

# LA MODELACION DESCRIPTIVA EN EL EJEMPLO DE LOS YACIMIENTOS LATERÍTICOS DE CUBA ORIENTAL

(RESUMEN DE TESIS DOCTORAL / 2002)

**José Daniel ARIOS-IZNAGA<sup>†</sup>**

Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico.

## INTRODUCCION

### **Novedad y actualidad del tema**

Los suelos agrícolas pueden ser restaurados para devolverles la fertilidad que les permita a las plantas y a los animales, el hombre incluido, utilizar sus productos; es más: algunos residuales estériles se pueden reforestar, pero un yacimiento mineral de cualquier tipo, metálico, no metálico o combustible sea sólido, líquido o gaseoso, una vez que ha sido agotado, no se puede reponer ni se puede regenerar. Son simplemente recursos naturales no renovables. La velocidad a la que estos recursos se están utilizando y consumiendo, crece de manera constante y alarmante, en muchos casos indiscriminadamente, en las sociedades industrializadas de consumo.

Considerando lo errático y a veces la forma aparentemente caprichosa en que se han formado los yacimientos minerales en la corteza terrestre: ¿cuál es el estado actual de las reservas mundiales de los minerales sólidos metálicos y no metálicos?

El consumo de minerales está creciendo en una proporción sensiblemente mayor que la tasa de incremento de la población mundial; no sólo hay mas poblaciones que consumen recursos minerales, sino que el promedio de consumo por persona tiene diferentes patrones debido a la distribución desigual de la riqueza en el mundo actual, donde existen sensibles diferencias entre unos pocos países industrializados y desarrollados y otros muchos países subdesarrollados.

Esta contradicción es más impactante cuando vemos que generalmente los primeros, no poseen la mayoría de los recursos minerales que consumen, es decir, son importadores netos de minerales y si poseen algunos de esos recursos, los conservan

como reserva nacional para su planeamiento estratégico o para mover la balanza de los precios en la economía mundial a su favor.

Un ejemplo claro: del grupo de las grandes potencias mundiales sólo Rusia y Canadá poseen recursos y reservas mundiales de níquel. El resto de los países desarrollados industrializados exportan muchos equipos y manufacturas con níquel contenido que importan desde los países productores del Tercer Mundo como Nueva Caledonia, Indonesia y Cuba, entre otros (Minerals Yearbook, 1988).

Los países desarrollados e industrializados concentran el 16 % de la población mundial pero consumen el 70 % del Al, Cu y Ni, el 58 % del petróleo, el 48 % del gas natural y el 37 % del carbón mundiales. (Kesler, 1994)

La crisis actual reside en que nuestra civilización está basada en los recursos minerales. La mayor parte de las máquinas, mecanismos y medios que forman parte de la calidad de vida están confeccionados con metales y movidos por la energía procedente de los combustibles fósiles. La producción de alimentos a gran escala para las poblaciones urbanas depende de la utilización de fertilizantes. Los edificios donde vivimos y trabajamos están fabricados casi totalmente de minerales y sus productos que son extraídos desde la corteza terrestre.

Si la población mundial crece tan rápidamente como lo indican los estudios y las tendencias actuales, la presión para descubrir y producir minerales será enorme. Los factores que controlan la disponibilidad de minerales, según Kesler (1994), son cuatro:

- Geológicos: nuestro suministro de minerales proviene de los yacimientos minerales que tienen dos características geológicas que los convierten en un reto real para la civilización moderna: en primer término, casi todos son no renovables, pues se formaron en procesos geológicos que son incomparablemente más lentos que la velocidad a la que son consumidos; en segundo lugar, el valor del lugar donde se encuentran localizados, pues nosotros no podemos decidir dónde deben estar para una mejor extracción, sino que esa decisión la toma la naturaleza. Además la distribución de los yacimientos es aleatoria en el espacio por más que sus regularidades están condicionadas por la geología del lugar donde están encajados u hospedados.
- Ingenieriles: ellos afectan a la disponibilidad de minerales tanto en los aspectos técnicos como económicos. Las limitaciones técnicas se presentan cuando no podemos hacer algo con los minerales independientemente de nuestros deseos y necesidades. Por ejemplo la extracción de una Mena a una

profundidad tal que no existen métodos de minería adecuados para ello. Los factores económicos limitan la disponibilidad de minerales cuando juzgamos el costo de un proyecto como demasiado alto y simplemente tenemos que abandonarlo.

- Ambientales: afecta la disponibilidad en dos sentidos fundamentales. El primero es la contaminación que está asociada con la extracción y procesamiento o beneficio de los minerales y el segundo, con el compromiso de las naciones para proteger el ambiente global, lo cual conduce a consideraciones de tipo ético al no generar procesos que puedan ser dañinos para el medio.
- Económicos: están determinados por el binomio suministro/demanda y el análisis costo/beneficio. Lo cierto es que el impacto sobre la economía global de los minerales combustibles es de 700 millones de millones y de los metales 500 millones de millones (MMusd) anuales. Compárese con la producción de ganado 570 MMusd, arroz 150 MMusd, Trigo 80 MMusd y azúcar 25 MMusd anuales (U.S. Bureau of Mines, Mineral Commodity Summaries, 1992)

De acuerdo con la mayoría de los estudios de pronóstico sobre los recursos minerales, los que están reconocidos como vitales no se agotarán en este siglo XXI, pero algunos tienen ya una existencia física limitada a varias décadas si es que no se localizan nuevas reservas.

Sin embargo, raramente los recursos naturales se agotan en su totalidad; lo que ocurre con más frecuencia es que su extracción se abandona como resultado de las variaciones en los costos y los precios de los productos finales. Con mucha regularidad sucede que la elevación de los precios determina la demanda y uso de estos productos minerales finales, hasta un punto en que la explotación minera cesa virtualmente y se comienza a pensar en su sustitución por nuevos minerales (Berry et al. 1993).

A medida que se produce el agotamiento de estos recursos minerales, los Geólogos tienen la tarea de descubrir nuevos yacimientos en condiciones más difíciles y complejas, a mayor profundidad y los mineros, la de explotar reservas de peor calidad y en localidades cada vez más difíciles, remotas e inaccesibles.

La mayoría de los recursos naturales están distribuidos de una manera muy desigual en la corteza terrestre; este esquema o patrón espacial aparentemente errático, es el resultado de los procesos físicos, químicos y geológicos que provocan la

formación de los yacimientos minerales en un punto determinado de la corteza terrestre y no en otro. Sin embargo, como han señalado los más prestigiosos científicos de la geología de los yacimientos minerales, la ubicación de uno u otro cuerpo mineral en la corteza terrestre no es aleatoria, sino que obedece a leyes que se reflejan en las características y regularidades geológicas de uno u otro territorio, así como a los procesos de formación de menas que son consecuencia de lo primero.

El Programa de Modelación de Yacimientos se inició en 1983 con la finalidad de promover técnicas de avanzada en la exploración y evaluación de los recursos minerales con vistas a apoyar el desarrollo sostenible de los países en desarrollo. Es un programa conjunto de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

La modelación de yacimientos es el proceso de ordenar sistemáticamente la información sobre los yacimientos de un tipo determinado y sus ambientes, con la finalidad de definir y describir sus atributos esenciales. Ella es una integración poderosa del conocimiento y la técnica en la Geología Económica y es una de las herramientas disponibles más poderosas para comprender y conocer la localización espacial de los yacimientos minerales y dónde se podrían encontrar otros.

El incremento de la eficiencia y la eficacia de los métodos de prospección y exploración de los yacimientos se encuentra en el centro de los desarrollos científicos actuales que participan en el proceso de descubrir nuevos recursos minerales, su evaluación y la creación de nuevas reservas minerales apoyados en:

- La utilización intensiva de diferentes tipos de modelos de yacimientos minerales: descriptivos, genéticos, de ley y tonelaje, de probabilidad de ocurrencia, de expresión geofísica, geoambientales, como base para el pronóstico metalogénico y delimitar las áreas perspectivas para realizar trabajos de exploración detallados con vistas al descubrimiento de nuevos yacimientos minerales o incrementar las reservas con nuevos cuerpos en los yacimientos ya descubiertos.
- El desarrollo, perfeccionamiento y aplicación extensiva del complejo racional de métodos geofísicos de exploración en dependencia de las características geológicas de los territorios y de los minerales a investigar.
- Las técnicas analíticas de alta resolución y fiabilidad con elevada precisión en los resultados para determinar la calidad de los materiales.

- Las investigaciones con técnicas de teledetección interconectados con Sistemas de Información Geográficos (SIG) de diferentes tipos para la evaluación de los territorios y el descubrimiento de grandes estructuras favorables para la mineralización entre otros aspectos.
- Las técnicas de computación avanzada aplicadas a la simulación, procesamiento y evaluación de la información geológica a veces en tiempo real.
- Los nuevos y más eficientes métodos de explotación de los yacimientos, de beneficio y concentración de minerales, así como del procesamiento metalúrgico de la materia prima mineral donde ya participan compuestos químicos y biológicos activos y tecnologías como la extracción por solventes.

La propuesta de desarrollar la Modelación de Yacimientos a partir de la información existente en Cuba sobre nuestros yacimientos y transformarlos, en una primera etapa, en modelos descriptivos de yacimientos es un tema de absoluta novedad y actualidad en el escenario geológico mundial, sin antecedentes en Cuba.

Es novedosa la propuesta de tres modelos descriptivos para los yacimientos de Fe-Ni-Co en el macizo Mayarí-Baracoa que permitirá el incremento de la eficiencia de los trabajos de exploración y evaluación de nuestras reservas mundiales de minerales de Ni y Co, lo que contribuye, además, al desarrollo cognoscitivo y económico de nuestros recursos minerales.

La presentación de los distintos tipos de modelos, su formato, contenido y utilización hacen de este un documento inédito en Cuba de aplicación práctica en las Empresas Geomineras y en las Universidades cubanas como literatura docente.

## **Problema**

Los esquemas conceptuales de yacimientos minerales han existido desde el momento en que el hombre se dedicó a la investigación de nuevas fuentes de recursos minerales (Barton, 1993). De acuerdo con Cox y Singer (1986) “un modelo de yacimiento mineral es un ordenamiento sistemático de información que describe ciertas o todas las características esenciales de un evento particular o fenómeno”.

En este contexto, los modelos de yacimientos caracterizan a rasgos que poseen atributos importantes en común; los modelos son de diferentes tipos y los hay desde

descriptivos, que son los primarios y fundamento para la confección de todos los demás hasta los genéticos que son la base para la confección de los modelos cuantitativos.

Aunque las geociencias modernas han proporcionado criterios que nos permiten distinguir modelos con diferentes niveles de elaboración debido al desarrollo de los vínculos que unen a los distintos atributos que integran, ninguno de ellos puede considerarse como modelo final en la actualidad y probablemente nunca lo será. De esta forma siempre será útil y necesario cualquier esfuerzo por perfeccionarlos a medida que se incrementa el conocimiento humano sobre las características y propiedades de los yacimientos minerales.

En los modelos descriptivos se presentan los atributos esenciales, las supuestas invariantes de los yacimientos minerales. Los atributos esenciales o invariantes definen a un tipo de yacimientos y excluyen lo incidental, lo que es específico de una localidad o territorio y que no puede identificar a un yacimiento.

Como se indicó, la base fundamental de la tipología de los modelos de yacimientos es el modelo descriptivo; ejemplo el modelo genético es más avanzado porque suministra criterios para distinguir a los atributos y propiedades esenciales de los ocasionales o incidentales; poseen la flexibilidad para admitir una cierta variabilidad en materia de fuentes, procesos y lugar de deposición. Sin embargo, su elaboración se hace sobre la base del modelo descriptivo. Así sucede con toda la tipología de modelos sin excepción conocida hasta el presente.

Cada yacimiento mineral es un objeto geológico único y no existen dos yacimientos similares en la corteza terrestre debido a las diferencias fundamentales en los procesos de formación, los ambientes geotectónicos, así como las variaciones geológicas locales específicas del lugar de emplazamiento del yacimiento. Siguiendo este razonamiento habría que confeccionar un modelo para cada yacimiento.

Esta investigación plantea como problema discriminar y presentar, dentro de la diversidad de información que exista sobre un tipo de yacimientos, a los atributos esenciales o invariantes que permiten confeccionar su modelo descriptivo general que lo identifique de otros, para que se pueda utilizar con efectividad en la exploración, evaluación y el pronóstico metalogénico de los territorios con el objetivo de descubrir nuevos recursos minerales e incrementar las reservas ya existentes. Los modelos descriptivos tienen que ser aplicables a territorios que reúnan los atributos esenciales descritos, utilizando el método de la analogía geológica.

A pesar del avance de las ciencias geológicas los actuales modelos de yacimientos no son más que intentos de sistematización de la información geológica que existe sobre ellos, la cual es muy amplia, variable y dispersa a pesar de que determinados elementos permiten hacer hoy en día, una valoración más cercana a la realidad de sus fuentes de mineralización y los procesos de formación de los yacimientos.

Aun con todas esas limitaciones e insuficiencias los modelos de yacimientos son muy útiles en el proceso de exploración y evaluación cuantitativa de nuevos recursos minerales. De acuerdo con Cunningham (1993) algunos de los problemas a resolver en los modelos de yacimientos son:

Se necesitan separar los efectos de la fuente de mineralización y de los procesos geológicos en la formación de un yacimiento mineral ¿Cuánta información y de qué tipo, consideramos necesaria situar en un modelo para una nueva área perspectiva? Tenemos la necesidad de reconocer qué tipos diferentes de yacimientos minerales se pueden formar como parte de un mismo sistema de formación de menas. Es imprescindible la incorporación de más información sobre su expresión geofísica y su característica ambiental en los modelos de yacimientos

### **Objeto de la investigación**

El objeto de esta investigación son los modelos descriptivos, que son esquemas donde se sistematiza y generaliza la información geológica esencial de un tipo de yacimiento mineral, su formato y contenido, lo cual permite la toma de decisiones en los proyectos de exploración y evaluación geológica de territorios para localizar nuevos recursos y reservas de minerales útiles.

Este objeto se integra por cuatro objetivos de investigación que son:

1. Exponer la evolución histórica del pensamiento geológico sobre la formación de las menas, la sistematización de los yacimientos minerales en forma de clasificaciones de diferente naturaleza y su transición ulterior hacia el concepto de modelos de yacimientos que es la forma más evolucionada en este aspecto en la actualidad.
2. Mostrar la tipología de modelos de yacimientos y sus destinos, formato y contenido.

3. Confección de tres modelos descriptivos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co asociados al macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa de Cuba oriental.
4. Crear una literatura docente complementaria para la enseñanza de las asignaturas vinculadas a los Yacimientos y Prospección de Minerales Sólidos en las Universidades cubanas que imparten las carreras de Geología y Minería, así como una fuente de consulta y referencia para los interesados en la problemática de la evaluación de los recursos minerales.

### **Aporte científico**

El trabajo aporta un instrumento de generalización metodológico inexistente en nuestro país, de aplicación y utilidad práctica para la sistematización de la información sobre los yacimientos minerales de la República de Cuba y la confección de sus modelos descriptivos, de probada eficiencia en la exploración y evaluación de los recursos minerales en otros países de elevado nivel de desarrollo en la rama de Geología Económica vinculada a los yacimientos minerales como son Estados Unidos, Canadá y Australia.

Semejante proceder se corresponde con la forma más avanzada de sistematización de la información sobre los yacimientos minerales y crea el mecanismo que facilita su perfeccionamiento continuo mediante la incorporación y selección de nueva información producto del incremento del conocimiento sobre los yacimientos minerales y el establecimiento de vínculos genéticos en el desarrollo de los modelos.

Los modelos pueden ser definidos, según el *American Heritage Dictionary* (1985), como “una descripción tentativa de un sistema o teoría que reúne a todas sus propiedades conocidas” o también como “un esquema preliminar que sirve como plan y a partir del cual se puede construir un objeto que no se ha creado”. En ambas definiciones queda explícito, a través de las frases “descripción tentativa” y “esquema preliminar”, que no existe un modelo único y acabado para un tipo o clase específica de yacimiento mineral, lo que supone un proceso de transformaciones sistemáticas sucesivas, mediante la conceptualización de sus invariantes. Las invariantes de las lateritas níquelíferas no son las de las bauxitas lateríticas aun teniendo la misma génesis exógena y residual.



Otro aporte que se hace en el trabajo es la presentación de tres modelos descriptivos de yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co para los cuales no conocemos referentes en Cuba que se hayan publicado bajo este formato, ni para ningún otro tipo de yacimiento mineral, como ejemplos de la sistematización de la información existente sobre nuestro principal recurso mineral metálico.

### **Hipótesis de Trabajo**

Si se posee la información geológica primaria suficiente y pertinente, así como los profesionales geólogos y geofísicos calificados, se puede sistematizar, generalizar y confeccionar los modelos descriptivos de yacimientos que sirven de base para la confección de los restantes tipos de modelos de yacimientos que se han identificado hasta el presente (genéticos, de procesos cuantitativos, numéricos, de ley y tonelaje, expresión geofísica y geoambientales) y con los cuales se puede realizar la exploración y evaluación de los recursos minerales de los territorios.

### **Metodología de la Investigación**

Esta investigación de tipo descriptiva Cruz Baranda (2000) caracteriza a un objeto o fenómeno (yacimiento mineral) mediante la generalización y el análisis de la información geológica de la que se obtendrán las deducciones teórico-prácticas, revelando sus rasgos más significativos, regularidades y tendencias para llegar a caracterizarlo, evaluarlo y definir sus rasgos esenciales (modelo descriptivo de yacimiento).

Este tipo de investigación permite establecer relaciones entre el objeto de investigación y otros objetos o fenómenos, comparar, sintetizar características y rasgos comunes entre un conjunto de objetos o fenómenos.

Se realizó el estudio de 185 libros y artículos con los cuales se elaboró el marco teórico que sustenta al trabajo y que se refleja en los capítulos sobre la evolución del pensamiento geológico sobre la formación de la menas y la clasificación de los yacimientos minerales y su transformación ulterior hacia el concepto de modelo de yacimientos minerales.

El 41,75 % de la bibliografía consultada se corresponde con las temáticas de la formación de los yacimientos minerales, su prospección y exploración. De ellos 19 libros y 2 artículos se destacan por su relevancia para la confección del capítulo 1. El 25,27 % de las obras abordan la problemática de los modelos de yacimientos minerales y de ellas se destacan 10 libros y 5 artículos relevantes con constituyen el basamento del capítulo 2. Una cifra similar de obras, es decir, el 25,27 % fue consultada en el tema del capítulo 3 dedicada al intemperismo y los modelos descriptivos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co con particular relevancia para 3 libros y 10 artículos científicos. El 7,69 % de las obras consultadas son de temas generales de la Geología y la Geomorfología.

El marco teórico es la síntesis de los aspectos más relevantes de los referentes históricos, conceptuales, tendenciales y contextuales que permiten la comprobación del problema declarado y la caracterización del objeto de estudio.

## **CAPÍTULO I**

### **ESBOZO HISTORICO SOBRE LA FORMACION Y LA CLASIFICACION DE LOS YACIMIENTOS MINERALES**

Se realiza una exposición general sobre distintas ideas e hipótesis de formación de los yacimientos y las clasificaciones que marcaron cambios en la concepción sobre la génesis de los yacimientos minerales desde las elaboradas en la Edad Media pasando por el siglo XIX hasta las más modernas del siglo XX (Lindgren, Niggli, Schneiderhohm, Bateman, Smirnov) culminando con las clasificaciones de la etapa de tectónica de placas (Guild, Guilbert y Park, Sawkins).

El problema del origen de los yacimientos minerales ha probado ser un objeto atractivo para la especulación a través de la historia de la ciencia moderna.

Aun antes del nacimiento de la ciencia de la geología dinámica, esto es antes del final del siglo XVIII, dicha especulación tenía lugar no solo entre aquellos que resaltaban su importancia económica, sino también entre los que se dedican a su estudio desde el punto de vista científico como un problema mas de historia natural.

El estudio de la historia de la teoría de los yacimientos minerales muestra que los autores modernos son continuadores de las ideas de los pioneros en esta materia y solamente debido al desarrollo considerable de las técnicas analíticas (métodos físicos, químicos y en particular la utilización de los isótopos), así como el tratamiento

computadorizado de los datos, se han podido "refinar" muchas de las ideas que fueron avanzadas hace ya muchos años atrás en particular desde la época de Georgius Bauer (1494-1555).

El siglo XVIII marcó indeleblemente el resurgimiento del interés por el estudio de los yacimientos minerales destacándose los ingenieros y mineralogistas del famoso distrito minero de Freiberg en Sajonia, Alemania. Este siglo en su último cuatrimestre, vería surgir la polémica que se prolongó durante muchos años entre los partidarios de James Hutton (1726-1797) los "plutonistas" y Abraham Gottlob Werner (1749-1817) "los neptunistas" y que mantuvo dividido al pensamiento científico sobre el origen de los yacimientos minerales en estas dos corrientes con ligeras variaciones.

Para finales del siglo XIX se establecieron "escuelas" de pensamiento sobre la génesis de los yacimientos minerales, cada una con una orientación diferente: norteamericana (estructural), alemana (mineraloógica), francesa (metalogénica), japonesa (petrológica-volcánica) y rusa (vínculos genéticos y desarrollo histórico-natural). Las primeras clasificaciones modernas surgieron a principios del siglo XX en particular las de Lindgren (zonas de profundidad), Niggli (plutónica-volcánica), Schneiderhöhm (asociación menífera), Bateman (estructural) y Smirnov V. I. (vínculo genético-espacial).

Los años de la década del 70 en el siglo XX marcaron una revolución formidable en todas las ciencias geológicas cuando la teoría de las placas o nueva tectónica global se transformó en una teoría unificadora para la geología que permitió explicar científicamente y con menos especulación los mecanismos que conducen a la distribución de los continentes y los océanos.

Se estableció de manera científica el carácter de los vínculos genéticos, espaciales y la zonalidad metalogénica de los yacimientos con los principales ambientes geotectónicos de la corteza terrestre, a los cuales se les asignaron tipos específicos de rocas, estructuras y yacimientos minerales: este es el avance más formidable de la ciencia de los yacimientos minerales en toda su historia.

Las clasificaciones modernas de los yacimientos minerales sobre la base de la tectónica de placas tuvieron sus primeras expresiones en las propuestas de Guild a las que siguieron otras sucesivamente, a medida que se iban profundizando los estudios geológicos regionales y se re-interpretaba la geología de muchos territorios bajo los principios de la nueva tectónica global.

## **CAPITULO II**

### **PROBLEMÁTICA DE LA TEORIA Y TIPOS DE MODELOS DE YACIMIENTOS MINERALES**

Se presentan las ideas que fundamentan el surgimiento de los modelos de yacimientos minerales en los años iniciales de la década del 1970 hasta su definitiva implantación con los trabajos básicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos a partir del 1983 y posteriormente su continuidad en el Servicio Geológico de Columbia Británica en Canadá, a los que siguieron otros países hasta alcanzar el surgimiento del Programa de Modelación de Yacimientos auspiciado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas -IUGS- y la Comisión de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura -UNESCO- en el año 1984.

Las clasificaciones tradicionales y clásicas en su intento por sistematizar las informaciones sobre los yacimientos minerales dieron paso a un tipo de ordenamiento de los atributos invariantes de los distintos tipos de yacimientos minerales y aparecieron los Modelos de Yacimientos característicos para distintos ambientes geotectónicos y de distintas denominaciones.

El desarrollo de los modelos comienza con el reconocimiento de las similitudes entre los depósitos que se estudian, de manera tal que su agrupación sea posible. Este agrupamiento de rasgos similares o atributos es el primer estadio de la modelación de los yacimientos minerales y conduce a la definición del modelo descriptivo que es básico y fundamental para la confección del modelo genético.

A partir del modelo genético se elabora el modelo de procesos cuantitativos y de probabilidad de ocurrencia. Los modelos de ley y tonelaje y numéricos se desarrollan a partir de los descriptivos sólo cuando la información sobre el tamaño y la calidad del yacimientos están a nuestra disposición.

En los modelos de exploración lo fundamental reside en el establecimiento de vínculos entre las distintas unidades de información o atributos de los modelos que se integran en él. Son muy dinámicos y evolucionan en el tiempo en dependencia del producto que de ellos se espera: el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales.

Se describen los modelos de expresión geofísica y los geoambientales que constituyen el aporte moderno de la modelación de yacimientos en su orientación de protección del medio ambiente.

El valor (utilidad) de cada tipo de modelo es variable. Para las tareas de exploración y desarrollo los modelos más importantes son : descriptivo, genético y de ley-tonelaje; en el caso de la educación son mas relevantes los modelos descriptivo, genético y de procesos cuantitativos. Así sucesivamente.

En los últimos 30 años se han publicado numerosos trabajos relacionados con los modelos de yacimientos minerales, en su mayoría por especialistas norteamericanos y canadienses. La elaboración de un tipo de modelo para un yacimiento mineral dado es de gran importancia para los geólogos prospectores ya que sirven de guías para su descubrimiento, estudio y evaluación. Al final se brinda una información especial sobre ellos.

### **CAPITULO III**

#### **ESTADO ACTUAL DE LOS MODELOS DESCRIPTIVOS EN CUBA EN EL EJEMPLO DE LOS YACIMIENTOS LATERITICOS DE FE-NI-CO DEL MACIZO MAYARI-BARACOA DE CUBA ORIENTAL**

Se brinda una información básica sobre el proceso de intemperismo y de laterización haciendo énfasis en la tipología de los perfiles, su zonalidad y nomenclatura. Se presentan tres modelos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co asociados a la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa en el nordeste de Cuba oriental.

La cantidad de información sobre nuestros recursos minerales es considerable. Muchos informes y estudios de yacimientos, manifestaciones, puntos de mineralización se encuentran en los archivos y fondos geológicos de las principales instituciones como la Oficina Nacional de Recursos Minerales, el Instituto de Geología y Paleontología, Uniones Geominera y del Níquel con sus Empresas en todo el país, así como el Instituto Superior Minero Metalúrgico, entre otras.

Esta información es la base inicial necesaria para su sistematización y generalización en forma de Modelos Descriptivos de Yacimientos Minerales, tarea que no está desarrollada en nuestro país.

Es mayor el grado de estudio y conocimiento geológico de nuestros recursos minerales que el número y diversidad de publicaciones encargadas de su divulgación. Carecemos de suficientes estudios de generalización sobre tipos específicos de yacimientos minerales en la República de Cuba, por mas que en nuestros archivos y fondos geológicos se conservan algunos informes y reportes de esta característica sobre

tipos de yacimientos concretos o regiones específicas de nuestro territorio nacional, en particular, a partir de la década de los años 1960.

Por ser los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co los recursos minerales sólidos más importantes y mejor estudiados de Cuba se presentan, por primera vez, sus modelos descriptivos.

La utilización primaria del Ni (USGS, Mineral Information: Nickel, 2002) es como metal refinado en cátodos, polvos, briquetas o como ferroníquel. Alrededor del 65 % del consumo mundial del Ni se utiliza para la producción de acero inoxidable austenítico. Otro 12 % se utiliza en la producción de superaleaciones como Inconel 600 o aleaciones no ferrosas como las de Cu-Ni (latón y bronce al Ni). Ambos tipos de aleaciones se usan ampliamente debido a su resistencia a la corrosión.

El restante 23 % del consumo de Ni se divide entre los aceros aleados, baterías recargables, catalizadores y otros reactivos químicos, acuñamiento de monedas (generalmente 75 % de Cu y 25 % de Ni), productos de la fundición y para el niquelado.

Los recursos minerales niquelíferos mundiales identificados en depósitos con una ley de 1 % o más de Ni contenido es de 130 millones de t (USGS, 2002). Alrededor del 60 % de Ni se encuentra en los depósitos lateríticos y el restante 40% en los depósitos de sulfuros magmáticos. Además se conocen grandes cantidades de recursos niquelíferos en el mar profundo asociados a las cortezas y nódulos de Mn que cubren grandes áreas del fondo oceánico, especialmente en el Océano Pacífico.

La producción minera en el 2001 fue de 1 260 000 t destacándose 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 se localizan en Australia, Cuba, Canadá, Nueva Caledonia, Indonesia, Africa del Sur y Filipinas (USGS, 2002).

El descubrimiento de nuestras cortezas ferroniquelíferas en Cuba, coincide con el descubrimiento de la isla de Cuba por Cristóbal Colón que se percató de la abundancia de "piedras de color de hierro" al desembarcar. Sin embargo, en el transcurso de los cuatrocientos años siguientes después del desembarco, las lateritas ferroniquelíferas no fueron del interés de los investigadores (Ponce Seoane, 1983). En 1762 durante el desarrollo de la guerra anglo-española, el perdigón fue objeto de atención para la obtención de hierro (Ariosa Iznaga, 1977).

En los inicios del siglo XX un grupo de Geólogos norteamericanos realizó trabajos sobre las lateritas de Cuba ( Spencer 1907; Cox, 1911; Hayes, 1911; Kemp

1910, 1915; Leith, 1915). Hacia finales de la década de los años 1930, el interés hacia las lateritas cubanas creció nuevamente en relación con el establecimiento en las mismas de altos contenidos de Ni. Los resultados de las investigaciones correspondientes a este periodo no fueron publicados pues se trataba de conservar los intereses de las compañías norteamericanas (Ponce Seoane, 1983)

Con la construcción de la planta de níquel de Nicaro en 1943 se incrementó el grado de estudio de las lateritas cubanas; de este periodo datan los trabajos de la Junta de Seguridad de Recursos Naturales (1950), McMillan (1955), de Vletter (1953, 1955) y Monttoulieu et al (1957).

Después de 1959 se inició un proceso de estudio profundo y detallado de nuestros recursos niquelíferos y se terminó una segunda planta en Moa. Hoy son tres las industrias procesadoras de nuestras menas lateríticas.

A partir de la década de 1960, el nordeste de Cuba oriental ha sido objeto de investigaciones geológicas sistemáticas en esta dirección y se profundizaron los estudios sobre nuestros yacimientos lateríticos por Geólogos cubanos (Formell Cortina, Ponce Seoane, Castillo, Lavaut, Bergues, Perez Alfaro, Apud, Ramsay, Gary, Barrabi, Orozco, Rojas Purón, Crombet, Almaguer, Rodés, entre otros); de las desaparecidas Unión Soviética (Adamovich, Chejovich, Agienko, Masliukov, Shirokova, Cherepniov, Zabelin, Egorov, Gorielov, Ogarkov, Serdiuk, Shiriskova, Aliojin, Petrov, Buguelsky, Korin, Finko, Rechkin, Kostarev, Vershinin, Ostroumov, entre otros) y Checoslovaquia (Kudelasek, Marxova, Zamarsky, Strand); Hungría (Somos, Szebenyi, Vegh) que han contribuido notablemente con sus trabajos al incremento del grado de conocimiento sobre nuestros yacimientos de lateritas.

A partir de los documentos de los archivos técnicos y fondos geológicos de nuestras Oficina Nacional de Recursos Minerales, Instituto de Geología y Paleontología, Empresas Geomineras y Empresas del Níquel con los resultados de los trabajos de revisión, búsqueda, exploración y cálculo de reservas se elaboraron y fundamentaron los modelos descriptivos de yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co que se presentan en este trabajo.

Una aplicación práctica de los modelos descriptivos de yacimientos lateríticos presentes en nuestras tres zonas principales de desarrollo, Pinares de Mayarí, Moa y Punta Gorda, con efecto económico tangible, está en que permitirán una mejor delimitación de las concesiones mineras al utilizar los criterios referidos en estos modelos.

Esto contribuirá a la explotación más eficiente del yacimiento, así como a la utilización más racional de las reservas de mineral, con mayor incidencia en la recuperación de Ni y Co durante el proceso metalúrgico.

El 14 % de la superficie terrestre experimenta el intemperismo físico o mecánico y el 86 % está afectada por el intemperismo químico. El intemperismo implica una fuerte dependencia de los procesos asociados con la hidrosfera, atmósfera y biosfera (White y Brantley, 1995). La cristalización y disolución de los minerales a partir de las soluciones acuosas son los procesos principales en la cinética del intemperismo.

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 aun poseen un considerable valor (Lima Costa, 1997).

Un primer problema que resalta es que han pasado hasta el presente 195 años sin que la definición del término haya dejado de mantener una controversia, a pesar de que es indispensable para una correcta clasificación de los productos del intemperismo.

La Norma Ramal Cubana define el término laterita de la siguiente manera: (Ponce Seoane, 1983)

"Es una roca que representa el estado de equilibrio alcanzado por la materia pétreo en las condiciones de hipergénesis como resultado de un desarrollo mas o menos largo, en el cual la roca inicial sufrió numerosas alteraciones cualitativas y cuantitativas. El miembro inicial de este desarrollo son las rocas madres y el final la coraza de hierro. Los estadios intermedios, todos juntos, son los que se denominan lateritas"

El segundo problema es que existe una gran diversidad de criterios y términos para la clasificación de la zonalidad y perfiles de la corteza de intemperismo en el ámbito mundial: no existe un consenso internacional al respecto.

Golightly (1981) y Trescases (1986) quienes han realizado importantes trabajos de generalización sobre los yacimientos lateríticos no han encontrado una terminología común para los distintos horizontes de los perfiles por su gran variedad texturo-



estructural y de composición sustancial, lo cual es una consecuencia de las características de los procesos del intemperismo y de las rocas madres de donde se forman estas cortezas.

Para la Anaconda Nickel Ltd. los perfiles lateríticos de Ni-Co típicos tienen cuatro horizontes que varían en espesor en dependencia de la humedad del clima (<http://www.anaconda.com/> 2002) - de arriba hacia abajo:

Ferricretos

Limonitas

Saprolitas

Peridotitas alteradas

En los climas húmedos como es el caso de Nueva Caledonia el horizonte de las limonitas y saprolitas tiene un mayor espesor; cuando el clima es mas seco como es el caso de Australia Occidental dentro del horizonte de las limonitas se pueden desarrollar esmectitas.

El Proyecto Goro es el mayor depósito de lateritas níquelíferas oxidadas de Nueva Caledonia. El perfil típico que se describe comprende: (<http://www.portege.com.au/2002/>)

- Capa delgada superior de Fe (menor de 5 m de espesor)
- Cubierta de limonita (hasta 25m de espesor que esta enriquecido en Ni en sus 10 m inferiores)
- Zona de transición hacia la saprolita
- Saprolita hasta roca saprolítica (espesor menor a 10 m. y enriquecido en Ni)

En Niquelandia, estado de Goias, Brasil, los yacimientos lateríticos se desarrollan en una zona ultrabásica del complejo básico-ultrabásico como concentraciones residuales desarrolladas por rocas alteradas en esta zona (de Carvalho Jr. et al, <http://makalu.jpfnasa.gov,2002>).

Los perfiles del intemperismo son potentes en las tierras bajas con cinco horizontes o capas similares a las descritas por para los yacimientos Santa Fé, Goias (Olivera y Trescases, 1980) y Barro Alto (Costas, 1981):

Rocas alteradas (altered rocks): son dunitas serpentinizadas con poco cuarzo y vetas de garnierita.

Saprolita gruesa (coarse saprolite): una zona con concentración de minerales silicatados de Ni. Estas facies están compuestas fundamentalmente por silicatos amorfos y garnieritas

Saprolita arcillosa fina (clay fine saprolite): es una zona de transición entre las facies oxidadas y silicatadas que conserva la mayoría de las características presentes en las facies de saprolitas gruesas. Se aprecia un incremento importante de goethita.

Laterita roja (red laterite): compuesta fundamentalmente por hematita y goethita. Están presentes las oolitas y las concreciones ferruginosas pisolíticas. Localmente, estas lateritas transicionan hacia corazas de Fe.

En otras palabras, el perfil completo se compone de tres grupos principales de horizontes (de abajo hacia arriba):

- Saprolítico: compuesto por silicatos de Mg y Fe.
- Limonítico: compuesto fundamentalmente por hidróxidos de Fe.
- Corazas de Fe.

La variación mineralógica básica es de silicatos magnesiales que incrementan paulatinamente su contenido de goethita y finalmente en hematita.

Por su parte Barros de Olivera et al (1992) al referirse a estos perfiles esquemáticos hace una subdivisión mas detallada para los perfiles de las áreas bajas en la zona de Niquelandia al reconocer:

- Saprolita 1: roca alterada.
- Saprolita 2: saprolita gruesa.
- Saprolita 3: saprolita arcillosa.
- Laterita 1: laterita amarilla o saprolita ferruginosa.
- Laterita 2: laterita roja o cubierta laterítica.

Los criterios que utilizó para discriminar estas zonas fueron el tamaño de las partículas, la densidad total y el porcentaje de Mg.

Schellman (1989) al describir el perfil del yacimiento Tagaung Taung de Birmania señala que se distinguen claramente tres capas de material intemperizado sobre las rocas ultramáficas. El perfil lo representa así (de abajo hacia arriba)

- Roca madre.
- Saprolitas donde predominan los minerales de Mg y se produce el máximo enriquecimiento del Ni.

- Limonitas que son de color amarillo-carmelitoso, portadoras de Ni con un elevado contenido de Fe.
- Capa superficial de color rojo-carmelitoso con contenidos de Fe y Ni inferiores a la limonita.

Colin et al (1990) al referirse al comportamiento supergénico del Ni., analizan los perfiles de los yacimientos Jacuba y Angiquinho. En Jacuba el perfil tiene mas de 30 m de espesor, se desarrolla a partir del intemperismo de piroxenitas y utilizan la siguiente terminología de abajo hacia arriba):

- Roca madre.
- Capa coherente.
- Capa saprolítica.
- Capa arcillosa.
- Capa arcillosa ferruginosa

En Angiquinho, el perfil se formó a partir de una combinación de dunita y piroxenita parcialmente serpentizada, lo cual es contrastante con Jacuba. La terminología que se utilizó fue (de abajo hacia arriba):

- Roca madre.
- Capa coherente.
- Capa saprolítica.
- Capa arcillosa ferruginosa.
- Capa nodular.
- Coraza de Fe.

Golightly (1981) hace un excelente análisis de los yacimientos de lateritas níquelíferas y señala que un perfil normal in situ, incluye las siguientes unidades (de arriba hacia abajo. Los términos "entre comillas" son los utilizados por Trescases en Nueva Caledonia)

- Ferricretos que es el equivalente a la "canga, cuirasse de fer".
- Limonita transportada equivalente a las "terres rouges."
- Limonita in situ que son las "saprolite fine."
- Zona intermedia, zona de nontronita.
- Zona de saprolita equivalente a "saprolite grossiere".
- Roca madre.

Señala además que los perfiles sin la zona intermedia son característicos de la zona ecuatorial húmeda u otras localidades con acumulados de lluvia altos y estaciones de seca mínimas. Esto se produce a consecuencia de una eficiente lixiviación sin que se llegue a alcanzar la condición de supersaturación para la formación de arcillas smectíticas en la zona de saprolitas.

Tardy (1992) discute la diversidad y terminología de los perfiles lateríticos y pone al descubierto la falta de unanimidad y consenso al respecto pues se mezclan los términos para las lateritas, las bauxitas lateríticas, los suelos lateríticos hasta toda clase de productos del intertemperismo intertropical; señala con toda razón que rasgos muy acentuados y detallados caracterizan a los diferentes horizontes, los que a su vez constituyen una gran variedad de perfiles que se desarrollan en una gran área intertropical.

Estos criterios y términos antes mencionados además de reflejar la falta de consenso generalizado adolecen de que engloban más de un litotipo en una sola zona litológica o desmembran 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) lo que conduce a la pérdida de información geológica, obstaculizando las interpretaciones y deducciones geólogo-genéticas, así como la captación y representación de la información geológica en su estado natural.

Se pueden resumir los siguientes criterios sobre la zonalidad vertical de las cortezas de intertemperismo, definida según el sentido de la profundidad:

- 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, 1992 y otros de las escuelas inglesa y francesa).
- División del corte en cuatro zonas litológicas: ocre inestructural, ocre estructural, serpentinita lixiviada nontronitizada y serpentinita desintegrada (Glazkovsky, 1963; Smirnov, 1982 y otros de la ex Unión Soviética).
- 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. (Guinzburg I.I, 1963)).

- División del corte en cuatro zonas mineralógicas: ocre, nontronita, kerolita, desintegración de la roca madre (Nikitin K.K, 1971).
- División del corte en cinco zonas mineralógicas: ocre, nontronita, ferrisaponita, kerolita, desintegración de la roca madre (Vitovskaya I.V, 1982, 1989).
- División del corte en seis zonas litológicas (Lavaut, 1998): 1) Zona de ocre inestructurales con concreciones ferruginosas (OICC); 2) Zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI); 3) Zona de ocre estructurales finales (OEF); 4) Zona de ocre estructurales iniciales (OEI); 5) Zona de rocas madres lixiviadas (RML) y 6) Zona de rocas madres agrietadas (RMA).

Las denominaciones de los tipos de perfiles de intemperismo conocidas se realizan sobre la base de criterios mineralógicos y litológicos. La clasificación mineralógica establece tres tipos de perfiles (Nikitin K.K y Vitovskaya I.V, 1971):

- Completo: con las cuatro zonas geoquímicas indicadas más arriba (hidrólisis final, hidrólisis parcial y lixiviación final, hidratación e hidrólisis inicial, desintegración).
- Reducido: si le faltan zonas intermedias entre la zona de hidrólisis final y de desintegración de las rocas madres.
- Incompleto: si le faltan las zonas geoquímicas superiores y esto no ha sido causa de la erosión.

La clasificación litológica establece tipos de perfiles litológicos 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 directa por cualquier persona versada en la materia (geólogo, edafólogo, geógrafo, agrónomo y otros).

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

- Perfiles lateríticos, con cuatro tipos de perfiles litológicos: 1) inestructural completo; 2) inestructural incompleto; 3) estructural completo y 4) estructural incompleto;
- Perfiles laterítico-saprolíticos, con dos tipos de perfiles: 5) estructural completo y 6) estructural incompleto;
- 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% del total con el perfil litológico laterítico. La terminología utilizada en Cuba y en este trabajo con sus equivalentes en el ámbito internacional fundamentalmente anglo-francés es:

- Zona de ocre inestructurales con concreciones ferruginosas (nodular and ferricrete zone): se caracteriza por una gran abundancia (usualmente 30-70%) de globulaciones goethítico-hematíticas sin conservación de los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre, cuya cantidad y tamaño disminuyen (hasta 0.5-1 mm de diámetro) con la profundidad adquiriendo una forma prácticamente esférica al desaparecer en la masa ocrea inestructural de la base de esta capa. En algunos lugares se observa la cementación de las concreciones ferruginosas (ferricreta, costra o plancha ferruginosa), formando bloques o pseudoestratos con tabiques ferruginosos de unión entre ellos en cortezas típicas desarrolladas a partir 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 correspondientemente, en dependencia si la roca madre fue ultramafita o mafita.
- Zona de ocre inestructurales sin concreciones ferruginosas (laterite rouge, mottle zone): consiste en una masa ocrea de aspecto terroso y coloración más clara que la anterior zona, prácticamente sin concreciones ferruginosas, donde no se conservaron las características de la fábrica estructural de la roca madre.

- Zona de ocres estructurales finales (ferruginous saprolite, saprolite fine, laterite jaune, limonite sensu stricto): es una masa ocrosa con la conservación de los rasgos de la fábrica estructural de la roca madre y con relictos de los minerales que la componían en cantidades insignificantes sobre todo en la base de esta capa. Su coloración es amarilla anaranjada o rosada violácea con pintas blancas, correspondientemente si la roca madre fué ultramafita o mafita.
- Zona de ocres estructurales iniciales (clayous saprolite, earthy saprolite): consiste de 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 madres lixiviadas y parcialmente limonitizadas, friables y con sus núcleos duros, más o menos frescos. La coloración es abigarrada amarillo-verdosa o blancuzca grisácea, correspondientemente si la roca madre fue ultramafita o mafita.
- Zona de rocas madres lixiviadas (rocky saprolite, bouldery saprolite): está constituida por una masa arcillosa fragmentosa de consistencia semi-dura, 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 madres fuertemente lixiviadas, argilitizadas y levemente limonitizadas que pueden estar impregnadas por vetas, vetillas y nidos de minerales infiltrativos de neoformación (supergénicos). Generalmente el material de esta zona está fuertemente impregnado de agua. La coloración del material es verde-grisácea, amarillenta o verde-grisácea-blancuzca, correspondientemente a si la roca madre fue ultramafita o mafita.
- Zona de rocas madres agrietadas (parent rock, bedrock, boxwork layer): consiste en el frente de intemperismo físico con lixiviación y oxidación incipientes de las rocas madres a lo largo de las grietas del intemperismo, generadas por la anisotropía del coeficiente de

dilatación térmica de sus partes componentes, así como por otros sistemas de fisuras tectónicas, gravitacionales, etc.

En las grietas se depositan minerales infiltrativos supergénicos, principalmente silicatos amorfos y microcristalinos; el material de esta zona, sobre todo en su porción más superficial, también experimenta transformaciones en su masa, incluyendo su posible opalitzación hasta el grado de cuarcitas secundarias.

La coloración del material de esta zona coincide con el color general de las rocas madres primarias, experimentando una decoloración hasta matices más claros en las partes lixiviadas en torno a las grietas; se pueden observar fenómenos de metasomatosis cromática por contaminación con oxi-hidróxidos 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 identificar a un material alítico arcilloso-terroso rico en oxi-hidróxidos de Fe.

La clasificación utilizada en Cuba de las cortezas de intemperismo se basa en los criterios estructuro-genéticos claves: su zonalidad litológica vertical y el tipo de perfil. Sobre estas bases se presentan los tres modelos descriptivos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co en el Macizo Mayarí-Baracoa de Cuba oriental.

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

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

**SINÓNIMOS:** Menas oxidadas de níquel; depósitos niquelíferos limoníticos; tipo serpentino-ocroso cobaltífero-niquelífero; perfil querolítico-ocroso; perfil reducido.

**PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS:** Fe, Ni, Co, (Cr, corrector de cemento, lacas y pinturas)

**EJEMPLOS:** En Cuba: Pinares de Mayarí, Mayarí; Luz, Nicaro; Las Camariocas (periferia), Moa Oriental y Yagrumaje Oeste Moa. En otros países: Elizavétsk (Rusia), Ufaléysk (Rusia); Kalum (Liberia). También se hallan en Brasil, India, Nueva Caledonia, Filipinas, Papúa-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 (3-7 m de potencia), superpuesto sobre basamentos peniplanizados y pedimentosos inclinados (15-25<sup>0</sup>), compuestos por rocas ultramáficas (harzburgita, lherzolita, dunita, serpentinitas) que constituyen las reservas principales conocidas de Fe geothítico 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<sup>0</sup>), producidos por la erosión y meteorización superficial, generalmente de base regional 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 madres y se asocian casi totalmente con lateritas (ocres inestructurales y estructurales lateritizados), donde las saprolitas (semiocres arcillosos y serpentinitas lixiviadas nontronitizadas limonitizadas parcialmente) no existen o tienen un desarrollo extremadamente subordinado, dentro de las cuales es posible separar volúmenes productivos de Fe, Ni y Co.

Las rocas madres fundamentales de este tipo de perfil son ultramafitas poco serpentinizadas (45-60%) o serpentinitas, así como también dunitas, harzburgitas, wehrlitas y sus serpentinitas, ubicadas en geomorfotipos de fuerte drenaje de aguas. Subordinadamente, también se encuentran rocas máficas (generalmente 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. Frecuentemente 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, relíctica y fragmentaria. En su estructura predominan por el tamaño del los granos, las fracciones finas (menor de 0.05 mm) El horizonte laterítico se subdivide en tres tipos litológicos de menas que a su vez se corresponden con las zonas litológicas de la corteza de intemperismo que componen este tipo de perfil, y que son:

- Ogres Inestructurales con Concreciones Ferruginosas (OICC)
- Ogres Inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI)
- Ogres Estructurales Finales (OEF)

En la saprolita, los Ogres Estructurales Iniciales (OEI) están ausentes y son frecuentes pequeñas potencias (20-50 cm) de Roca Madre Lixiviada (RML) limonitizada y 1-2 m de Roca Madre Agrietada (RMA) al final del corte.

MINERALOGÍA DE LAS MENAS (PRINCIPAL Y SUBORDINADA): Los minerales principales de las menas son: oxi-hidróxidos de hierro (göethita, alumogöethita, maghemita) y de manganeso (asbolanas y wades: psilomelano, todorokita, woodruffita, feiknechtita). Las serpentinas hipergénicas (lizardita, crisotilo, antigorita) y arcillas saponíticas (nontronita, ferrisaponita, beydelita, ferrihalloysita ) se presentan en forma de trazas y pequeños sectores aislados en la base de los ogres o linealmente asociados a diques de dunita, piroxenitas o gabroides olivínicos meteorizados, por lo que la cantidad de oxi-hidróxidos de hierro alcanza hasta 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 relícticos de serpentinita limonitizada, nontronitizada, kerolitizada, serpofitizada, así como 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 madres) 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 legadas naturalmente en níquel, cobalto, cromo, manganeso que se asocian a litotipos o zonas litológicas inestructurales de la corteza de intemperismo y ferruginoso-niquelífero-cobaltíferas en los ocres estructurales finales (OEF) y parcialmente en los ocres inestructurales sin concreciones (OI). Las mayores concentraciones de hierro, aluminio y cromo se controlan por la laterita más superficial (OICC, OI); el cobalto se controla por las litologías inferiores de la laterita (OI, OEF principalmente); el níquel por éstas últimas (OI, OEF principalmente) y por las litologías relicticas saprolíticas (OEI y RML principalmente así como RMA), aunque estas últimas prácticamente no forman cuerpos minerales.

El níquel en la laterita se asocia a los oxi-hidróxidos de hierro (goethita, maghemita, magnetita) en la proporción de 60-95% del total y en la saprolita se asocia 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 del níquel (10-20%)

El hierro, aluminio y cromo se asocian al hierro en las goethita, maghemita y magnetita; el aluminio a la gibbsita y el cromo a 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 serpentización de la ultramafita, facilitando 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 (göethitización 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 simultáneamente la removilización parcial del  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$  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 madres. A tenor de estas regularidades, los litotipos de la corteza de intemperismo se diferencian intrínsecamente de un yacimiento a otro, provocando 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 ( $15-25^\circ$ ) de cuya acción combinada dependerá la formación de depósitos lateríticos estructurales (con rasgos de la fábrica de las rocas madres 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 ligados naturalmente con 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 madres concomitantes.

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

a) Depósitos lateríticos ferruginosos ligados, caracterizados por estar formados por litotipos inestructurales (OICC, OI)

b) Depósitos lateríticos ferroniquelíferos-cobálticos compuestos por los tres litotipos lateríticos (OICP, OI, OEF)

## **Guías de exploración**

**CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS:** 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 ferruginas (ferricreta) y/o esqueletos silícicos (silcreta) en la superficie.

**CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS:** 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. 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 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:** Depósitos de primordial importancia para la obtención de hierro goethítico y cobalto, algo menor en relación con el níquel por poseer estos depósitos menor contenido de níquel, dada la ausencia de saprolitas. No obstante, por ser depósitos aereales de significativa extensión, ellos constituyen una de las principales reservas de níquel y cobalto.

Es importante aclarar que en los modelos propuestos para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co se ha utilizado el esquema que utiliza el Servicio Geológico de Columbia Británica en Canada (British Columbia Geological Survey -BCGS - con sus siglas en inglés) para describir sus Perfiles de Yacimientos Minerales -Mineral Deposit Profiles-

## **MODELO DESCRIPTIVO DE DEPOSITOS LATERITICO-SAPROLITICOS DE Fe-Ni-Co**

**NOMBRE:** Depósitos laterítico-saprolíticos de Fe-Ni-Co

**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:** En Cuba: Punta Gorda, Las Camariocas, Moa, Piloto, Yagrumaje en Moa. En otros países: 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 (principalmente 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 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<sup>0</sup>), producidos por la erosión y

meteorización superficial generalmente 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 madres 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 madres 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 (generalmente 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 frecuentemente fluctúa entre 1 y 25m (hasta 50-150 m en caso de cortezas lineales) cubriendo extensas áreas (generalmente cientos de kilómetros cuadrados o lineales). La potencia productiva niquelífera-cobaltífera generalmente es 5-10m. 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 a este tipo de perfil. Estos tipos litológicos de menas son:

*En la laterita:* Ocre Inestructurales con concreciones ferruginosas (OICC); Ocre Inestructurales sin concreciones ferruginosas (OI); y Ocre Estructurales Finales (OEF);

*En la saprolita:* Ocre Estructurales Iniciales (OEI); Roca Madre Lixiviada (RML); y Roca Madre Agrietada (RMA)

**MINERALOGÍA DE LAS MENAS (PRINCIPAL Y SUBORDINADA):** Los minerales principales de las menas son: oxi-hidróxidos de hierro (göethita, alumogöethita, maghemita) y de manganeso (asbolanas y wades: psilomelano, todorokita, woodruffita, feitknechtita, serpentinas hipergénicas (lizardita, crisotilo, antigorita, 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 relicticos de serpentinita limonitizada, nontronitizada, kerolitizada, serpofitizada, así como shamosita y cloritas níquelíferas.

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 (OICC, OI); el cobalto se controla por las litologías inferiores de la laterita (OI, OEF principalmente) y el níquel por éstas últimas (OI, OEF principalmente) así como por las litologías saprolíticas (OEI 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 oxi-hidróxidos de hierro (göethita, maghemita, magnetita) en la proporción de 60-95% del total y en la saprolita se asocia 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 del níquel (10-20%)

El hierro, aluminio y cromo se asocian respectivamente a los siguientes minerales: el hierro en las göethita, 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, facilitando 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 (göethitización 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 madres. A tenor de estas regularidades, los litotipos de la corteza de intemperismo se diferencian intrínsecamente de un yacimiento a otro, provocando 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 madres concomitantes.

COMENTARIOS: Incluye subtipos raros, condicionados por particularidades genéticas, tales como:

- Depósitos laterítico-saprolíticos con conglomerados carbonatado-terrágenos polimícticos (con clastos mayoritariamente de rocas ultramáficas y subordinadamente máficas) como el yacimiento niquelífero Martí (Cuba);
- Depósitos lineales de grietas y grieta-contacto de ultramafitas con rocas carbonáticas y silicáticas (Elizabetínsk, sur de los Urales; Lípovsk, Buryktálsk, Novo-Buránovsk, Rusia y algunos depósitos en Ucrania);
- Depósitos laterítico-saprolíticos eluviales enterrados (sepultados por debajo de sedimentos estratigráficamente más jóvenes) como el depósito Devladóvsk (Urales, Rusia) con 15-25m de ocre y nontronitas cubiertos por 70-100m 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 Ufaliy, 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**

**CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS:** 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- silíceos (silcreta) en la superficie.

**CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS:** 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 grábenes 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 DEPOSITOS SEDIMENTARIOS LITORALES DE Fe-Ni-Co

NOMBRE: Depósitos Fe-Ni-Co sedimentarios litorales.

SINÓNIMOS: Lateritas redepositadas; hierro oolítico-pisolítico sedimentario; hierro shamosítico.

PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS: Fe, Ni, Co, (Cr)

EJEMPLOS: En Cuba: Punta Gorda, Moa. En otros países: 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 grábenes.

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 Hemindway, 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, pudiendo existir aterrazamiento marino. La potencia de los depósitos fluctúa entre 5 y 30 m con una extensión lateral 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, predominando el rojo y amarillo en el material más ocoso y el abigarrado en el más arcilloso, pasando por las tonalidades verdosas. Frecuentan las concreciones goethítico-hematíticas con variados tamaños, alcanzando 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 disseminaciones muy finas de cristales de sulfuros (marcasita, melnikovita, piritita, 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)

**CONTROLES DE LAS MENAS:** Litológico-estratigráfico, relacionado con la composición mineral de las capas litológicas que componen el depósito, siendo meníferas cuando predominan los oxi-hidróxidos 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**

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

CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS: 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 grábenes 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**

Se crea un instrumento metodológico para la sistematización de la información geológica sobre los recursos minerales de Cuba que permite la confección de los modelos descriptivos de yacimientos minerales base para otros tipos de modelos que se utilizan en la actualidad para la prospección, exploración y evaluación del potencial mineral de los territorios en países con elevado nivel de eficiencia en estas actividades y de utilidad para la explotación de los yacimientos a todas las escalas con particular destaque para la pequeña y mediana minería.

Se generaliza la información geológica relacionada con la evolución histórica del pensamiento sobre la formación de los yacimientos, su expresión en diferentes clasificaciones con su transición hacia el concepto actual y moderno de modelo de yacimiento mineral. Este proceso está caracterizado por definiciones y planteamientos fundamentales sobre:

- Papel de los procesos ígneos y del agua en la formación de los yacimientos.
- La profundidad (temperatura y presión) como criterio para establecer la formación de los yacimientos.
- Los mecanismos de formación singenéticos y epigenéticos en particular de las formaciones postmagmáticas.
- El vínculo genético-espacial de las rocas con los yacimientos minerales: las formaciones meníferas.
- Complejidad físico-química de las soluciones y agentes mineralizantes formadores de los yacimientos.
- La geodinámica de la corteza terrestre y su influencia en la formación de los yacimientos minerales.
- Reconocimiento de ambientes geotectónicos a los que se asocian yacimientos minerales específicos.
- El estudio de los isótopos para determinar las características y propiedades de las soluciones mineralizantes.

Se presenta la terminología cubana para la designación de las zonas en los perfiles litológicos del intemperismo, su definición, algunas características texturo-estructurales macroscópicas y su término equivalente en la literatura de origen anglo-francesa lo cual puede ser un referente internacional en este sentido por la importancia mundial que poseen nuestros estudios sobre los yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co.

Por primera vez en Cuba, se presentan tres modelos descriptivos de yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co que pueden contribuir a incrementar la eficiencia de los trabajos mineros mediante una mejor delimitación de las concesiones mineras, lo que repercute en un mejor aprovechamiento de nuestras reservas de minerales de Ni y

Co. De acuerdo con su perfil litológico de intemperismo se diferencian los siguientes tipos:

1. Laterítico o de perfil reducido
2. Laterítico-Saprolítico o de perfil completo
3. Sedimentario-Litoral o redepositado

Por el volumen de sus reservas el más importante para Cuba es el perfil laterítico-saprolítico o completo.

Se aporta un material de estudio y consulta para los estudiantes de Geología y carreras afines de la Educación Superior que contribuye al incremento de la calidad en la formación del profesional mediante la introducción del enfoque de la modelación de yacimientos en las asignaturas vinculadas con el estudio de los recursos minerales sólidos tanto metálicos como no metálicos.

### **RECOMENDACIONES**

- Sugerir a la Oficina Nacional de Recursos Minerales de Cuba que convoque a las entidades estatales de producción, investigación y educación vinculadas con este quehacer en nuestro país, para crear el Grupo de Modelación de Yacimientos y elaborar un proyecto que tenga como resultado la elaboración de los Modelos Descriptivos de Yacimientos Minerales, tanto metálicos como no metálicos.
- Proponer a la Comisión de Carrera de Ingeniería Geológica la incorporación del enfoque de modelos de yacimientos en la impartición de la asignatura Geología de Yacimientos Minerales. Para ello se debe realizar un diseño didáctico que tome en consideración no solo los contenidos teóricos a impartir sino la actividad prácticas de confección de modelos por los estudiantes a partir del análisis discriminante de la información y de la literatura que existe sobre modelos y perfiles de yacimientos minerales.
- Proponer al Programa de Modelación de Yacimientos del IUGS-UNESCO, a través de su representante en Cuba, los Modelos Descriptivos de Yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co como referentes internacionales así como la celebración de un taller internacional con sede en el Instituto Superior Minero Metalúrgico



de Moa, para debatir en torno a los modelos descriptivos de yacimientos de lateritas de Fe-Ni-Co haciendo énfasis en la terminología a aplicar en los distintos horizontes del perfil laterítico y en su composición mineralógica.

- La aplicación de los modelos descriptivos aquí propuestos a las organizaciones geológicas encargadas de los estudios de exploración y evaluación de recursos minerales, para delimitar las concesiones mineras de nuestros yacimientos lateríticos con vistas a incrementar el aprovechamiento de nuestras reservas mediante una explotación y recuperación de Ni y Co más eficientes.

## BIBLIOGRAFIA

ANACONDA NICKEL LTD .(<http://www.anaconda.com/> 2002

ARIOSIA IZNAGA J. D. & R. DÍAZ MARTÍNEZ Re-evaluación geológica en el área de los entrerríos Mayarí y Miguel para la localización de minerales útiles, utilizando el Método de Jagua y pronóstico de zonas perspectivas. Informe Fondo Geológico ISMM. Moa, 1987.

ARIOSIA IZNAGA J. D. Apuntes sobre modelos de yacimientos minerales. Conferencias para el Curso de Posgrado "Modelos de Yacimientos Minerales" EGMO-MINBAS/UO-MES. Enero del 2002.

ARIOSIA IZNAGA J. D, W. LAVAUT COPA, P.S. BERGUES GARRIDO . Aproximación a un modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en el macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. Revista Minería y Geología (en prensa).

ARIOSIA IZNAGA J.D. & R. DÍAZ MARTÍNEZ Perspectiva titanífera de la cuenca hidrográfica del río Levisa. Revista Minería y Geología, Vol. 6 No. 3., 1988.

ARIOSIA IZNAGA J.D., DÍAZ MARTÍNEZ R. Modelos de yacimientos minerales: tipologías y aplicaciones Revista Minería y Geología, (en prensa).

ARIOSIA IZNAGA, J. D & O.V.LEPIN Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de yacimientos minerales sólidos. Primera Parte. Ed. Pueblo y Educación, 1986, Primeras reimpression 1990.

ARIOSIA IZNAGA, J. D. Algunas características de las cortezas de intemperismo y sus perfiles en el yacimiento Martí, Grupo Nicaro, Revista Minería y Geología, Cuba.

- ARIOSA IZNAGA, J. D. Curso de yacimientos minerales metálicos: tipos genéticos. Ed. Pueblo y Educación, 1977.
- ARIOSA IZNAGA, J. D. Curso de yacimientos minerales no metálicos. Ed. Pueblo y Educación, 1984.
- ARIOSA IZNAGA, J. D. Modelos geoambientales de yacimientos minerales y su aplicación a los recursos auríferos de la República de Nicaragua". Tesis en Opción al grado de Master en Planificación y Administración Ambiental de Proyectos. PEAUT/UNI, Managua, Nicaragua, 2001.
- ARIOSA IZNAGA, J. D. Perspectivas bauxíticas de Cuba oriental. Informe del tema 17-01 Centro de Investigaciones Geológicas del Ministerio de la Industria Básica de Cuba, Fondo Geológico, 1984
- ARIOSA IZNAGA, J.D. & O.V.LEPIN Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de yacimientos minerales sólidos, Segunda Parte. Ed. Pueblo y Educación, 1986
- ARIOSA IZNAGA, J.D. Principios de Metalogenia General. Manuscrito. Universidad de Oriente. 1988
- BARKER W.W. ET AL Biogeochemical weathering of silicate minerals en Geomicrobiology:interactions between microbes and mineral J.F.Bannfield y K. H. Nealson, Ed. Reviews in Mineralogy, AMS, Vol 35, pp 391-419, 1997.
- BARROS DE OLIVEIRA S. M., J.J. TRESCASES, A.J.MELFI. Lateritic nickel deposits of Brazil, Mineralium Deposita 27, pp 137-146, 1992.
- BARTO-KYRIAKIDIS A. (ED) Weathering: its products and deposits Vol I: Processes. Theophrastus Publ. S.A., Gracia, 1989.
- BARTON JR., P.B. , Problems and Opportunities for Mineral Deposits Models, en Kirkham R. V. et al "Mineral deposit modeling". GAC, Special Papel 40, pp 7-14, 1995.
- BARTON P. B. Commodity/geochemical index en Cox D. P. Singer D. A. eds. Mineral deposit models USGS Bulletin 1693, 1986, <http://www.usgs.gov/>
- BATEMAN A. M. Economic mineral deposits, 2d ed. 1954.
- BATEMAN A. M. The formation of mineral deposits, 2d. ed. 1956.
- BERNER R. Kinetics of weathering and diagenesis en Reviews in Mineralogy, Vol 8 A. C. Lasaga y Kirkpatrick(eds), pp 11-132, 1981.
- BIRKELAND P.W. Pedology, weathering and geomorphological research. Oxford Univ.Press, 1974.

- BLAND W. Y ROLLS D. Weathering. An introduction to the scientific principles, 1998.
- BLISS J.E. EDS Developments in mineral deposit modelling, USGS Bulletin 2004, 1992, [http://www.usgs.gov/open\\_files](http://www.usgs.gov/open_files)
- BONATTI E. The origin of metal deposits in the oceanic lithosphere. Scientific American 238 No. 2 pp 54-61, 1978.
- BRINHALL G. The genesis of ores. Scientific American 264, No 5, pp 84-91, 1991.
- BUGUELSKY, Y.Y. VÁZQUEZ, A., GRIGORIEVA, I. I., DOBROVOLSKAYA, M. G., CABRERA, R., KRAVCHENKO, G. G., KRAMER, J., LOVEROV, N. R., MALINOSKY, E. P., PAVLOV, N. G., PANTALEÓN, G., PONCE, N., SAFONOV, G. Y., TOLKUNOV, A. E., FORMELL, F., HERNÁNDEZ, J., Yacimientos minerales de Cuba. Ed. Nauka, Moscú, 248 p., 1985
- CARROLL D. Rock weathering, Plenum Press, 1970.
- CHAMBERLAIN, T. C. The method of multiple working hypothesis: Journ. Geology V. 5, 1897.
- CHITTLEBOROUGH D. J Indices of weathering for soils and paleosoils formed on silicate rocks. Australain Journal of Earth Sciences 38, pp 115-120, 1991.
- COBAS BOTEY R. MA., W.LAVAUT COPA, N.DESPAIGNE BUENO. Modelos geológicos de yacimientos lateríticos cubanos. Resúmenes del Tercer Congreso de Geología y Minería, Geomin 98, La Habana, Cuba, 1998
- COLIN F. NAHON D, TRESCASES J.J., MELFI A.J. Lateritic weathering of pyroxenites at Niquelandia, Goias, Brazil:the supergene behavior of nickel. Economic Geology Vol 85, pp 1010-1023, 1990.
- COX D. N. ET AL ED. Mineral deposits models, USGS Bulletin, 1693, 1986, <http://www.usgs.gov/>
- COX D. P., RYTUBA J.J. Lihir Isalan gold: a suplement to U.S.G.S. Bulletin 1693 Open file report 87-272, 1987 <http://www.usgs.gov/>
- COX V.S. The iron ore deposits of the Moa district, Oriente province, Island of Cuba. Trans.Amer.Inst.Min.Eng., vol 42, 1911
- COX. D.P. The development and use of mineral deposits models in the United States Geological Survey en Kirkham R.V et al en "Mineral deposit modeling". GAC, Special Paper 40, pp 15-30, 1995.
- CRAIG J. R, VAUGHAN D. J., SKINNER B. J. Resources of the earth. Prentice –Hall Inc. 1988.
- CROOK TH. History of the theory of ore deposits with a chapter on the rise of petrology, 1933.

- CRUZ BARANDA S. Metodología de la Investigación Científica. Centro de Estudios de la Educación Superior, Universidad de Oriente, 2000.
- CUNNINGHAM C.G, G.H.ALLCOTT, A.T.OVENSINE, S.B.GREEN, 1993 The IUGS/UNESCO deposit modeling program, en Kirkham R. V et al "Mineral deposit modeling". GAC, Special Paper 40, pp 1-6, 1995.
- DANA J.D. Manual de Mineralogía, Tercera Edición, 1965.
- DE BONNO E. I am right, you are wrong: Viking, London, 1990.
- DE CARVALHO JR O.A., E.DE SOURZA MARTINS, G.MACEDO DE MELLO BAPTISTA, J.. DA SILVA MADIERA NETTO, P.R. Meneses Mineralogical differentiation in weathering profiles of lateritic Ni. Using AVIRIS data, in Niquelandia, <http://makalu.jpl.nasa.gov/2002/>
- DE PEDRAZA GILSANZ, J. Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. Editorial Rueda, España, 1996.
- DE VETTLER D.R. How Cuban Nickel ore was formed: a lesson in laterite genesis. Engineering and Mining Journal, v. 156 No. 10, pp 84-87, 1955
- DE VLETTER D. R. La génesis de los minerales lateríticos de níquel en el Este de Cuba, 1953 Doc. 1708 -ONRM Moa-
- DERRY R. D. Geology and ore deposits en Hood P. J (ed) "Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores." Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 31, 1979
- DEVERLE P.H., P. HARRIS, F.P. AGTERBERG The appraisal of mineral resources en Skinner B.J Ed Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980. The Economic Geology Publishing, pp897-938, 1981.
- DEWEY J.F. Plate tectonics Scientific American (May) 226 pp 56-68, 1972.
- DÍAZ MARTINEZ, R. Tema 1.Introducción, conceptos importantes, clasificación de los yacimientos minerales. Características de los ambientes geotectónicos. Conferencias del ISMM, Moa, 1999
- DU BRAY E.A. ED. Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models USGS Open file Report 95-0831, <http://www.usgs.gov/>
- DUDA R. O. The Prospector system for mineral exploration: Menlo Park, Calif. Stanford Research Institute Final Report, Project 8172 en Bliss J.D. "Development in mineral deposit modeling", USGS Bulletin 2004, 1992,<http://www.usgs.gov/>
- ECKSTRAND O.R. ET AL EDS. Geology of Canadian Mineral Deposit Types, Geological Survey of Canada, Geology of Canadá No. 8, 1995.

- EHLE E.L , R. L. Bates Geology, geologist and mineral exploration en Skinner B. J. "Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980". The Economic Geology Publishing Co, pp 766-774, 1981.
- EKSTRAND O.R. (ED) Canadian mineral deposits types: A geological synopsis. Geological Survey of Canadá, Economic Geology Report 36, 1984.
- EMBLETON C, J. Thornes. Process in Geomorphology, 1979.
- EMP V.F. Iron ore resources in the West Indies. The iron ore resources of the world. Stockholm, v 11, 1910.
- ERICKSON R.L (COMPILER) Characteristic of Mineral Deposit Occurrences. Open File Report 82-795 USGS, 1982 <http://www.usgs.gov/>
- ETHERIDGE M.A, HENLEY Y WILLIAMS ETHERIDGE. MAKING MODELS MATTER IN "NEW MINERAL DEPOSIT MODELS FOR THE CORDILLERA", MINISTRY OF ENERGY AND MINES, COLUMBIA BRITÁNICA, CANADA, PP 1-2, 2000.
- EVANS A.E. ORE GEOLOGY AND INDUSTRIAL MINERALS, 3TH. ED. BLACKWELL SCIENCE, 1993.
- FANIRAN A Y JEJE L.K Humid tropical geomorphology. 1983.
- FEIGENBAUM E, MCCORDUCK P, NII H.P. The rise of the expert company. New York, Time Book Inc., 1988.
- FISCHER R. B., W.M. DRESSEL. The Nicaro (Cuba) nickel ores. United States Dept. of Interior, Bureau of Mines, Report of Investigation 5496, 1959.
- FLINT D.E, J.F. DE ALBEAR, P.D. GUILD. Geology and chromite deposits of the Camagüey District, Camagüey Province, Cuba, USGS Bulletin 954-B, 1948.
- FORMELL CORTINA F. Clasificación morfogenética de las cortezas de intemperismo níquelíferas sobre las rocas ultrabásicas de Cuba. Ciencias de la Tierra y el Espacio, 1, pp 33-49, 1979.
- FRIEDRICH G., J. WILCKE, A. MARKER. Laterites derived from ultramafic rocks- an important chromite resource en Rodríguez- Clemente R. Y. Y. Tardy "Geochemistry and mineral formation in the Earth Surface", CSIC-España/CNRS-Francia, pp 232-244, 1987.
- FRYE K. The encyclopedia of mineralogy, Encyclopedia of Earth Sciences, Vol IVB, 1981.
- FURRAZOLA G Y K NÚÑEZ (EDS) Estudios sobre geología de Cuba, Centro Nacional de Información Geológica, IGP-Cuba, 1997.
- GASS I.G. Ophiolites. Scientific American 247 No.2 pp 122-131,1982.

- Geología y Minería'98 Memorías. Sociedad Cubana de Geología, Vols. 1 y 2. 1998
- GOLIGHTLY J.P. Nickeliferous laterite deposits en Skinner B.J Ed "Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980". The Economic Geology Publishing Co. Pp. 710-735, 1981.
- GRAIZER M. I, M.M. IPATOV. Evolution of continental weathering processes and associated metallogenesis in the history of the Earth en Barto-Kyrialidis A. Ed "Weathering: its products and deposits", Vol II. p 487-498, 1989.
- GRUNSKY, E. C. Grade-Tonnage Data form Mineral Deposit Models, en Geological Fieldwork 1994, BC-MEMPR Ed., Paper 1995-1, pp 417-423, 1995.
- GUILBERT J.M, CHARLES F. PARK, JR. The geology of ore deposits, 1986.
- 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,n Borntraeger, Berlin, 1926.
- HAYES C.W. The Mayarí and Moa iron ore deposits in Cuba. Trans.Amer.Inst.Min.Eng. v 52, 1911.
- HENLEY R.W ET AL, 1993 What is an exploration model anyway? An analysis of the cognitive development and use of models in mineral exploration en Kirkham R.V et al "Mineral deposit modeling": GAC, Special Paper 40, pp 41-50, 1995.
- HERAN W.D (ED) Codicil to the geophysical expression of selected mineral deposit models. USGS Open-File Report 94-174, 1994, <http://www.usgs.gov/>
- HODGSON C. J. Uses (and abuses) of ore deposit models in mineral exploration en "Ore deposit models, vol II P.A. Shearon y M.E. Cherri (eds) Geoscience Canada, Reprint Series 6, pp 1-11
- HOOVER D. B, KLEIN D. P, CAMPBELL D. C. Geophysical methods in exploration and mineral environmental investigations en Du Bray E. A. "Preliminary complitation of descriptive geoenvironmental mineral deposits models" Open file report 95-0831, pp 19-27, 1995. <http://www.usgs.gov/>
- HOOVER D.B, W.D. HERAN, P.L. HILL (EDS) The geophysical expression of selected mineral deposit models USGS Open file Report 92-597, 1992, <http://www.usgs.gov/>
- HUTCHISON CH.S. Economic deposits and their tectonic setting, 1985
- ITURRALDE-VINENT, M. Sinopsis de la Constitución Geológica de Cuba en Melgarejo J.C. y J.A. Proenza Eds "Acta Geológica Hispánica", v. 33, No 1-4, pp 9-56, 1998.
- ITURRALDE-VINENT, M. Cuban Geology: a new plate tectonic synthesis. Journal of Petroleum Geology, 17(1) pp 39-70, 1994.

- ITURRALDE-VINENT, M. Introducción de la geología de Cuba en G. Furrázola, K Núñez(eds) "Estudios sobre geología de Cuba" IGP-Cuba pp3-35, 1997.
- ITURRALDE-VINENT, M. Introduction to Cuban geology and tectonics. En M. Iturralde-Vinent (ed) Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba IGCP Project 364, 1996
- JOHNSON K.M Project on Mineral Deposit Modeling, <http://www.iugs.org/>, 2001.
- JUNTA DE SEGURIDAD DE RECURSOS NATURALES (J.S.R.N) Estudio sobre minerales de Cuba. Hierro. 1950 Doc. 425-ONRM Moa-
- KEMP V.F. The Mayarí iron ore deposits, Cuba. Trans.Amer.Inst.Min.Eng. vol 51, 1915.
- KESLER S.E. E. LEVY Y C. MARTIN. Metallogenic evolution of the Caribbean region en Dengo G. y J.E. Case Eds. "The Caribbean Region", Boulder, Colorado, GSA, The Geology of North América, Vol. H, pp 459-481, 1990.
- KESLER S.E. Mineral resources, economics and the environment, MacMillan College Pub.Co., 1994.
- KIRKHAM R.V, ET AL. Mineral deposit modeling: Geological Association of Canada, Special Paper 40, 1995.
- KNEPPER JR., D. H, W. H. LANGER, S.H. MILLER. Remote sensing and airborne geophysics in the assessment of natural aggregate resources. USGS Open-File Report 94-158. Modified 18 Jun, 1999, <http://www.usgs.gov/>
- KORIN I.Z., V.I. FINKO, D. P. COUTIN, Geología y génesis de los yacimientos de níquel en la corteza de intemperismo de Cuba en " Geología de los yacimientos minerales útiles de Cuba(en ruso) Ed. Nauka, Moscú, 1973
- KOTLIAR V.N. Osnovi teorii rudoobvrazovania (en ruso) Fundamentos de la teoría de la formación de las menas. Ed. Niedra, 1970.
- KREITER V. M. Geological Prospecting and Exploration. Mir Publishers, Moscow, 1968.
- KRONBERG B. I., FYFE W. S. Tectonics, weathering and environment en Barto-Kyriakidis A(ed) "Weathering: its products and deposits" Vol I, Processes, Teophrastus Publ. S. A. Grecia, pp 3-11, 1989.
- LATERITE EXPLORATION. PY Inco <http://www.incoltd.com/2002/>
- LAVANDERO ILLERA R. M, JESÚS MOREIRA, JORGE L. TORRES, ARIADNA SUÁREZ, JUSTO MONTANO, ALBERTO MORALES, IDENIA ALTARRIBA, FÉLIX BRAVO, BIENVENIDO HECHEVARRÍA, DALIA CARRILLO, JORGE L. CHANG, DOMINGO GONZÁLEZ. Potencialidad de recursos minerales para metales preciosos y bases en la región oriental de Cuba. Geomin, 2001.

- LAVANDERO, R., ESTRUGO, M., SANTA CRUZ, M., BRAVO, F., MELNIKOV, Q., CASAÑAS, X., ANIATOV, I., KRAPIVA, L., BAYARKHU, B., CARILLO, D. AND ALTARRIBA, I., Sistematización y Generalización de los Yacimientos Minerales Metálicos. Instituto de Geología y Paleontología, Ciudad de La Habana, Cuba: Inédito., 1985.
- LAVAUT COPA W. 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. Moscú, 1987.
- LAVAUT COPA W., H. BARRABÍ DIAZ, R. RODRÍGUEZ CROMBET, J.D. ARIOSAZNAGA. Modelo descriptivo de depósitos Fe-Ni-Co lateríticos. Trabajo final del Curso de Posgrado "Modelos de Yacimientos Minerales". UO-EGMO, 2002.
- LAVAUT COPA W., P.S. BERGUES GARRIDO, M. LABRADA GARCÍA, J.D. ARIOSAZNAGA. Modelo descriptivo de depósitos Fe-Ni-Co lateríticos saprolíticos. Trabajo final del Curso de Posgrado "Modelos de Yacimientos Minerales" UO-EGMO, 2002.
- LAVAUT COPA, W. Y J.D. ARIOSAZNAGA. Modelo descriptivo de depósitos Fe-Ni-Co sedimentarios litorales. Trabajo final del Curso de Posgrado " Modelos de Yacimientos Minerales" UO-EGMO, 2002.
- LAVEROV N.P. (RED) Yacimientos minerales metálicos de Cuba (en ruso) Ed. Nauka, Moscú, 1985.
- LAZNICKA P, Empirical metallogeny: depositional environments. Lithologic associations and metallic ores, Vol 1 Phanerozoic environments, associations and deposits, Elsevier, 1985.
- LEFEBURE D. V, T HÖY (EDS) Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles Volume 2: Metallic Deposits. Open file 1996-13, Updated February 2000 <http://www.em.gov.bc.ca/>
- LEFEBURE D.V, G. E. RAY (EDS) Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles Volume 1: Metallics and Coal, Open file 1995-20, Updated February 2000. <http://www.em.gov.bc.ca/>
- LEITH C.K, W.J. Mead. Additional data on origin of lateritic iron ores of eastern Cuba. Trans. Amer. Min. Eng. vol 53, 1915.
- LEWIS G.E., STRACZEK J.A. Geology of south-central Oriente, Cuba. USGS Bull. 975-D, 1955
- LIMA COSTA M. Laterization as a major process of ore deposits formation in the Amazon region. Explor. Mining Geol., vol 6, No.,1, pp 79-104, 1997



- LIPS A. Links between geodynamics and mineralization, en D. Blunndell "Active tectonics and mineralisation in the SW Pacific region: a modern analogue for ancient Europe?" pp 5-7. <http://www.gl.rhbnc.ac.uk>, 2000.
- LUDINGTON S, D. P. COX, D. A. SINGER, M.G. SHERLOCK, B.R. BERGER, J.V. TINGLEY, 1993. Spatial an temporal analysis of precious-metal deposits for a mineral resource assessment of Nevada en Kirkham R. V et al "Mineral deposit modeling" GAC, Special Papel 40, pp 31-40, 1995.
- LUDINGTON S, P.B. BARTON JR., K. M. JOHNSON. Mineral deposits models: theory and practice. Open file report 85-391, 1985 USGS, <http://www.usgs.gov/>
- MARTINI I. P., Chesworth W. Weathering, soils, and paleosoils, 1992.
- MC MILLAN W Recursos de níquel de Cuba.1955, Doc. 1708 File No.8 ONRM, Moa.
- MCCAMMON R. B. PROSPECTOR II- an Expert System for mineral deposit models en Kirkham R. V et al "Mineral deposit modeling" Geological Association of Canada, Special Papel 40, pp 679-684 1995.
- MCCAMMON R.B Numerical mineral deposit models en Bliss J.D. (ed) "Developments in mineral deposit modeling" USGS Bulletin 2004, PP6-12, 64-167, 1992, <http://www.usgs.gov/>
- MCLEOD JR. R. Management Information systems, 5<sup>th</sup> ed. McMillan Publishing. Co. 1993.
- MELGAREJO J.C, Coordinador. Atlas de Asociaciones minerales en lámina delgada. Universidad de Barcelona/Fundación Folch, 1997.
- MELGAREJO J.C, J.A. PROENZA (EDS) . Acta Geológica Hispánica Vol. 33, nº. 1-4, 1998.
- MEYER CH. Ore-Forming processes in Skinner B.J. Ed. "Economic Geology: Seventy.Fifth Anniversary Volume 1905-1980" The Economic Geology Publishing Co., pp 6-41, 1981.
- MILENBUCH D. C. An early appraisal approach to exploration projects: Minning Cong. Journal. V. 64 No. 3)
- MINBAS. ,1988. Monografía de Yacimientos Minerales de la República de Cuba. Ministerio de la Industria Básica. La Habana. Cuba.
- MITCHELL A.H.G, M.S. GARSON. Mineral deposits and global tectonic settings, 1981.
- MONTTOULIEU E.I., L.J.ABALO Tendencia sobre el aspecto tecnológico de la explotación de los minerales lateríticos de Moa, 1957, Doc. 1708 File No. 7, ONRM-Moa.

- MOREIRA MARTÍNEZ J, RAFAEL M LAVANDERO, JUSTO LUIS MONTANO, JORGE LUIS TORRES Y ROBERTO SÁNCHEZ. Depósitos de Skarn de Cuba, Geomin 2001. La Habana. Cuba.
- MOREIRA, J., TORRES, J. MONTANO, J., MORALES, A. FÉLIX BRAVO, LAVANDERO, R., ARIADNA SUÁREZ, SÁNCHEZ, R. Modelos de depósitos minerales en la región oriental. Algunas consideraciones genéticas y criterios para su exploración. Metales preciosos y bases. Instituto de Geología y Paleontología, 1999.
- MUÑOZ GÓMEZ, J.N. (Presidente de la comisión de carrera) Perfeccionamiento del plan de estudio "C". Carrera: Ingeniería Geológica, Moa, 1997.
- NAHON D. B, B. BOULANGE, F. COLIN. Metallogeny of weathering: an introduction, en I.P. Martini y W. Chesworth (eds) "Weathering, soils, and paleosols", pp 445-469, 1992.
- NAHON D. Microgeochemical environments in lateritic weathering. En R.Rodríguez.-Clemente e Y. Tardy: "Geochemistry and mineral formation in the earth surface" CSIC-CNRS, pp 141-156, 1987.
- NEW MINERAL DEPOSITS FOR THE CORDILLERA. Abstracts for presentation at the 1996 Cordilleran Roundup Short course. Ministry of energy and Mines Government of British Columbia. Canada. Updated 11 Feb. 2000.
- NICKEL 2000 The major Nickel deposits of the world. Module 1. Australasia, Part B, South West Pacific Laterites: New Caledonian Oxide Nickel laterites <http://www.portegeo.com.au/2002>
- NOBLE J.A. The classification of ore deposits en A. M. Bateman Ed."Economic Geology: Fiftieth Anniversary Volume 1905-1955, pp 155-169, 1955.
- OHLE E. L, BATES, R. L. Geology, Geologist and Mineral Exploration en Skinner B.J. Ed. "Economic Geology: Seventy.Fifth Anniversary Volume 1905-1980" The Economic Geology Publishing Co., pp 766-774, 1981.
- SKINNER B. J. (ED) 75th Anniversary Volume, The Economic Geology Publishing Co. 1981.
- OLLIER C.D. Weathering, 2d edition. Longman. London, 1975
- ORRIS G.J, J.D. BLISS (EDS) Some Industrial mineral deposit models: descriptive deposit models Open file Report 91-11 A /1991, <http://www.usgs.gov/>
- PAGE N. J. Characteristics of metallic deposits associated with ultramafic and mafic rocks en Erickson R.L (Compiler) "Characteristic of Mineral Deposit Occurrences" Open file Report 82-795, pp 1-12, 1982, <http://www.usgs.gov/>

- PARK C. F, COX M.W. Manganese deposits in part of Sierra Maestra, Cuba USGS Bull 935 F, 1944
- PARK C. F. Manganese deposits of Cuba. USGS Bull 935-B, 1942.
- PASAVA J, BOHDAN KRIBEK, KAREL ZAK (EDS) Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts A.A. Balkema Publishers, 1995.
- PEDRO G. Distribution des principaux types d'alteration chimique a la surface du globe. Presentation d'une esquisse geographique. Revue de Geographie physique et de geologie dynamique(2) Vol X Fasc. 5 pp 457-470, Paris,1968
- PLUMLEE G. S, J. TH, NASH. Geoenvironmental models of mineral deposits: fundamentals and applications en Du Bray E.A. Ed. "Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models" USGS Open file Report 95-0831, pp 1-9, 1995,<http://www.usgs.gov/>
- PONCE SEOANE, N. Norma ramal: Cortezas de intemperismo ferroniquelíferas. Términos, definiciones, símbolos. La Habana, Cuba, 1983
- PROENZA J. A, J.C. MELGAREJO. Una introducción a la metalogenia de Cuba bajo la perspectiva de la tectónica de placas en Melgarejo J. C. et al Ed. Acta Geológica Hispánica, Vol 33 N° 1-4, p 89-131, 1998.
- PROUST D., MEUNIER A Phase equilibria in weathering processes en Barto-Kyriakidis A (ed) "Weathering: its products and deposits" Vol I Processes. Teophrastus Publ. S. A. Grecia, pp 121-145, 1989
- RIDDLER G.P. What is a mineral resource? BGS en Whateley M.K.G et al Eds, 1994 Mineral resource Evaluation II: Methods and Case Histories. Geological Society Special Publication. No. 79, 1-10
- RIDGE J.D. Mineral deposits: clasification en Frye K. "The Encyclopedia of mineralogy". Encyclopedia of Earth Sciences, Vol IVB, pp 252-258, 1981.
- RIES H.A.M. Economic Geology. Chapman and Hall, 1916.
- ROBERT M, TESSIER D. Incipient weathering: some new concepts on weathering, clay formation and organization en Martini I.P y Chesworth W " Weathering, soils and paleosoils", pp 71-105, 1992.
- ROBERTS R.G, SHEAHAN P.A. Ore deposit models. Geoscience Canada. Reprint Series 3, 1988.
- RODRÍGUEZ ROMERO, M. Clasificación tipologica de los depositos auríferos de Cuba, Geomin 2001

- RODRÍGUEZ-CLEMENTE R E Y. TARDY. Geochemistry and mineral formation in the earth surface. CSIC/CNRS. España/Francia, 1987.
- ROUTHIER P. Les gisements metallifères: Geologie et principes de recherche, tome II, 1963
- SAWKINS F.J. Metal deposits in relation to plate tectonics Second Edition, Springer-Verlag 2d edition, 1990.
- SCHELLMANN W. Composition and origin of lateritic nickel ore at Tagaung Taung, Burma. Mineralium Deposita 24, 161-168, 1989.
- SIMANDL G.J, Z.D. HORA, D.V. LEFEBURE (EDS) Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles Volume 3: Industrial minerals and Gemstones. Open file 1999-10 Updated February 2000, <http://www.em.gov.bc.ca/>
- SIMMONS F. S., STRACZEK J.A. Geology of manganese deposits of Cuba USGS Bull, 1958.
- SINGER D. A. Development of grade and tonnage models for different deposit types en Kirkham R. V., Sinclair W.D, Thorpe R. I y Duke J. M eds. "Mineral Deposit Modeling": Geological Association of Canada, Special Paper 40, pp 21-30, 1995
- SINGER D. A. Grade and tonnage model of lateritic Ni en Cox y Singer (ed) USGS 1693 "Mineral Deposit Model", pp 252-253, 1986, <http://www.usgs.com/>
- SINGER D. A. Model 38 a: Descriptive model of lateritic Ni. en Cox y Singer (ed) USGS 1693 "Mineral Deposit Model", pp 252-252, 1986, <http://www.usgs.com/>
- SINGER D.A, D. L. MOSIER, W. D. MENZIE. Digital grade and tonnage data for 50 types of mineral deposits, USGS Open File Report 93-280, 1993, <http://www.usgs.gov/>
- SINIAKOV V.I. Osnovi teorii rudongenezha(en ruso). Ed. Niedra, Moscú, 1987.
- SKINNER B.J. ED. Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980. The Economic Geology Publishing Co, 1981.
- Smirnov V. I. (Redactor) Guenesis endogennij rudnij mestorozhdenii(en ruso) Ed. Niedra, Moscú, 1968
- Smirnov V.I. Geología de yacimientos minerales. Editorial MIR, Moscú, 1982
- SNOW G.G, B.W. MACKENZIE. The environment of exploration: economic, organizational and social constraints en Skinner B.J. Ed. "Economic Geology: Seventy-Fifth Anniversary Volume 1905-1980". The Economic Geology Publishing Co., pp 871-896, 1981.
- SPENCER J. The Mayarí iron ore deposits of Cuba. The Iron Age, v 158, 1907.

- STAPLES LL.W Mineral clasification history, en Frye K. "The Encyclopedia of mineralogy. Encyclopedia of Earth Sciences", Vol IVB, pp 248-249, 1981.
- STRONG D. F (ED) Metallogeny and Plate tectonics. Geological Association of Canada. Special Papel No. 14, 1976.
- TARDY Y. Diversity and terminology of lateritic profiles en Martini I.P., Cheswort W., "Weathering, soils and paleosoils", Development in Earth Surface Processes, Amsterdam, pp 379-401, 1992.
- TARDY Y. Petrologie des laterites et des sols tropicaux, Masson et Cie, Paris 1993.
- THAYER T. P. Chrome resources of Cuiba USGS Bull 93-A, 1942.
- THOMAS M.F Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates Macmillan, London, 1974.
- THOMPSON J.F.H. Application of deposit models to exploration en Kirkham R. V et al "Mineral Deposit Modeling" GAC. Special Paper 40, pp 51-67, 1995.
- TOLKUNOV, A. E., MALINOVSKI, E. P., CABRERA, R. AND CARASSOU, G. Características comparativas de los yacimientos de cobre de Cuba. In Geología de los yacimientos minerales útiles de Cuba, Academia de Ciencias de Cuba, Special Publication No. 3, p. 7-61, 1974.
- TRESCASES J.J. Nickeliferous laterites: a review on the contributions of the last ten years. Geological Survey of India. Memoirs 120: pp 51-62, 1986.
- VANECEK M. ED. Mineral deposits of the world. Developments in Economic Geology 28, Elsevier, 1994
- VITOVSKAIA I.V. Nickel mineral forms and concentration mechanisms in lateritic deposits, en Barto-Kyriakidis A. Ed. "Weathering: its products and deposits". Vol II.Theophrastus Publ. S.A. pp 147-169, 1989
- VOLFSON F. I. Razvitie uchenia o rudnij miestorozhdeniaj v SSSR,(en ruso) Desarrollo del estudio sobre los yacimientos meníferos en la URSS. Ed. Nauka, 1969
- WHITE A.F Y BRANTLEY S.L Chemical weathering rates of silicate minerals: an overview. Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America Vol 31, pp 1-23, 1995.
- WOODRING W. P., DAVIESS S. N. Geology and manganese deposits of Guisa-Los Negros area, Oriente province, Cuba. USGS Bull, 925-G, 1944

**BIBLIOGRAFIA DEL AUTOR SOBRE EL TEMA DE LA TESIS**

- ARIOSIA IZNAGA J. D. & R. DÍAZ MARTÍNEZ Re-evaluación geológica en el área de los enterríos Mayarí y Miguel para la localización de minerales útiles, utilizando el Método de Jagua y pronóstico de zonas perspectivas. Informe Fondo Geológico ISMM. Moa, 1987.
- ARIOSIA IZNAGA J. D. Apuntes sobre modelos de yacimientos minerales. Conferencias para el Curso de Posgrado "Modelos de Yacimientos Minerales" EGMO-MINBAS/UO-MES. Enero del 2002.
- ARIOSIA IZNAGA J. D, W. LAVAUT COPA, P.S. BERGUES GARRIDO. Aproximación a un modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en el macizo ofiolítico Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. Revista Minería y Geología (en prensa).
- ARIOSIA IZNAGA J.D. & R. DÍAZ MARTÍNEZ Perspectiva titanífera de la cuenca hidrográfica del río Levisa. Revista Minería y Geología, Vol. 6 No. 3., 1988.
- ARIOSIA IZNAGA J.D., Díaz Martínez R. Modelos de yacimientos minerales: tipologías y aplicaciones Revista Minería y Geología, (en prensa).
- ARIOSIA IZNAGA, J. D & O.V.LEPIN Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de yacimientos minerales sólidos. Primera Parte. Ed. Pueblo y Educación, 1986, Primeras reimpresión 1990.
- ARIOSIA IZNAGA, J. D. Algunas características de las cortezas de intemperismo y sus perfiles en el yacimiento Martí, Grupo Nicaro, Revista Minería y Geología, Cuba.
- ARIOSIA IZNAGA, J. D. Curso de yacimientos minerales metálicos: tipos genéticos. Ed. Pueblo y Educación, 1977.
- ARIOSIA IZNAGA, J. D. Curso de yacimientos minerales no metálicos. Ed. Pueblo y Educación, 1984.
- ARIOSIA IZNAGA, J. D. Modelos geoambientales de yacimientos minerales y su aplicación a los recursos auríferos de la República de Nicaragua". Tesis en Opción al grado de Master en Planificación y Administración Ambiental de Proyectos. PEAUT/UNI, Managua, Nicaragua, 2001.
- ARIOSIA IZNAGA, J. D. Perspectivas bauxíticas de Cuba oriental. Informe del tema 17-01 Centro de Investigaciones Geológicas del Ministerio de la Industria Básica de Cuba, Fondo Geológico, 1984

ARIOSIA IZNAGA, J.D. & O.V.LEPIN Búsqueda, exploración y evaluación geológico-económica de yacimientos minerales sólidos, Segunda Parte. Ed. Pueblo y Educación, 1986

ARIOSIA IZNAGA, J.D. Principios de Metalogenia General. Manuscrito. Universidad de Oriente. 1988