológica de gran valor para la exploración y la evaluación de territorios que presenten aquellos atributos definidos en el modelo y que los hagan perspectivas para el descubrimiento de nuevos recursos minerales. En este trabajo se presenta una visión generalizada de los procesos de intemperismo y se hace una propuesta de modelos para los yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co en Cuba, a partir de los que se localizan en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa en Cuba Oriental.

**PALABRAS CLAVE:** Modelos de yacimientos minerales, intemperismo, lateritas.

## ABSTRACT

Mineral deposit descriptive models are valuable geological information network usefull to explore and assessment the territories with these attributes in their geologic pattern and makes them perspectives for the discovery of new mineral resources.

In this paper a generalized approach is given about weathering as main process in the formation of laterites as well as three proposal of Fe-Ni-Co laterite descriptive models developed on Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt located in Eastern Cuba.

**KEY WORDS:** Mineral deposit models, weathering, laterites.

## INTRODUCCIÓN

El grado de estudio geológico de la República de Cuba experimentó un incremento considerable a partir de los primeros años de la década de los 60 del siglo xx, cuando fue reorganizado el Servicio Geológico Nacional, y se crean el Instituto Cubano de Recursos Minerales —ICRM— en el Ministerio de Industrias y la Escuela de Geología en la Universidad de La Habana.

Existe una considerable cantidad de información sobre los recursos minerales cubanos. Informes y estudios de yacimientos, manifestaciones y puntos de mineralización, se encuentran en los archivos y fondos geológicos de las principales instituciones geológicas (Oficina Nacional de Recursos Minerales, Instituto de Geología y Paleontología, Uniones Geominera y del Níquel y sus Empresas de Producción), así como en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Esa información es la base inicial necesaria para la sistematización, generalización y confección de los Modelos Descriptivos de Yacimientos Minerales, tarea no desarrollada aún en la República de Cuba.

Las menas lateríticas de cortezas de intemperismo en Cuba, fundamentalmente en su parte oriental, se conocen desde el mismo descubrimiento de la Isla por Cristóbal Colón (Lavaut, 1987). En 1762, durante el

desarrollo de la guerra anglo-española, el perdigón fue objeto de atención para obtener hierro (Ariosa Iznaga, 1977).

De 1901 a 1906 algunos geólogos, entre los que figuraron Hayes, Vaughan y Spencer, realizaron investigaciones sobre las lateritas de Cuba (Lavaut, 1987). Con la construcción, en 1943, de la planta de níquel de Nicaro se incrementó el grado de estudio de las lateritas cubanas; de este período datan los trabajos de la Junta de Seguridad de Recursos Naturales (1950), McMillan (1955), De Vletter (1953, 1955), y Monttoulieu y Abalo (1957).

Posterior a 1959 se ahonda en el estudio de los recursos niquelíferos y se concluye la construcción de una segunda planta de níquel ubicada en Moa. Hoy suman tres las industrias cubanas procesadoras de menas lateríticas. Desde los primeros años de la década de 1960, los yacimientos lateríticos del nordeste de Cuba fueron objeto de investigaciones geológicas sistemáticas, dirigidas por las empresas geológicas y mineras, los institutos de investigación, la antigua Academia de Ciencias y las universidades, en especial, la de Oriente, y el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, que han contribuido notablemente al incremento del grado de conocimiento sobre estos yacimientos.

En el Congreso de Geología y Minería de 1998, celebrado en La Habana, Cobas y otros, 1998, presentaron un trabajo sobre "Modelos geológicos de yacimientos lateríticos cubanos". Estos modelos se confeccionaron sobre la base de las descripciones litológicas de testigos de perforación, afloramientos, pozos criollos y canteras, y de la composición química, mineralógica y propiedades físicas (peso volumétrico, humedad natural, y otros) para diferentes condiciones de desarrollo del intemperismo. Éste es el documento más reciente que se conoce sobre modelos de yacimientos de lateritas, mas no llega a constituirse en un modelo descriptivo en la acepción que le damos en la presente investigación, pero es, sin lugar a duda, una contribución notable al grado de conocimiento geológico de este tipo de yacimiento.

Vale recordar que los recursos minerales niquelíferos, identificados en depósitos con una ley de 1 % o más de Ni, ascienden a 130 millones de toneladas. Alrededor del 60 % del Ni se encuentra en los depósitos lateríticos y el restante 40 % en los depósitos de sulfuros magmáticos. La producción minera en el año 2001 fue de 1 260 000 t, en la cual se destacaron la Federación Rusa (265 000 t), Australia (184 000 t), Canadá (183 000 t), Nueva Caledonia (126 000 t), Indonesia (105 000 t) y Cuba (71 500 t).

Las principales reservas de Ni se localizan en Australia, Cuba, Canadá, Nueva Caledonia, Indonesia, África del Sur y Filipinas (Kuck, 2002).

La aplicación de los modelos descriptivos en las tres zonas principales de desarrollo de lateritas en Cuba Oriental (Pinares de Mayarí, Moa y Punta Gorda) contribuiría, entre otros aspectos, a una mejor delimitación de las concesiones mineras y a una explotación más eficiente de los yacimientos.

## **EL PROCESO DE LATERITIZACIÓN**

Una de las fases fundamentales del escenario geomorfológico en la superficie de la Tierra es la destrucción y descomposición de las rocas por los procesos del intemperismo. El 14 % de la superficie terrestre experimenta el intemperismo físico o mecánico y el 86 % está afectada por los procesos químicos (Pedro, 1968). El intemperismo implica una fuerte dependencia de los procesos asociados con la hidrosfera, atmósfera y biosfera (White and Brantley, 1995), ya que la cristalización y disolución de los minerales a partir de las soluciones acuosas son los procesos principales en la cinética de este fenómeno. De acuerdo con Ollier (1975), el intemperismo es "la destrucción y alteración de minerales y rocas cerca de la superficie de la tierra dando lugar a productos más estables en las nuevas condiciones físico-químicas".

La existencia de las lateritas fue reconocida por vez primera por Buchanan en 1807. Un siglo después Harrassowitz, en 1926, realizó una descripción general de las lateritas y muchas de sus observaciones y sugerencias aún poseen un considerable valor (Pedro, 1968; Lima Costa, 1997).

Las condiciones relevantes para que ocurra la lateritización son, según Harder (1952) y De Swardt (1964), las siguientes:

- a) Presencia de minerales formadores de las rocas fácilmente solubles y movilizables que dejen residuos ricos en alúmina y hierro.
- b) Permeabilidad y porosidad efectiva que favorezcan el fácil acceso, así como la circulación del agua y las soluciones. La libre circulación asegura la movilidad de la materia disuelta, lo cual no favorece el establecimiento de condiciones de equilibrio en soluciones saturadas.
- c) Precipitaciones normales a abundantes con un régimen estacional o, al menos, con interrupción entre ellas.
- d) Abundante vegetación y otros componentes bióticos, incluyendo las bacterias; los ácidos

orgánicos, en particular, actúan como agentes efectivos de solución y precipitación.

- e) Temperaturas tropicales o calientes que aceleren la velocidad de las reacciones químicas y promuevan los procesos de formación de arcillas.
- f) Relieve topográfico bajo o moderado que permita el movimiento libre del nivel del agua subterránea y minimice los procesos de remoción.
- g) Un largo período de estabilidad de las estructuras geológicas.

El grado de alcance del intemperismo tiene su expresión en dos conceptos:

- a) Profundidad en el sentido espacial, esto es, el espesor o potencia de la corteza de intemperismo;
- b) Intensidad o grado de intemperismo como expresión del cambio en la roca original afectada por las reacciones químicas.

Los principales factores que determinan la profundidad del intemperismo se exponen en la Tabla 1.

La intensidad o grado de intemperismo es la cantidad de alteración a partir del estado original que muestra una roca o un sedimento no consolidado en un punto y momento dados, como resultado de la acción de los distintos procesos de descomposición. Por consiguiente, la velocidad del intemperismo se refiere a la cantidad de cambio por unidad de tiempo, aunque en la práctica se refiere a un cambio generalizado. Estas dos nociones están unidas, ya que una alta intensidad en el intemperismo puede implicar una velocidad rápida de alteración; no obstante, se pueden obtener altas intensidades a velocidades moderadas, pero que actúen durante mucho tiempo.

La intensidad del intemperismo está determinada por una serie de factores que afectan la velocidad y naturaleza de los procesos. Estos factores se agrupan en dos categorías: intrínsecos y extrínsecos. Los primeros incluyen a los poros, fracturas de las rocas y su mineralogía básicamente. Los extrínsecos comprenden la temperatura, el quimismo de las soluciones determinado básicamente por su índice de acidez, y la hidrodinámica de las soluciones intemperizantes.

Factores climáticos	Temperatura: el aumento de ésta incrementa la velocidad de las reacciones químicas endotérmicas. Precipitación: el agua constituye el agente principal del proceso de intemperismo.
Factores bióticos	Cubierta vegetal: una cubierta densa protege a la superficie de los procesos de lavado y proporciona los ácidos orgánicos que son capaces de alterar ciertos minerales de las rocas, movilizándolo especialmente el Fe por quelación. Por el contrario, la vegetación de sabana abierta favorece la inmovilización del Fe y propicia el escurrimiento superficial.
Factores geomorfológicos	Estabilidad de la superficie del terreno: la penetración del intemperismo se favorece con una baja velocidad de la denudación donde prevalecen las pendientes suaves. Presencia de paleosuperficies: la estabilidad prolongada de las antiguas superficies permite que se desarrollen perfiles profundos.
Factores locales	Drenaje libre: los lugares hipsométricamente elevados posibilitan el movimiento hacia abajo y la renovación frecuente del agua subterránea, que es esencial para la rápida descomposición de las rocas. Las zonas de captación-recepción: la combinación del incremento de la cantidad de agua en las zonas de convergencia del escurrimiento con un pobre drenaje provoca la formación de cortezas lateríticas poco profundas.
Factores geológicos	Tipo de roca: la presencia de minerales particularmente susceptibles a la alteración, incrementa la velocidad de penetración del intemperismo y puede provocar la desintegración temprana de la roca. Textura de la roca: Las rocas cristalinas de textura gruesa se desintegran más rápidamente que las de textura fina. La textura en las rocas sedimentarias afecta la permeabilidad y la velocidad de la penetración del intemperismo. Fisibilidad de la roca: las fallas, grietas y bordes de granos fracturados facilitan la penetración del intemperismo especialmente en las rocas cristalinas. Alteración hidrotermal: las rocas que han sido sometidas previamente a las distintas formas de la actividad hidrotermal pueden ser más susceptibles al intemperismo.
Factores cronológicos	Cambios climáticos: las variaciones de vegetación y clima alteran con el tiempo el balance de intemperismo y erosión. Las condiciones pluviales en las zonas áridas durante el Terciario y el Pleistoceno han conducido a la presencia de un intemperismo relicto profundo. Cambios tectónicos: las variaciones de la estabilidad cortical afectan la estabilidad de la superficie del terreno y el tiempo disponible para la penetración del intemperismo.

La medida de la intensidad del intemperismo puede obtenerse por la relación de alúmina en el material intemperizado con respecto al de la roca fresca. También existe una relación entre la suma de los óxidos de Na y K / sílice del horizonte intemperizado con respecto al del material original, que se denomina factor de lixiviación (Birkeland, 1974).

El papel de los procesos biológicos en el intemperismo es bien conocido. La macroflora aporta un suministro continuo de materia orgánica a los detritos de la roca intemperizada. La microflora, por su parte, vive en el material intemperizado, es variada y numerosa, y está integrada por bacterias, hongos, actinomicetos, algas, protozoos y gusanos de tierra. Esta biota alcanza valores considerables de hasta 89 kg por cm de espesor del suelo, pero esta cantidad así como su composición varían en función del clima, uso del suelo, adición de fertilizantes y materia orgánica, y otros factores. Los diferentes grupos en la microflora utilizan para su nutrición los compuestos de C y N de las plantas y animales muertos, y al hacerlo producen humus. También utilizan el O<sub>2</sub> del suelo e incrementan su contenido en CO<sub>2</sub>.

Los principales procesos biológicos (Barker *et al.*, 1997) que incrementan el intemperismo de los minerales son:

- a) El crecimiento de las raíces y la acción de los hongos producen la desintegración física de los minerales, exponiendo nuevas superficies frescas a la acción de los agentes del intemperismo.
- b) La estabilización del suelo incrementa la retención del agua, lo que favorece la ocurrencia de las reacciones del intemperismo.
- c) La producción de ácidos, en primer término el ácido carbónico a partir del CO<sub>2</sub>, así como también otros ácidos orgánicos e inorgánicos, acelera la velocidad del intemperismo.
- d) Los ligandos orgánicos atacan directamente la superficie de los minerales o forman complejos con iones en solución, cambiando el estado de saturación.
- e) Los polímeros extracelulares complejos moderan el potencial de agua, mantienen los canales de difusión, actúan como ligandos o quelatos y sirven como puntos de nucleamiento para la formación de minerales autógenos.
- f) La absorción, primeramente de K, Fe y P, disminuye el estado de saturación de la solución y favorece el intemperismo.

El intemperismo diferencial de los minerales de las rocas ultrabásicas se expresa en una alteración más rápida del olivino que la del ortopiroxeno, la que a su vez es más rápida que la del clinopiroxeno. La serpentinita se intemperiza más lentamente que otras rocas ultrabásicas y, por lo tanto, se localiza en posiciones más altas dentro del perfil laterítico. Esto puede explicar el porqué el olivino puede liberar Ni hacia las soluciones del intemperismo, de ahí que las lateritas níquelíferas puedan contener entre 2-5 % de Ni en los horizontes de menas silicatadas y entre 1-3 %, como promedio, en las zonas de menas oxidadas.

### **SOBRE LA TERMINOLOGÍA DE LOS PERFILES Y ZONAS DE LA CORTEZA DE INTEMPERISMO LATERÍTICA**

Existe una gran diversidad de criterios y términos para la clasificación de la zonalidad y perfiles de la corteza de intemperismo. Basta decir que sólo la definición del término laterita ha mantenido una controversia que se dilata ya a más de ciento cincuenta años, a pesar de que es indispensable para una correcta clasificación de los productos del intemperismo definir como laterita a los productos del intenso intemperismo, compuestos principalmente por hierro (no inferior a 35-40 %) y aluminio, los cuales forman oxihidróxidos. Estos criterios y términos adolecen de que engloban más de un litotipo en una misma zona litológica o bien desmiembran las zonas litológicas naturales en subconjuntos amarrados a determinados intereses particulares (aplicación de criterios composicionales, como el quimismo o la mineralogía o según un fin práctico determinado, tal como la estimación del peso volumétrico, subdivisión por color, granulometría, textura, etc.). Esto conduce a la pérdida de información geológica, lo cual obstaculiza las interpretaciones y deducciones geólogo-genéticas, así como la captación y representación de la información geológica en su estado natural.

Así, son conocidos los criterios siguientes sobre la zonalidad vertical de las cortezas de intemperismo, definida según la profundidad (de arriba hacia abajo).

- a) División del corte en tres zonas litológicas: laterita, saprolita y roca madre, con diversas denominaciones y subdivisiones (Buchanan, 1807; Webber, 1972; Trescases, 1975, 1986; Tardy, 1992; Golightly, 1981; Nahon *et al.*, 1992 y otros de las escuelas inglesa y francesa).
- b) División del corte en cuatro zonas litológicas: ocre inestructural, ocre estructural, serpen-

tinita lixiviada nontronitizada y serpentinita desintegrada (Smirnov, 1982, y otros de la ex Unión Soviética).

- c) División introducida por geólogos norteamericanos en las minas cubanas, que establece en el corte 12 litotipos: hierro A, hierro B, hierro C, hierro D, hierro E, hierro F, hierro G, serpentina A, serpentina B, serpentina C, serpentina D, serpentina E (Lavaut, com. pers., 2002).
- d) División del corte en cuatro zonas geoquímicas: hidrólisis final, hidrólisis parcial y lixiviación final; hidratación e hidrólisis inicial; hidratación inicial y lixiviación de la roca madre por grietas (Nikitina y otros, 1971).
- e) División del corte en cuatro zonas mineralógicas: ocres, nontronita, kerolita y desintegración de la roca madre (Nikitina y otros, 1971).
- f) División del corte en cinco zonas mineralógicas: ocres, nontronita, ferrisaponita, kerolita y desintegración de la roca madre (Vitovskaya, 1989).
- g) División del corte en seis zonas litológicas: zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (**OICC**); zona de ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas (**OI**); zona de ocres estructurales finales (**OEF**); zona de ocres estructurales iniciales (**OEI**); zona de rocas madres lixiviadas (**RML**), y zona de rocas madre agrietadas (**RMA**) (Lavaut, 1998).

Las denominaciones de los tipos de perfiles de intemperismo se realizan sobre la base de criterios mineralógicos y por criterios litológicos. La clasificación mineralógica (Nikitina y otros, 1971; Vitovskaya, 1982, 1989) establece tres tipos de perfiles:

- a) **completo**: con las cuatro zonas geoquímicas indicadas más arriba (hidrólisis final, hidrólisis parcial y lixiviación final, hidratación, y lixiviación, desintegración);
- b) **reducido**: si le faltan zonas intermedias entre la zona de hidrólisis final y de desintegración de las rocas madre;
- c) **incompleto**: si le faltan las zonas geoquímicas superiores y esto no ha sido consecuencia de la erosión.

Por su parte, la clasificación litológica establece tipos de perfiles de intemperismo en dependencia de la cantidad y combinación de las zonas litológicas arriba indicadas, encontradas en un punto dado del terreno, lo cual es asequible a simple vista y favorable para la documentación geológica por cualquier

persona versada en la materia (geólogo, edafólogo, geógrafo, agrónomo, y otros).

## CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE LOS PERFILES LATERÍTICOS EN CUBA

La clasificación de tipos litológicos de perfiles de intemperismo, aplicada actualmente en Cuba (Lavaut, 1998), agrupa los perfiles primeramente en tres grandes familias que se subdividen entre ellas en ocho dominios, a saber:

- a) Perfiles lateríticos, con cuatro tipos de perfiles litológicos: 1) inestructural completo; 2) inestructural incompleto; 3) estructural completo, y 4) estructural incompleto;
- b) Perfiles laterítico-saprolíticos, con dos tipos de perfiles: 5) estructural completo, y 6) estructural incompleto;
- c) Perfiles saprolíticos, con dos tipos de perfiles: 7) estructural completo, y 8) estructural incompleto.

En Cuba, el 60 % de las reservas de menas Fe-Ni-Co se relacionan con el tipo de perfil litológico laterítico-saprolítico, y el 35 % con el perfil litológico laterítico.

La descripción concisa de las zonas litológicas de la clasificación cubana (Lavaut, 1987) se expone a continuación, con los términos equivalentes más apropiados (entre paréntesis y en cursivas) del ámbito anglo-francés:

1. Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (*pisolitic ferricrete*; *pisolitic duricrust*): Se caracteriza por una gran abundancia (usualmente 30-70 %) de globulaciones goethítico-hematíticas que no conservan los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre; su cantidad y tamaño disminuyen con la profundidad hasta 0,5-1 mm de diámetro, y adquieren una forma prácticamente esférica hasta desaparecer en la masa ocrosa inestructural de la base de esta capa. En algunos lugares se observa la cementación de las concreciones ferruginosas (*massive duricrust*), formando bloques o pseudoestratos con tabiques ferruginosos de unión entre ellos en cortezas típicas de ultramafitas, lo que testimonia su génesis infiltrativa por removilización parcial del hierro en medios superficiales con pH ácidos. El color del material de esta zona es marrón-rojizo oscuro o rojo-rosado, en dependencia de si la roca madre fue ultramafita o mafita;

2. Zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas (*sub-pisolitic ferricrete*): Consiste en una masa ocrosa de aspecto terroso y coloración más clara que la anterior zona, prácticamente sin concreciones ferruginosas, donde no se conservan las características de la fábrica estructural de la roca madre;
3. Zona de ocre estructurales finales (*mottled zone*): Es una masa ocrosa que conserva los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre y cantidades insignificantes de relictos de los minerales que la componían, sobre todo en la base de esta capa. Su coloración es amarillo-anaranjada o rosado-violácea con pintas blancas, según haya sido la roca madre ultramafita o mafita;
4. Zona de ocre estructurales iniciales (*fine saprolite*): Consiste en una masa semiocrosa granulosa con aproximadamente la misma cantidad de material ocroso y arcilloso con relictos de los minerales primarios y fragmentos pequeños y medianos (1-3 cm de diámetro) de rocas madre lixiviadas y parcialmente limonitizadas, friables y con sus núcleos duros, más o menos frescos. La coloración es abigarrada amarillo-verdosa en caso de que la roca madre haya sido una ultramafita o blancuzca grisácea, si el sustrato es una mafita;
5. Zona de rocas madre lixiviadas (*saprolite*): Está constituida por una masa fragmentosa arcillosa de consistencia semidura, ligera de peso, porosa y cavernosa, levemente limonitizada (10-15 %), donde se manifiestan en forma relevante los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre. La fragmentosidad consiste en partes de las rocas madre muy lixiviadas, argilitizadas y poco limonitizadas, que pueden estar impregnadas por vetas, vetillas y nidos de minerales infiltrativos de neoformación (supergénicos). Por lo general el material de esta zona está fuertemente impregnado de agua. La coloración del material es verde-grisácea, amarillenta o verde-grisácea- blancuzca, en dependencia de la litología del sustrato;
6. Zona de rocas madre agrietadas (*parent rock, bedrock*): Constituye el frente de intemperismo físico con incipiente lixiviación y oxidación de las rocas madre por las grietas del intemperismo, provocadas por la aniso-

tropía del coeficiente de dilatación térmica de sus partes componentes, así como por otros sistemas de fisuras como las tectónicas, gravitacionales, etc. Por las grietas se depositan usualmente minerales infiltrativos supergénicos, sobre todo silicatos amorfos y microcristalinos; el material de esta zona, fundamentalmente en su porción más superficial, también experimenta transformaciones por su masa, incluyendo su posible opalitización hasta el grado de cuarcitas secundarias. La coloración del material de esta zona coincide con el color general de las rocas madre primarias, y experimenta una decoloración hasta matices más claros en las partes lixiviadas en torno a las grietas, así como pueden observarse fenómenos de metasomatosis cromática por contaminación con oxihidróxidos de hierro de las soluciones infiltrativas, serpentización y argilitización.

En esta clasificación el término ocre no se utiliza en su acepción de color, sino para representar un concepto texturo-estructural al referirse al material arcilloso que se deriva como productos intermedios y finales del proceso de intemperismo.

La clasificación más práctica y operativa de las cortezas de intemperismo se basa en los criterios estructuro-genéticos clave: su zonalidad litológica vertical y el tipo de perfil, los que son observables y documentables macroscópicamente en los afloramientos, pues las delimitaciones por criterios químicos y mineralógicos conducen a una zonalidad que no coincide con los límites litológicos naturales. Además, la zonalidad geoquímica o mineralógica no es apreciable a la vista, sino que tiene que ser determinada sobre la base de investigaciones analíticas complejas y tardías, realizadas en laboratorios, lo cual la hace inoperante.

La zonalidad litológica de la corteza de intemperismo se establece basándose en sus propiedades físicas y composicionales: color, fábrica, granulometría, humedad, propiedades físico-mecánicas (densidad, resistencia a la compresión, estabilidad bajo carga y en estado libre de sus taludes, etc.), composición química y mineral, que a su vez reflejan la gradación metasomática del intemperismo natural de la roca madre o sustrato en diferentes condiciones microclimáticas, geomorfológicas y geológico-estructurales. Por esta razón, la clasificación con criterios litológicos es la más efectiva y su aplicación a nivel mundial se generaliza cada vez más.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL PERFIL DE INTEMPERISMO SOBRE ULTRAMAFITAS DE LA REGIÓN ORIENTAL DE CUBA. (CONTENIDOS DE ÓXIDOS Y DE MINERALES EN %) (LAVAUT, 1998)										
Zonas litológicas	Peso volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )	Potencia Promedio (m)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	NiO	CoO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
OICP	1,516	2,10	59,24	0,33	0,60	0,051	6,98	1,09	14,47	2,64
		MG=	-37,9	-	-61,9	-69,9	-19,6	-46,4	0	-32,9
			Goet.=64,1			MtMg=1,24		Mn=0,81		Crom=3,0
			Gib.=19,68	Arc(Ferrohalloysita)=8,62	Serpentinas=2,37	Cuarzo=1,97				
OI	1,27	1,99	64,35	0,31	1,06	0,114	5,85	1,37	9,75	2,65
		MG=	-16,7	-	-37,5	-54,8	-46,3	-68,6	0	-19,8
			Goet.=69,7			MtMg=1,27		Mn=0,99		Crom=3,16
			Gib.=12,96	Arc(Ferrohalloysita)=8,6	Serpentinas=2,12	Cuarzo=1,69				
OEF	1,04	5,04	60,98	0,33	1,34	0,199	8,61	3,45	7,70	2,61
		MG=	38,5	-	-37,9	136,3	-77,4	-83,9	0	13,7
			Goet= 65,0			MtMg=1,21		Mn=1,87		Crom=3,02
			Gib.=7,67	Arc(Halloysita)=11,51	Serpentinas=5,82	Cuarzo=1,11				
OEI	0,96	2,54	32,43	0,81	1,59	0,062	28,1	15,75	5,67	1,69
		MG=	-9,3	-	-49,6	-12,2	-65,5	-73,7	0	-4,2
		MG=								
			Goet.=33,3			MtMg=2,56		Mn=0,69		Crom=2,04
			Gib.=5,03	Arc(Ferrisaponita)=22,18	Serpentinas=28,8	Cuarzo=4,09				
RML	1,36	2,19	16,20	1,08	1,43	0,032	36,88	27,16	2,57	0,80
		MG=	-20,4	-	14,9	-50,7	-64,1	-72,2	0	-24,2
			Goet.=14,6			MtMg=2,38		Mn=0,31		Crom=1,46
			Gib.=0	Arc(Montmorillonita)=17,9	Serpentinas=58,2	Cuarzo=3,79				
RMA	2,26	7,40	7,52	2,12	0,46	0,024	37,9	36,13	0,95	0,39
		MG=	6,6	-	30,2	51,6	-18,4	-25,7	0	-31,9
			Goet.=5,9			MtMg=3,16		Mn=0,16		Crom= 1,04
			Gib.=0	Arc(Nonttronita)=9,28	Serpentinas=73,8	Cuarzo=5				
RMF	2,525	nx1000 ( n < 12)	5,79	3,01	0,29	0,013	38,2	39,92	0,78	0,47
			Oliv.=37,0		Ortpx= 20,0			Clpx=1,3		Serpent=41,7

MG=Movilidad geoquímica: Acumulativos >0; Inertes=0; Poco móviles (0-30) Móviles (-30-60); Muy móviles (-60-100). El cuarzo es hipergénico (ópalo, calcedonia y marshalita, principalmente). Goet.= Goethita; Gib.= Gibbsita; Arc= Arcillas; MtMg = Magnetita+Maghemita; Mn =Minerales manganíferos; Crom= Cromoespinelas; Oliv.= Olivino; Ortpx= Ortopiroxeno; Clpx= Clinopiroxeno; Serpent= Serpentina.

TABLA 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL PERFIL LATERÍTICO								
Zonas litológicas	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PPI
OICP	0,42	0,49	0,07	0,05	0,35	0,14	0,03	12,91
MG=	-63,7	50	Ti>Al>Si>Cr>Fe3+>Mg>Ni>Mn>Co					
OI	0,78	0,22	0,07	0,05	0,36	0,15	0,03	12,23
MG=	-59,7	24,1	Ti>Al>Fe3+>Cr>Ni>Si>Co>Mn>Mg					
OEF	1,53	0,14	0,07	0,05	0,35	0,14	0,03	12,09
MG=	101,2	-35,6	Co>Mn>Fe3+>Cr>Al>Ti>Ni>Si>Mg					
OEI	0,56	0,16	0,07	0,05	0,37	0,09	0,03	11,76
MG=	5,8	81,3	Ti>Mn>Al>Cr>Fe3+>Co>Ni>Si>Mg					
RML	0,24	0,04	0,07	0,05	0,40	0,09	0,02	12,44
MG=	-31,8	-26,1	Ni>Al>Fe3+>Cr>Ti>Mn>Co>Si>Mg					
RMA	0,13	0,02	0,05	0,05	0,41	0,1	0,02	12,51
MG=	-2,9	-17,9	Co>Ni>Fe3+>Al>Mn>Ti>Si>Mg					
RMF	0,11	0,02	0,05	0,05	0,33	---	---	11,8

### MODELOS DESCRIPTIVOS DE YACIMIENTOS DE LATERITAS

Los modelos descriptivos van mucho más allá de los genéticos; deben ser lo suficientemente abarcadores, de manera que puedan incluir varios tipos genéticos de yacimiento. Aquellos yacimientos que comparten una variedad relativamente amplia y un gran número de atributos se caracterizan como un “tipo de yacimiento”.

Las interpretaciones genéticas generalmente aceptadas pueden desempeñar un papel significativo en el establecimiento de los tipos de modelos descriptivos, pero los atributos descritos en los modelos deben proporcionar una base para la interpretación de las observaciones geológicas, más que para proporcionar interpretaciones para la búsqueda. Los atributos señalados en los modelos descriptivos deben ser guías para la evaluación de recursos y la exploración, tanto en la etapa de planeamiento como en la interpretación de los descubrimientos.

Los modelos descriptivos tienen dos partes (Ariosa y Díaz, 2001). La primera es el ambiente geológico que describe el escenario donde se encuentran los yacimientos; la segunda proporciona las características que los identifica. El ambiente geológico incluye, entre otros elementos, los tipos de rocas y su textura; la edad del evento responsable de la formación del yacimiento y el escenario tectónico. La segunda parte del modelo hace énfasis, en particular, en aquellos indicadores con los cuales el yacimiento se puede reconocer a través de sus anomalías geoquímicas y geofísicas. En la mayoría de los casos, los modelos deben contener datos útiles para los proyectos de exploración, planeamiento y evaluación de los recursos minerales.

Lefebvre y Ray (1995), en su *Guía para los autores de perfiles geológicos descriptivos de yacimientos minerales*, exponen que su contenido debe abarcar:

#### A. Nombre del perfil

1. Identificación de sinónimos
2. Productos principales y subproductos
3. Ejemplos

### B. Características geológicas

1. Descripción resumen: es una corta descripción que introduce al lector en el tipo de yacimiento y en la cual se hace énfasis en los minerales importantes, forma del yacimiento y otras particularidades geológicas asociadas.
2. Escenario tectónico: se utiliza para describir el ambiente generalizado en la visión de la nueva tectónica global. Por lo tanto, se debe referir a ambientes regionales y estructurales.
3. Ambiente de deposición/escenario geológico: el ambiente de deposición incluye los eventos geológicos asociados a la formación del yacimiento, y el escenario geológico describe en sentido amplio el entorno geológico del mismo, sin explicar el escenario tectónico.
4. Edad de la mineralización: se refiere a la edad de emplazamiento de la mineralización. En algunos casos se ofrece con relación a las rocas encajantes y al control estructural del yacimiento.
5. Tipos de rocas encajantes y asociadas: se trata de una descripción litológica de las rocas que tienen ese significado para el yacimiento.
6. Forma del yacimiento: es la forma geométrica de los cuerpos minerales y sus relaciones físicas y estructurales con las rocas encajantes y asociadas.
7. Texturas/Estructuras: se refiere a los minerales útiles y no a las rocas.
8. Mineralogía de la mena (principal y subordinada): se relacionan los minerales en una lista por orden de importancia.
9. Mineralogía de la ganga (principal y subordinada): se relacionan los minerales por orden de importancia.
10. Mineralogía de las alteraciones: se señala en caso de que sea importante para la descripción del tipo de yacimiento.
11. Intemperismo: opcional y en caso de que esté desarrollado.
12. Controles de las menas: revisa las particularidades de la génesis de las menas y el control estructural del emplazamiento o deposición de la mineralización útil.
13. Modelo genético: se describen las teorías genéticas modernas sobre este tipo de yacimiento.
14. Tipos de yacimientos asociados: es una lista de los tipos de yacimientos que están relacionados genéticamente con el que se está describiendo.
15. Comentarios.

### C. Guías de exploración

1. Rasgos geoquímicos: se describen los elementos y métodos geoquímicos que pueden ser útiles para el descubrimiento del yacimiento.
2. Rasgos geofísicos: se describe la expresión y métodos geofísicos que pueden ser útiles para el descubrimiento del yacimiento.
3. Otras guías de exploración

### D. Factores económicos

1. **Ley y tonelaje:** refleja la ley y el tamaño típico para este tipo de yacimientos.
2. **Limitantes económicas:** se indican las propiedades físicas y química que afectan el uso de final del mineral útil, así como las restricciones para su procesamiento mecánico y/o metalúrgico, entre otros aspectos. Varía de acuerdo con el tipo de mineral útil.
3. **Usos finales.**
4. **Importancia.**

### E. Referencias

En los modelos propuestos para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co se ha empleado el esquema que utiliza el Servicio Geológico de Columbia Británica en Canadá (British Columbia Geological Survey-BCGS, siglas en inglés) para describir los perfiles de yacimientos minerales.

### MODELO DESCRIPTIVO DE DEPÓSITOS Fe-Ni-Co LATERÍTICOS

**Nombre:** Depósitos Fe-Ni-Co lateríticos.

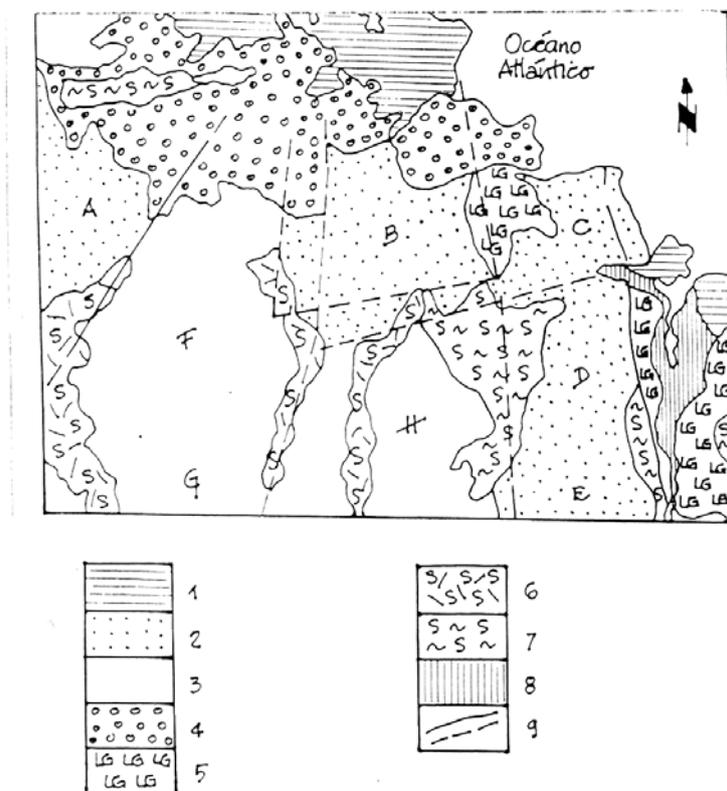
**Sinónimos:** Menas oxidadas de níquel; depósitos níquelíferos limoníticos; tipo serpentino-ocroso cobaltífero-níquelífero; perfil querolítico-ocroso; perfil reducido.

**Productos y subproductos:** Fe, Ni, Co (Cr, corrector de cemento, lacas y pinturas).

**Ejemplos:** Pinares de Mayarí (Mayarí, Cuba); Las Luces (Nicaro, Cuba); Las Camariocas (periferia); Moa Oriental, Yagrumaje Oeste (Moa, Cuba); Elizavetinsk (Rusia) y Ufaléysk (Rusia); Kalum (Liberia). También se hallan en Brasil, India, Nueva Caledonia, Filipinas, Papua-Nueva Guinea y Burundi.

### Características geológicas

**Descripción resumen:** Depósitos supergénicos de Fe-Ni-Co medianamente difundidos en el mundo, constituidos por una corteza de meteorización eminentemente laterítica (ferruginosa), muy poco silicática, eluvial (*in situ*), en forma de manto friable



**MAPA LITOGÉNÉTICO ESQUEMÁTICO DE LA REGIÓN DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA**  
 Lavaut y Agueenko, 2002.  
 Escala 1:65 000

A. Yacimiento Moa occidental; B. Yacimiento Punta Gorda; C. Yacimiento Yagrumajenorte; D. Yacimiento Yagrumaje sur; E. Yacimiento Camarioca este; F. Yacimiento Moa oriental; G. Yacimiento Camarioca norte H. Yacimiento Yagrumaje oeste.

1. Mangle 2. Lateritas eluviales de ultramafitas: modelo laterítico-saprolítico 3. Lateritas eluviales de ultramafitas: modelo laterítico 4. Sedimentos lateríticos: modelo litoral-sedimentario 5. Lateritas eluviales de gabroides 6. Serpentinitas agrietadas 7. Saprolitas serpentínicas 8. Aluvios 9. Fallas.

Figura 1. Mapa esquemático con la distribución de los modelos.

(3-7 m de potencia), superpuesto sobre basamentos peniplanizados y pedimentosos inclinados (15-25°), compuestos por rocas ultramáficas (harzburgita, lherzolita, dunita, serpentinitas antigoríticas), que constituyen las reservas principales conocidas de Fe geotérmico de intemperismo y, en menor proporción, de Ni y Co.

**Escenario tectónico:** Terrenos cerrosos y montañosos, obducidos o platafórmicos, fuertemente erosionados en condiciones de estabilidad tectónica prolongada, habitualmente, con una estructura fallada en bloques neotectónicos o con multiterrazamiento.

**Ambiente deposicional/escenario geológico:** Acumulación en peniplanicies y pedimentos con pendiente inclinada (15-25°), producidos por la erosión y meteorización superficial, generalmente de base re-

gional alta, vinculada con los procesos de formación de suelos por encima del nivel freático.

**Edad de la mineralización:** Desde el Triásico, con preponderancia durante el Mesozoico Superior y Terciario (post-Campaniano-Pleistoceno) La datación se basa en evidencias estratigráficas, paleogeográficas y geomorfológicas.

**Tipos de rocas encajantes / tipos de rocas asociadas:** Los depósitos minerales yacen directamente sobre la superficie de las rocas madre y se asocian casi en su totalidad con lateritas (ocres inestructurales y estructurales lateritizados), donde las saprolitas (semiocres arcillosos y serpentinitas lixiviadas nontronitizadas, limonitizadas parcialmente) no existen o tienen un desarrollo en extremo subordinado, dentro de las cuales es posible separar volúmenes productivos de Fe, Ni y Co.

Las rocas madre fundamentales de este tipo de perfil son ultramafitas poco serpentinizadas (45-60 %) o serpentinitas antigóricas, así como también ultramafitas normales: dunita, harzburgita, wehrlita y sus serpentinitas, ubicadas en geomorfotipos de fuerte drenaje de aguas. Subordinadamente, también se encuentran rocas máficas (en general diques o masas de troctolita, gabro olivínico, gabro normal, norita, raramente plagiogranito). Estas rocas pertenecen a asociaciones ofiolíticas con predominio de ultramafitas (tectonitas, cúmulos ultramáficos y su zona de transición) o macizos máfico-ultramáficos estratiformes platafórmicos.

**Forma del yacimiento:** Cuerpos zonales lenticulares y tabulares irregulares sobre serpentinitas, compuestos por un horizonte laterítico con la ausencia total o casi total de saprolitas, que sólo se hallan en forma de relictos locales dispersos en esta capa litológica. Con frecuencia el horizonte laterítico es medianamente potente (menos de 10 m) y variable por su espesor (50-80 % de variabilidad respecto al valor medio). La potencia productiva niquelífero-cobaltífera tiene 3 m como promedio.

**Textura/estructura:** Los depósitos presentan macrobandeamiento litológico (zonalidad), con predominio de las texturas oolítica, terrosa, cavernosa, amorfa, relictica y fragmentaria. En su estructura predominan, por el tamaño de los granos, las fracciones finas (menor de 0,05 mm).

El horizonte laterítico se subdivide en tres tipos litológicos de menas, los cuales, a su vez, se corresponden con las zonas litológicas de la corteza de intemperismo que componen este tipo de perfil y que son:

1. Ocre Inestructurales con concreciones ferruginosas (OICC).
2. Ocre Inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI).
3. Ocre Estructurales Finales (OEF).

En la saprolita, los Ocre Estructurales Iniciales están ausentes y son frecuentes pequeñas potencias (20-50 cm) de roca madre lixiviada limonitizada y 1-2 m de roca madre agrietada al final del corte.

**Mineralogía de las menas (principal y subordinada):** Los minerales principales de las menas son: oxihidróxidos de hierro (goethita, alumogoethita, maghemita) y de manganeso (asbolanas y wades: psilomelano, todorokita, woodruffita, feitknechtita). Las serpentinas hipergénicas (lizardita, crisotilo, antigorita) y arcillas saponíticas (nontronita, ferri-

saponita, beydelita, ferrihalloysita) se presentan en forma de trazas y pequeños sectores aislados en la base de los ocres o linealmente asociados a diques de dunita, piroxenitas o gabroides olivínicos meteorizados, por lo que la cantidad de oxihidróxidos de hierro alcanza hasta el 80 % de la masa mineral de las menas.

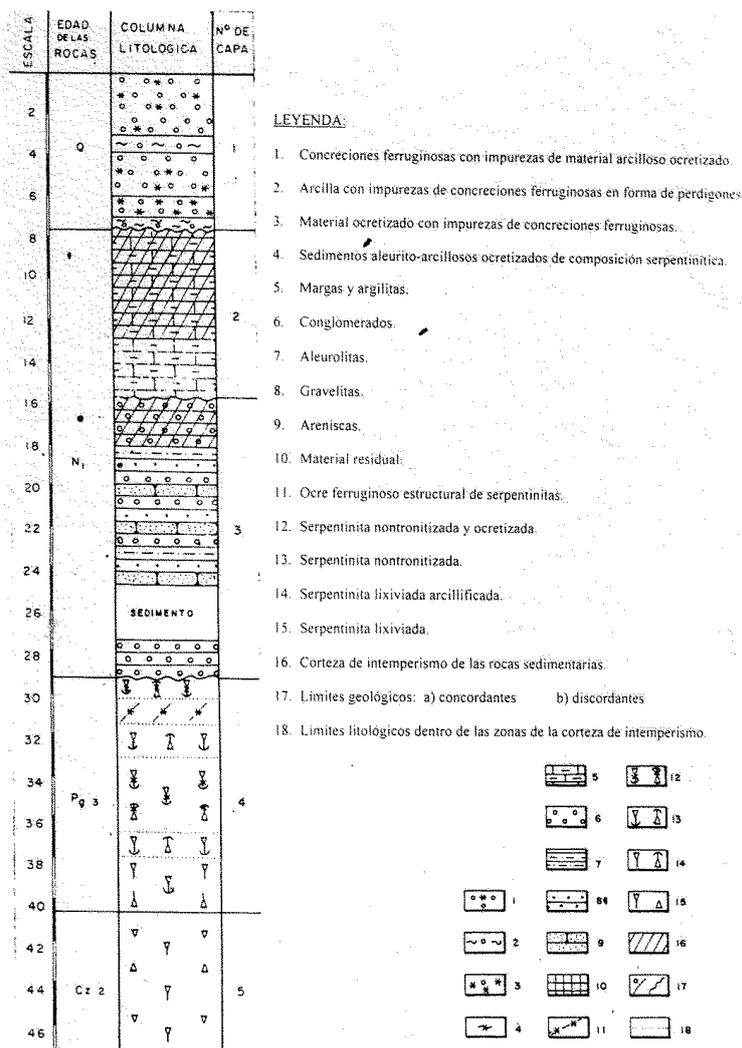
Los minerales subordinados de las menas componen principalmente a las fracciones gruesas, tanto en la laterita como en la saprolita, y están representados por cromoespinela, hematita y magnetita en la laterita; en la saprolita, por fragmentos dispersos relicticos de serpentinita limonitizada, nontronitizada, kerolitizada, serpofitizada, así como por cloritas niquelíferas. En las menas, de conjunto con las fases cristalinas de los minerales, existen importantes fases amorfas que son niquelíferas y cobaltíferas.

La mineralogía de la ganga está compuesta principalmente por concreciones goethítico-hematíticas, gibbsita, cromoespinelas y silicatos primarios o secundarios estériles.

**Intemperismo:** Se manifiesta en forma relevante como intensa maduración de la corteza de intemperismo por la vía de la oxidación de las saprolitas y lateritización de los ocres, hasta llegar a formar ocres inestructurales (sin la fábrica de las rocas madre) en todo el perfil friable de la corteza de intemperismo en algunos sitios, en dependencia de la variación de los factores de intemperismo. También puede ocurrir la erosión parcial o total de los productos del intemperismo localmente.

**Controles de las menas:** El control de las menas es litológico y de acuerdo con su composición se generan dos tipos de menas lateríticas: ferruginosas enriquecidas en níquel, cobalto, cromo y manganeso, que se asocian a litotipos o zonas litológicas inestructurales de la corteza de intemperismo, y ferruginoso-niquelífero-cobaltíferas, asociadas a los ocres estructurales finales y parcialmente a los ocres inestructurales sin concreciones. Las mayores concentraciones de hierro, aluminio y cromo se encuentran en la laterita más superficial (OICC, OI); el cobalto se vincula con las litologías inferiores de la laterita (OI, OEF, principalmente) al igual que el níquel, el que además aparece asociado a las litologías relicticas saprolíticas (OEI y RML sobre todo, así como RMA), aunque estas últimas casi no forman cuerpos minerales.

El níquel en la laterita se asocia a los oxihidróxidos de hierro (goethita, maghemita, magnetita) en la proporción de 60-95 % del total, y en la saprolita se asocia a los silicatos (serpentinatas, arcillas, cloritas) hasta 85 %.



El cobalto casi en su totalidad (80-90 %) se asocia a las psilomelanas, las que también concentran una proporción importante del níquel (10-20 %).

El hierro se asocian a la goethita, maghemita y magnetita; el aluminio, a la gibbsita, y el cromo a las cromoespinelas.

**Modelo genético:** El proceso de meteorización ocurre bajo la acción de tres fenómenos geoquímicos básicos: hidratación, lixiviación e hidrólisis en soluciones naturales químicamente agresivas. La hidratación inicial provoca una intensa serpentinitización de la ultramafita, lo que facilita la lixiviación de los elementos químicos alcalinos y alcalino-térreos (Na, K, Ca, Mg), y del silicio ( $Si^{4+}$ ) de los silicatos, con la acumulación simultánea del resto de los elementos químicos que componen la roca (Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Co, V, Cu, Zn, Zr, Mn, Nb, Ga, Sc, Au, Pt, Pd, y otros), lo cual es típico del

estadio inicial del proceso de intemperismo de las ultramafitas.

El estadio final consiste en la hidrólisis de los productos intermedios del intemperismo, con la generación de ocre (goethitización y gibbsitización) y la redistribución geoquímica de parte de los elementos químicos residuales, que adquieren movilidad total o parcial en este medio geoquímico ( $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ , Mn, Co, Ni, Au, Pt, Pd). Durante la hidrólisis final en medio ácido ( $Ph=3-5$ ), en la parte superior, inestructural, de la corteza de intemperismo, se produce simultáneamente la removilización parcial del  $Fe^{3+}$  y  $Cr^{3+}$  desde la zona de concreciones, concentrándose en la zona infrayacente de los ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas.

Estas regularidades genéticas generales del intemperismo de las ultramafitas presentan diferentes intensidades, lo que denota distintos niveles de

lixiviación del silicio, en dependencia del microclima, condiciones geomorfológicas y quimismo de las rocas madre. A tenor de estas regularidades, los litotipos de la corteza de intemperismo se diferencian intrínsecamente de un yacimiento a otro, lo cual provoca diferencias en las características tecnológicas y potencialidad económica de los yacimientos, incluso dentro de ellos mismos.

La generación de este tipo de depósito de intemperismo ocurre al nivel de las últimas fases de meteorización de las ultramafitas, en condiciones de intenso drenaje de las aguas, posición elevada por encima de la base de erosión local y sobre superficies onduladas o de pendientes medias (15-25°), de cuya acción combinada dependerá la formación de depósitos lateríticos estructurales (con rasgos de la fábrica de las rocas madre en los OEF) o inestructurales (sin esos rasgos y con textura terrosa en OI o terroso-concrecional en los OICC), con lo que surgirán depósitos lateríticos ferroniquelífero-cobálticos o lateríticos ferruginosos, ricos en cromo, cobalto, titanio, aluminio, manganeso y níquel.

**Tipos de yacimiento asociados:** Depósitos de Fe-Ni-Co supergénicos eluviales (*in situ*) con perfil de tipo laterítico y de lateritas redepositadas en los flancos, así como depósitos cromíticos, materiales refractarios y asbesto crisotílico, generalmente ubicados en los complejos ultramáficos de rocas madre concomitantes.

**Comentarios:** Incluye dos subtipos de depósitos, condicionados por particularidades genéticas, que son:

- a) Depósitos lateríticos ferruginosos legados, caracterizados por estar formados por litotipos inestructurales (OICC, OI).
- b) Depósitos lateríticos ferroniquelífero-cobálticos, compuestos por los tres litotipos lateríticos (OICC, OI, OEF).

## GUÍAS DE EXPLORACIÓN

**Rasgos geoquímicos:** Contenidos anómalos de Fe, Ni, Co, Cr, Al, Sc y Mn en suelos pardo-rojizos ferralíticos sobre rocas ultramáficas, así como la presencia de concreciones ferruginosas (ferricreta) y/o esqueletos silíceos (silcreta) en la superficie.

**Rasgos geofísicos:** Anomalías electromagnéticas, magnéticas, gravimétricas y sismoacústicas en cuencas sedimentarias de la periferia de los macizos ultramáficos y sobre zonas cubiertas por vegetación o sedimentos.

**Otras guías de exploración:** Existencia de suelos ferralíticos potentes sobre rocas ultramáficas con mayor cantidad de olivino que de piroxenos. Presencia de bosques naturales de coníferas (pinos), con

lianas y arbustos densos en regiones tropicales o subtropicales desarrollados sobre suelos ferralíticos. Campos de lateritas ubicados en superficies inclinadas (onduladas) con fuerte drenaje de las aguas meteóricas o sobre rocas ultramáficas antigóricas o muy piroxénicas.

## FACTORES ECONÓMICOS

**Ley y tonelaje:** Depósitos de 2-100 millones de toneladas de menas con Fe = 35-60 %; Ni = 0,4-1,25 %; Co = 0,02-0,3 %; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,8-3,5 %; P = 0,06 %; S = 0,1 %.

**Limitaciones económicas:** Heterogeneidad tecnológica interna de los depósitos con contenidos variables de hierro, cromo, níquel, sílice, manganeso, cobalto y aluminio, por lo que usualmente las menas requieren de prebeneficio metalúrgico (mezcla, tamizaje, molienda, etc.) y explotación selectiva. Los costos medioambientales son significativos, incluyendo el relleno y recultivación de suelos.

**Usos finales:** Mineral de hierro, níquel, cobalto y cromo para la obtención de aceros legados naturalmente o especiales con beneficio metalúrgico previo (descromado y otras vías).

**Importancia:** Contienen grandes cantidades de hierro y constituyen una de las principales reservas de Ni y la fundamental de Co.

## MODELO DESCRIPTIVO DE DEPÓSITOS DE Fe-Ni-Co LATERÍTICO-SAPROLÍTICOS

**Nombre:** Depósitos Fe-Ni-Co laterítico-saprolíticos.

**Sinónimos:** Menas óxido-silicáticas de níquel; depósitos niquelíferos limonítico-serpentínicos; perfil laterítico-nontronítico; perfil completo.

**Productos y subproductos:** Fe, Ni, Co (Cr, corrector de cemento, lacas y pinturas).

**Ejemplos:** Punta Gorda, Las Camariocas, Moa, Piloto, Yagrumaje (Moa, Cuba); Buruktalsk (Rusia); Kimpersay (Kazajastán); Greenvale, Bulong (Australia); Soroako (Indonesia); Kastoria (Grecia); La Gloria (Guatemala); Barro Alto, Niquelandia (Brasil).

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

**Descripción resumen:** Son los depósitos supergénicos de Fe-Ni-Co más difundidos mundialmente, constituidos por una corteza de meteorización ferruginoso-silicática eluvial (*in situ*), en forma de un potente manto friable (10 m promedio), superpuesto sobre basamentos peniplanizados ultramáficos serpentinizados (sobre todo harzburgita, lherzolita, dunita) que constituyen las reservas principales de menas de Fe-Ni-Co de intemperismo conocidas.

**Escenario tectónico:** Terrenos cerrosos y montañosos obducidos o platafórmicos muy fuertemente

erosionados en condiciones de estabilidad tectónica prolongada, frecuentemente con una estructura fallada en bloques neotectónicos.

**Ambiente deposicional/escenario geológico:** Acumulación en peniplanicies y pedimentos con pendiente suave (5-25°), producidos por la erosión y meteorización superficial en general de base regional alta, vinculada con los procesos de formación de suelos.

**Edad de la mineralización:** Generalmente desde el Triásico, con preponderancia durante el Mesozoico Superior y Terciario (post-Campaniano-Pleistoceno). La datación se basa en evidencias estratigráficas, paleogeográficas y geomorfológicas.

**Tipos de rocas encajantes/tipos de rocas asociadas:** Los depósitos minerales yacen directamente sobre la superficie de las rocas madre y se asocian con lateritas (ocres inestructurales y estructurales) y saprolitas (semiocres arcillosos y serpentinitas lixiviadas nontronitizadas limonitizadas parcialmente), dentro de las cuales es posible separar volúmenes productivos de Fe, Ni y Co.

Las rocas madre fundamentales de este tipo de perfil son ultramafitas con alto contenido de olivino (50-100 %): dunita, harzburgita, wehrlita y sus serpentinitas, con subordinación de rocas máficas (por lo general, diques o masas de troctolita, gabro olivínico, gabro normal, norita, raramente plagiogranito). Estas rocas pertenecen a asociaciones ofiolíticas con predominio de ultramafitas (tectonitas, cúmulos ultramáficos y su zona de transición o macizos máfico-ultramáficos estratiformes platafórmicos).

**Forma del yacimiento:** Cuerpos zonales lenticulares y tabulares irregulares sobre serpentinitas, compuestos por un horizonte laterítico superficial y otro saprolítico más profundo. Frecuentemente, el horizonte laterítico es más potente y continuo, mientras que el saprolítico es menos potente y más variable, aunque algunos depósitos presentan esta proporción a la inversa, e.g. Nueva Caledonia, San Felipe (Cuba).

La potencia de los cuerpos con frecuencia fluctúa entre 1 y 25 m (hasta 50-150 m en caso de cortezas lineales), y cobre extensas áreas (en general, cientos de kilómetros cuadrados o lineales). La potencia productiva níquelífero-cobaltífera generalmente es 5-10 m. La variabilidad de la potencia y tonelaje puntuales es compatible con cuerpos irregulares (50-120 % de fluctuación respecto al valor medio).

**Textura/estructura:** Los depósitos presentan macrobandeamiento litológico (zonalidad) con predominio de las texturas oolítica, terrosa, cavernosa, amorfa, relicta y fragmentaria. Por el tamaño de los granos, predominan en su estructura las fracciones fina (menor de 0,05 mm) y arcillosa.

Los horizontes laterítico y saprolítico, internamente se subdividen cada uno en tres tipos litológicos de menas que, a su vez, se corresponden con las seis zonas litológicas de la corteza de intemperismo que componen este tipo de perfil. Estos tipos litológicos de menas son:

- a) En la laterita: Ocres Inestructurales con concreciones ferruginosas, Ocres Inestructurales sin concreciones ferruginosas y Ocres Estructurales Finales.
- b) En la saprolita: Ocres Estructurales Iniciales, Roca Madre Lixiviada y Roca Madre Agrietada.

**Mineralogía de las menas (principal y subordinada):** Los minerales principales de las menas son: oxihidróxidos de hierro (goethita, alumogoethita, maghemita) y de manganeso (asbolanas y wades: psilomelano, todorokita, woodruffita, feiticnechtita, serpentinas hipergénicas) (lizardita, crisotilo, antigorita, bastita, kerolita, pimelita, garnierita, revdinskita, nepuita), y arcillas saponíticas (nontronita, ferrisaponita, beydellita).

Los minerales subordinados de las menas componen principalmente a las fracciones gruesas, tanto en la laterita como en la saprolita, y están representados por cromoespinela, hematita y magnetita en la laterita; en la saprolita son fragmentos relicta de serpentinita limonitizada, nontronitizada, kerolitizada, serpoftizada, así como shamosita y cloritas níquelíferas hidratadas.

En las menas, conjuntamente con las fases cristalinas de los minerales, existen importantes fases amorfas de los mismos que son níquelíferas y cobaltíferas.

La mineralogía de la ganga está compuesta principalmente por concreciones goethítico-hematíticas, gibbsita, cromoespinelas y silicatos primarios o secundarios estériles.

**Intemperismo:** Se manifiesta en forma relevante y conduce a la maduración o ulterior crecimiento de la corteza de intemperismo, en dependencia de la variación de los factores de intemperismo, así como a la erosión parcial o total de los productos del intemperismo localmente. Usualmente, si el depósito sufrió enterramiento, se forman minerales supergénicos infiltrativos como shamosita, siderita, millerita, manganocalcita, rodocrosita, piritita y otros, surgidos en condiciones subaeriales.

**Controles de las menas:** El control de las menas es litológico, por lo que este tipo de perfil produce dos tipos composicionales de menas: laterítica y saprolítica, que se asocian a seis litotipos o zonas litológicas de la corteza de intemperismo.

Las mayores concentraciones de hierro, aluminio y cromo se controlan por la laterita más superficial

## Columna litológica resumen del modelo laterítico: yacimiento Las Luces, Cuba

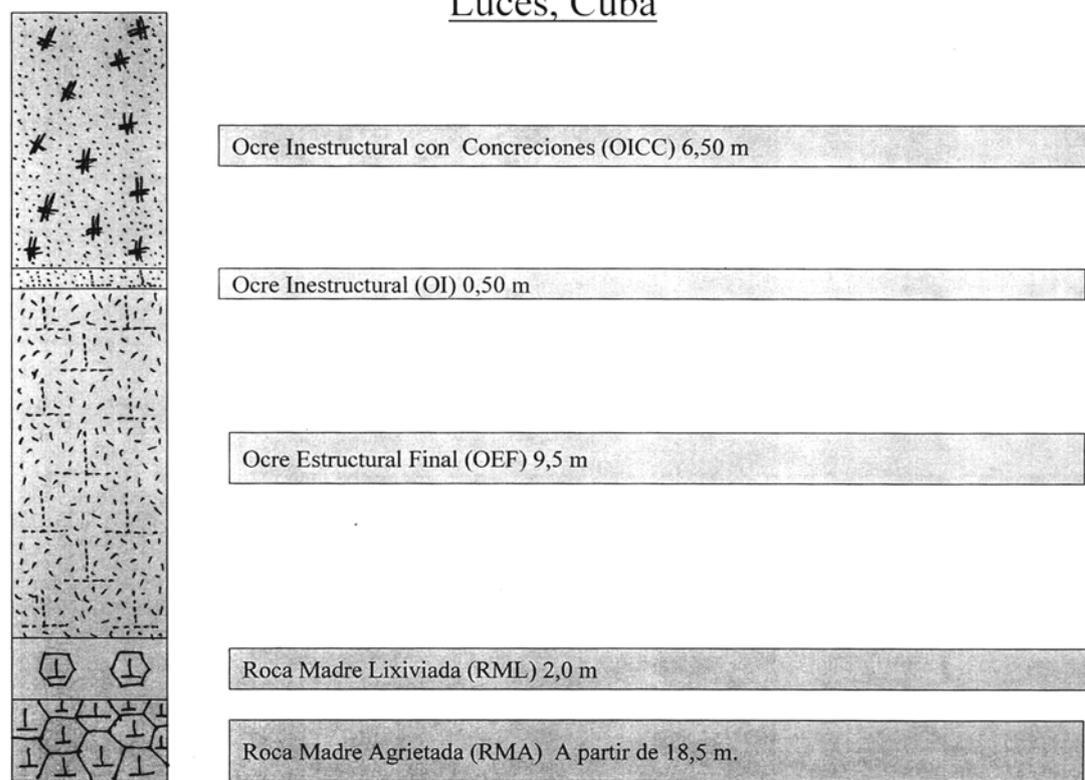


Figura 3. Columna del modelo laterítico saprolítico.

(OICC, OI); el cobalto, por las litologías inferiores de la laterita (OI, OEF, principalmente), y el níquel por éstas últimas (OI, OEF sobre todo), así como por las litologías saprolíticas (OEF y RML principalmente, y RMA). La mayor concentración de níquel se asocia al litotipo OEI y la de cobalto al litotipo OEF.

El níquel en la laterita se asocia a los oxihidróxidos de hierro (goethita, maghemita, magnetita) en la proporción de 60-95 % del total, y en la saprolita, a los silicatos (serpentin, arcillas, cloritas) hasta 85 %.

El cobalto casi totalmente (80-90 %) se asocia a las psilomelanas, las que también concentran una proporción importante de níquel (10-20 %).

El hierro, aluminio y cromo se asocian, respectivamente, a los minerales siguientes: el hierro en las goethita, maghemita y magnetita; el aluminio, en la gibbsita y el cromo en las cromoespinelas.

**Modelo genético:** El proceso de generación meteórica de las zonas litológicas ocurre bajo la acción de tres fenómenos geoquímicos básicos: hidratación, lixiviación e hidrólisis en soluciones naturales químicamente agresivas. La hidratación inicial provoca una intensa serpentinización de la ultramafita, lo cual facilita la lixiviación de los elementos químicos alcalinos y alcalino-térreos (Na,

K, Ca, Mg), y del silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) de los silicatos, con la acumulación simultánea del resto de los elementos químicos que componen la roca: Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Co, V, Cu, Zn, Zr, Mn, Nb, Ga, Sc, Au, Pt, Pd, y otros), lo que es típico del estadio inicial del proceso de intemperismo de las ultramafitas.

El estadio final consiste en la hidrólisis de los productos intermedios del intemperismo, con la generación de ocre (goethitización y gibbsitización) y la redistribución geoquímica de parte de los elementos químicos residuales, que adquieren movilidad total o parcial en este medio geoquímico ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , Mn, Co, Ni, Au, Pt, Pd). Durante la hidrólisis final en medio ácido ( $\text{pH}=3-5$ ), en la parte superior inestructural de la corteza de intemperismo, se produce la removilización parcial del  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  paralelamente desde la zona de concreciones, concentrándose en la zona infrayacente de los ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas.

Estas regularidades genéticas generales del intemperismo de las ultramafitas presentan diferentes intensidades, lo que denota distintos niveles de lixiviación del silicio, en dependencia del microclima, condiciones geomorfológicas y quimismo de las rocas madre. A tenor de estas regularidades, los litotipos

de la corteza de intemperismo se diferencian intrínsecamente de un yacimiento a otro, esto provoca diferencias en las características tecnológicas y potencialidad económica de los yacimientos, incluso dentro de ellos mismos.

**Tipos de yacimiento asociados:** Depósitos Fe-Ni-Co supergénicos eluviales (*in situ*) con perfil de tipo laterítico y de lateritas redepositadas en los flancos, así como depósitos cromitíticos, materiales refractarios y asbesto crisotílico, generalmente ubicados en los complejos ultramáficos de rocas madre concomitantes.

**Comentarios:** Incluye subtipos raros, condicionados por particularidades genéticas, tales como:

- a) Depósitos laterítico-saprolíticos por conglomerados carbonatado-terrágenos polimícticos (con clastos en su mayoría de rocas ultramáficas y subordinadamente máficas) como el yacimiento níquelífero Martí (Cuba);
- b) Depósitos lineales de grietas y grieta-contacto de ultramafitas con rocas carbonáticas y silicáticas (Elizabetínsk-sur de los Urales; Lípovsk, Buryktálskoye, Novo-Buránovsk, Rusia y algunos depósitos en Ucrania);
- c) Depósitos laterítico-saprolíticos eluviales enterrados (sepultados por debajo de sedimentos estratigráficamente más jóvenes), como el depósito Devladóvsk (Urales, Rusia) con 15-25 m de ocre y nontronitas, cubiertos por 70-100 m de sedimentos paleogénicos (caolines, arenas negras y arcillas con capas de lignito, arenas blancas), neogénicos (arcillas grises y arenas) y cuaternarios. Otros depósitos de este subtipo se encuentran en las regiones de Ufaliey, Jalílovo y Kimpersay (Rusia), con una corteza laterítico-saprolítica de edad pre-Jurásico cubierta por sedimentos del Jurásico Medio y Superior, Cretácico y Terciario; también son conocidos en Grecia y Yugoslavia.

## GUÍAS DE EXPLORACIÓN

**Rasgos geoquímicos:** Contenidos anómalos de Fe, Ni, Co, Cr, Sc y Mn en suelos pardo-rojizos ferralíticos sobre rocas ultramáficas, así como la presencia de concreciones ferruginas (ferricreta) y/o armazones-esqueletos-silícicos (silcreta) en la superficie.

**Rasgos geofísicos:** Anomalías electromagnéticas, magnéticas, gravimétricas y sismoacústicas en cuencas sedimentarias de la periferia de los macizos ultramáficos y sobre zonas cubiertas por vegetación o sedimentos

**Otras guías de exploración:** Existencia de suelos ferralíticos potentes sobre rocas ultramáficas con

mayor cantidad de olivino que piroxenos, así como la existencia de cuencas superpuestas en complejos ofiolíticos obducidos y grabens colindantes con macizos ultramáficos platafórmicos. Presencia de bosques naturales de coníferas (pinos), con lianas y arbustos densos en regiones tropicales o subtropicales desarrollados sobre suelos ferralíticos.

## FACTORES ECONÓMICOS

**Ley y tonelaje:** Depósitos de 2-200 millones de toneladas de menas con Fe = 10-50 %; Ni = 0,4-3 % (3-12 % en cortezas lineales); Co = 0,02-0,15 %; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,8-3,5 %.

**Limitaciones económicas:** Heterogeneidad tecnológica interna de los depósitos con contenidos variables de magnesio, sílice y aluminio, por lo que usualmente las menas requieren de prebeneficio metalúrgico (mezcla, tamizaje, molienda) y explotación selectiva. En algunos depósitos tienen altas proporciones de escombros. Los costos mediambientales son significativos, incluyendo el relleno y recultivación de suelos

**Usos finales:** Mineral de hierro, níquel, cobalto y cromo para la obtención de aceros legados naturalmente o especiales con beneficio metalúrgico previo (descromado y otras vías)

**Importancia:** Depósitos de primordial importancia por constituir una de las principales reservas de níquel y cobalto.

## MODELO DESCRIPTIVO DE DEPÓSITOS Fe-Ni-Co SEDIMENTARIOS LITORALES

**Nombre:** Depósitos Fe-Ni-Co sedimentarios litorales.

**Sinónimos:** Lateritas redepositadas; hierro oolítico-pisolítico sedimentario; hierro shamosítico.

**Productos y subproductos:** Fe, Ni, Co, Cr.

**Ejemplos:** Punta Gorda (Moa, Cuba); Shaytantassk (Kazajastán); Aydirlinsk (Urales, Rusia); Orsko-Halilovsk (Urales, Rusia).

## CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

**Descripción resumen:** Depósitos friables arcillosos shamosítico-goethíticos lenticulares y tabulares irregulares dentro de secuencias arcillosas carbonatadas y terrígenas, formados en ambientes costeros marinos y lacustres.

**Escenario tectónico:** Cuencas sedimentarias superpuestas en terrenos ofiolíticos obducidos o relacionados con grabens.

**Ambiente deposicional:** Erosión y transportación a corta distancia por las aguas (hasta 4-5 km) de los productos del intemperismo superficial *in situ* (principalmente eluviales), con su deposición y sedimentación subaérea en el *shelf* marino, mares cerrados, lagos y lagunas.

**Edad de la mineralización:** Jurásico-Inferior hasta (Oligoceno?) Mioceno-Cuaternario. La datación de la edad geológica se realizó por polinología y microfauna (*Archaias angulatus Fitchell Moll*, *Elphidium puertorricence gall Hemingway*, *Amphistegina lessoni d'Orbigny*, miliólidos, ostrácodos y otros) en los depósitos terciarios; en los depósitos triásicos fue estratigráficamente.

**Tipos de rocas encajantes/tipos de rocas asociadas:** Los depósitos minerales yacen directamente sobre la superficie de serpentinitas o se enmarcan dentro de arcillas, calizas, margas, conglomerados, areniscas, aleuritas, esquistos y material laterítico.

**Forma del yacimiento:** Lentes y cuerpos tabulares irregulares sobre serpentinitas, esquistos o rodeadas por arcillas con fragmentos de serpentinitas, calizas silicificadas, margas, aleuritas, areniscas; puede existir aterrazamiento marino. La potencia de los depósitos fluctúa entre 5 y 30 m con una extensión lateral de hasta 2-3 km<sup>2</sup>.

**Textura/estructura:** Fragmentaria con estratificación rítmica oblicua o normal. La potencia de los estratos fluctúa entre 0,5-6 m, predominando la estratificación fina. Las capas se caracterizan por diferente coloración, con predominio del rojo y el amarillo en el material más ocreo, y el abigarrado en el más arcilloso, pasando por las tonalidades verdosas. Frecuentan las concreciones goethítico-hematíticas con variados tamaños, que alcanzan hasta 3 cm en las capas más superficiales.

**Mineralogía de las menas (principal y subordinada):** Goethita, asbolana, wades, pirolusita, nontronita y silicatos níquelíferos (nontronita, shamosita, hidroclorita; cromoespinelas, como minerales principales.

Tienen menor difusión los sulfuros níquelíferos epigenéticos, que se encuentran dentro de las arcillas en forma de concreciones, venillas, costras, granos y diseminaciones muy finas de cristales de sulfuros (marcasita, melnikovita, pirita, bravowita, viollarita y millerita), así como goethita hidratada, magnetita, leptoclorita, gibbsita, siderita, manganocalcita y material coloidal, precipitados químicamente, que se recrystalizan a clorita e hidrargilita.

La mineralogía de la ganga consiste principalmente en carbonatos y silicatos, incluyendo además arcillas ligníferas en el techo de los depósitos.

**Intemperismo:** Caolinización parcial de las arcillas; limonitización de las margas y de los sulfuros, y cementación superficial local de las concreciones goethítico-hematíticas, lo que conduce a una redistribución leve de los elementos químicos, sin llegar a formar una zonalidad geoquímica expresa, como existe en las cortezas de intemperismo primarias *in situ* (eluviales).

**Control de las menas:** Litológico-estratigráfico, relacionado con la composición mineral de las capas litológicas que componen el depósito, y son meníferas cuando predominan los oxihidróxidos de hierro, cromo o manganeso, así como silicatos níquelíferos.

**Modelo genético:** Erosión, traslado y redeposición en aguas someras de los materiales del intemperismo supergénico de complejos de rocas máfico-ultramáficas.

**Tipos de yacimiento asociados:** Depósitos Fe-Ni-Co hipergénicos eluviales (*in situ*), incluyendo los parcialmente erosionados.

**Comentarios:** Incluye los subtipos de depósitos con: a) menas ferruginosas; b) menas ferruginosas níquelífero-cobálticas; c) menas cobálticas, y d) menas ferruginosas cromíticas.

## GUÍAS DE EXPLORACIÓN

**Rasgos geoquímicos:** Contenidos anómalos de Fe, Ni, Co, Cr y Mn, en paquetes sedimentarios de la periferia de los macizos ultramáficos.

**Rasgos geofísicos:** Anomalías electromagnéticas y magnéticas en cuencas sedimentarias de la periferia de los macizos ultramáficos

**Otras guías de exploración:** Existencia de cuencas superpuestas en complejos ofiolíticos obducidos y grabens colindantes con macizos ultramáficos.

## FACTORES ECONÓMICOS

**Ley y tonelaje:** Depósitos de 20-100 millones de toneladas de menas con Fe = 30-50 %; Ni = 0,4-1,3 %; Co = 0,02-0,1 %; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,8-3,5 %.

**Limitaciones económicas:** Heterogeneidad composicional y altos contenidos de azufre, sílice y cromo. Las menas requieren de beneficio metalúrgico.

**Usos finales:** Mineral de hierro, níquel, cobalto y cromo para la obtención de aceros legados naturalmente o especiales con beneficio metalúrgico previo (descromado y otras vías).

**Importancia:** Depósitos de segunda importancia por su mayor complejidad tecnológica y limitada difusión.

## CONCLUSIONES

Los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co de Cuba se pueden agrupar según tres modelos descriptivos que son:

1. Yacimientos con perfil laterítico.
2. Yacimientos con perfil laterítico-saprolítico.
3. Yacimientos redepositados.

## AGRADECIMIENTOS

A los integrantes del Grupo de Níquel de la Empresa Geominera de Oriente del MINBAS, que contribuyeron

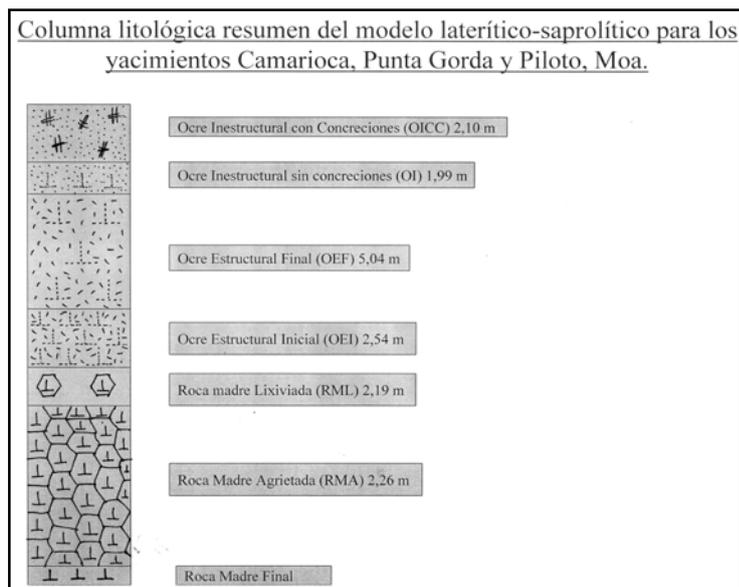


Fig. 4. Columna del modelo sedimentario-litoral de Punta Gorda.

decisivamente con las informaciones sobre los modelos descriptivos de los yacimientos lateríticos, y a los especialistas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, por su inestimable ayuda en los comentarios, sugerencias y redacción final de este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIOSA IZNAGA, J.D.: *Curso de yacimientos minerales metálicos: tipos genéticos*, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1977.
- ARIOSA I., J.D. Y M. R. DÍAZ: "Modelos de yacimientos minerales: tipologías y aplicaciones", *Minería y Geología*, XVIII (2) : 3-12, 2001.
- BARKER, W. W, S. A. WELCH Y J. F. BANFIELD: "Biochemical weathering of silicate minerals", *Reviews in Mineralogy*, vol. 35, 1997.
- BIRKELAND P. W.: *Pedology, weathering and geomorphological research*, Oxford Univ. Press, 1974.
- BUCHANAN F.: *A journey from Madras through the countries of Mysore, Kanara and Malabar*, pp. 440-441, East India Company, London, 1807.
- COBAS BOTÉY R. MA., W. LAVAUT COPA, N. DESPAIGNE BUENO: "Modelos geológicos de yacimientos lateríticos cubanos", Tercer Congreso de Geología y Minería, Geomin 98, La Habana, Cuba, 1998.
- DE SWARDT, A. M. J.: "Laterisation and landscape development in parts of equatorial Africa", *Zeits für Geomorph*, 8 :313-33, 1964.
- DE VETTLER D. R.: "How Cuban Nickel ore was formed: a lesson in laterite genesis?", *Engineering and Mining Journal*, 156 (10) :84-87, 1955.
- : "La génesis de los minerales lateríticos de níquel en el Este de Cuba", 1953 Doc. 1708 -ONRM Moa.
- GOLIGHTLY, J. P.: "Nickeliferous laterite deposits", *Economic Geology*, 75 th Anniversary, vol. :710-735, 1981.
- HARDER, E. C.: "Examples of bauxites deposits, illustrating variations in origin. In Problems of clays and laterite origin" (Symp) *Amer. Inst. Mins. Metall*, 35-64, 1952.
- HARRASOWITZ, H.: *Laterites*, Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1926.
- KUCK, P. H.: Mineral Commodity Sumaries, USGS, Jan 2002.

LAVAUT COPA, W.: "Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental", *Minería y Geología* XV(1) : 9-16, 1998.

-----: "Control litológico-mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramafitas del campo mineral Yacimientos Punta Gorda, Las Camariocas y Piloto". Tesis Doctoral, Instituto de Exploración Geológica de Moscú, URSS, 1987.

LEFEBURE, D. Y G. RAY, eds.: *Selected British Columbia mineral deposit profiles*, vol. I: Metallics and Coal. Open File 1995-20, Updated February, 2000, <http://www.em.gov.bc.ca>

LIMA COSTA M.: "Laterization as a major process of ore deposits formation in the Amazon region", *Explor. Mining Geol.* 6(1) :79-104, 1997.

MARTINI I. P., W. CHESWORTH, eds.: *Weathering, soils, and paleosoils. Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, Amsterdam, 1992.

MC MILLAN W.: "Recursos de níquel de Cuba". Doc. 1708, File No.8, ONRM-Moa, 1955.

MONTTOULIEU E. I., ABALO L. J.: "Tendencia sobre el aspecto tecnológico de la explotación de los minerales lateríticos de Moa". Doc. 1708, File No. 7, ONRM-Moa, 1957.

NAHON, D. B., B. BOULANGE Y B. COLIN: "Metallogeny of weathering: an introduction", en I. P. Martini, W. Chesworth, eds.: *Weathering, soils and paleosoils. Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, Amsterdam, 1992.

NIKITINA, A. P., I.V. VITOVSKAYA Y K. K. NIKITIN: *Regularidades mineralógicas y químicas de los perfiles y yacimientos minerales de las cortezas de meteorización*, 88 pp., Nauka, Moscú, 1971 [en ruso].

OLLIER, C. D.: *Weathering*, 2 ed., Longman, London, 1975.

PEDRO, G.: "Distribution des principaux types d'alteration chimique a la surface du globe", *Revue de Geographie et de Geologie dynamique*, 1085 :457-470, 1968.

ROBERT, M, D. TESSIER: "Incipient weathering: some new concepts on weathering, clay formation and organization", en I. P. Martini y W. Chesworth, eds.: *Weathering, soils and paleosoils, Developments in Earth Surface Processes*, p. 71, Elsevier, Amsterdam, 1992.

RODRÍGUEZ-CLEMENTE, R Y Y. TARDY: *Geochemistry and mineral formation in the earth surface*, CSIC-CNRS, España-Francia, 1987.

SMIRNOV, V.I.: *Geología de yacimientos minerales*, Mir, Moscú, 1982.

TARDY, Y.: "Diversity and terminology of lateritic profiles", en I. P. Martini y W. Chesworth, eds.: *Weathering, soils and paleosoils, Developments in Earth Surface Processes*, p. 379, Elsevier, Amsterdam, 1992.

THOMAS, M.F.: *Tropical geomorphology: a study of weathering and landforms development in warm climates*, McMillan, London, 1974.

TRESCASES, J. J.: "L'évolution géochimique supergène des roches ultrabásiques en zone tropicale; formations des gisements nickélifères de Nouvelle-Calédonie", Paris. ORSTOM Mem 78, 1975.

-----: "Nickeliferous laterites: a review on the contribution of the last ten years". Geological Survey of India. Memoirs 120, pp. 51-62, 1986.

VITOVSKAYA, I.V.: "Nickel mineral points and concentration mechanism in lateritic deposits", en A. Barto-Kiriakidis, ed.: *Weathering: its products and deposits*, vol. II, pp. 147-169, Teophrastus Publ. S.A., 1989.

WEBBER, B.N.: "Supergene nickel deposits", *AIME Trans.* 252 :333-347, 1972.

WHITE, A. F. Y S. L. BRANTLEY: "Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview", *Reviews in Mineralogy*, 31 :1-23, 1995.