

***UNIVERSIDAD DE PINAR DEL RIO
"HERMANOS SAIZ MONTES DE OCA"
FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA***

***Estudios de Estimación y
Simulación Geoestadística para la
Caracterización de Parámetros
Geólogo - Industriales en el
Yacimiento Laterítico Punta Gorda***

Tesis

*Presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas*

Autor: Lic. José Quintín Cuador Gil, MSc.

Tutor: Dr C Waldo Lavaut Copa

Pinar del Río
2002

Declaración de autoridad

En cumplimiento de la Resolución Rectoral No. 17/98, los resultados que se exponen en la presente tesis se han alcanzado como consecuencia del trabajo realizado por el autor y asesorado y/o respaldado por la Empresa Ernesto Che Guevara de la Unión del Níquel, la Empresa Geominera de Oriente y la Universidad de Pinar del Río, por tanto, los resultados en cuestión son propiedad del autor y de estas instituciones, y sólo ellos podrán hacer uso de los mismos de forma conjunta y recibir los beneficios que se deriven de su utilización.

Lic. José Quintín Cuador Gil, MSc.
Autor.

Dedicatoria

A mi madre, el viejo, Liony y Ana Laura

A nuestra Revolución

Agradecimientos

Deseo expresar mis agradecimientos en la realización de este trabajo:

- A los compañeros de la Dirección de Minas de la Empresa Ernesto Che Guevara y a los compañeros del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa por las atenciones recibidas en mis visitas a Moa.
- Al tutor de la Tesis, Dr C Waldo Lavaut Copa por su importante colaboración y a los compañeros de la Empresa Geominera de Oriente por las atenciones recibidas en mis visitas a la Empresa.
- A la Oficina Nacional de Recursos Minerales, por la atención recibida para consultar información del caso de estudio. Al Ing. José Arías del Toro por sus valiosos comentarios.
- Al Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de París, muy especialmente a la Dra. Margaret Armstrong, por ofrecerme la posibilidad de cursar estudios en el curso CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística” en Fontainebleau, Francia. Al supervisor del reporte curso Dr. Alain Galli. A todos los colegas del curso CFSG, especialmente a: Armando Hernández Vidriales (México), Eduardo Jara Salame (Chile), Benjamin Warr (Reino Unido), Huang Bin (China), y a todos los profesores y personal de apoyo en general, junto a ellos aprendí.
- A los compañeros de nuestro grupo de investigación en la Universidad de Pinar del Río: Dr C Arelys Quintero Silverio, MSc. Elmidio Estevéz Cruz y MSc. Robert Ramírez Hernández, que juntos hemos dedicado muchas horas a la búsqueda bibliográfica, estudio y discusión de los contenidos de la Geoestadística.
- Al Departamento de Geología de la Universidad de Pinar del Río por sentirme como uno más entre ellos. A Dr C Julio Cabrera Bermudez, Dr C José Fco. Lastra Rivero, Dr C Esther María Cruz Gámez, Dr C Dámaso Cáceres Govea y MSc. Elmidio Estévez Cruz por la revisión final de la tesis.
- A mis compañeros del Departamento de Informática y la Facultad por el tiempo que me han permitido para desarrollar la investigación.
- A la dirección de la Universidad de Pinar del Río por el apoyo recibido.
- A otros, a quienes en algún momento les hice alguna pregunta y me contestaron.

Síntesis

Los recursos niquelíferos en yacimientos lateríticos fundamentalmente en la región oriental representan un renglón importante de la economía nacional cubana. La producción de Níquel se ubica en el cuarto grupo de prioridades de la ciencia y la innovación tecnológica para el 2001-2003, establecidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y recogidas en la Proyección Estratégica del MES para ese mismo período. En este renglón económico han sido invertido en los últimos 5 años más de 400 MM de USD, proponiéndose actualmente como objetivos fundamentales: elevar la competencia internacional en calidad y costos, incrementar la recuperación del níquel y el cobalto contenido en el mineral a los niveles internacionales y reducción sensible de los costos energéticos.

Actualmente, la estimación de las reservas minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos se hace usando métodos tradicionales, específicamente el de áreas de influencia. Este método no permiten describir detalladamente las variables involucradas en el cálculo, no tienen en cuenta las características de variabilidad y correlación espacial, no permiten dar tratamiento adecuado a la alta variabilidad espacial presente en estos yacimientos y no permiten el uso de métodos modernos de integración de información que incorporen fuentes con distinto grado de conocimiento. La aplicación de métodos geoestadísticos es reciente, no existiendo una metodología precisa para su aplicación. Por otro lado, se ha podido comprobar la existencia de disparidad de criterios e inconsistencias metodológicas en las mismas aplicaciones geoestadística que se realizan actualmente para los yacimientos lateríticos. Estos elementos constituyen el problema científico de esta investigación.

Elaborar una metodología que permita la caracterización de recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos a partir de la aplicación de métodos de estimación y simulación geoestadística, tomando como caso de estudio el yacimiento Punta Gorda es el principal objetivo de este trabajo.

Durante la investigación se presentan y desarrollan las siguientes tesis científicas:

- 1.- La alta variabilidad espacial que presentan los parámetros geólogo – industriales en los yacimientos lateríticos, provocado por la baja correlación espacial e independencia de las

muestras a pequeñas distancias, conlleva a deficiencias al aplicar los métodos geoestadísticos tradicionales.

2.- Es posible establecer un modelo geoestadístico para la caracterización de las reservas mediante el uso de las facilidades que ofrece la simulación geoestadística para el establecimiento de redes racionales de exploración.

3.- Es posible caracterizar la masa volumétrica a partir del uso conjuntos de información de pozos criollos y de perforación, a través de método de integración de información de la geoestadística multivariada.

Los elementos anteriores tienen actualidad, novedad y valor científico y práctico, al ser la geoestadística una ciencia relativamente joven y en pleno desarrollo en aplicaciones a escala mundial. Se aportan nuevos elementos teóricos y prácticos por medio del uso de la simulación geoestadística. Las deducciones científica logradas contribuyen al desarrollo de la aplicación de la geoestadística en los yacimientos lateríticos, al demostrar su inaplicabilidad directa al existir alta variabilidad espacial en los parámetros geólogo – industriales, se proponen soluciones científico técnicas al mismo. Las soluciones obtenidas tienen amplia aplicación práctica durante la prospección geológica y la explotación minera de estos yacimientos, así como se presenta las bases teóricas y prácticas para la solución de otros problemas científico técnicos de actualidad como son: la clasificación de las reservas minerales, los estudio de redes, cálculos de reservas, modelo geomatemático de yacimientos, etc.

Indice	Pág.
Resumen	iv
Introducción	1
Capítulo I. Revisión bibliográfica	9
1.1. Introducción	9
1.2. Trabajos relacionados con la geología regional	9
1.3. Trabajos relacionados con el tema de variabilidad de los parámetros y la determinación de redes de exploración	12
1.4. Métodos de cálculo de reservas empleados en los yacimientos lateríticos cubanos	14
1.5. Trabajos relacionados con la aplicación de los métodos geoestadísticos en yacimientos lateríticos cubanos	16
1.6. Surgimiento, desarrollo y aplicación de los métodos geoestadísticos en la esfera internacional	19
1.7. Conclusiones del capítulo	21
Capítulo II. Caracterización geológica del área de estudio	22
2.1. Introducción	22
2.2. Breve historia de los yacimientos lateríticos en Cuba	22
2.3. Yacimientos en corteza de intemperismo lateríticos en Cuba	23
2.4. Generalidades sobre la geología de los procesos de intemperismo en la región del yacimiento Punta Gorda	25
2.5. Descripción geológica del área de estudio	28
2.6. Conclusiones del capítulo	30
Capítulo III. Aspectos metodología para la aplicación de la Geoestadística	34
3.1. Introducción	34
3.2. Elementos para la aplicación de la Geoestadística	34
3.3. Conocimiento del problema	35
3.3.1. Estudio geológico del problema	35
3.3.2. Información de exploración	37
3.3.3. Corrección numérica de la información en soporte automatizado	38
3.3.4. Regularización de la información	38
3.3.5. Análisis exploratorio de datos	39

3.4. El análisis estructural	40
3.4.1. Cálculo del semivariograma experimental	40
3.4.1.1. Cálculo de semivariogramas medio o globales	40
3.4.1.2. Mapa de variogramas	41
3.4.1.3. Nube de variogramas	41
3.4.1.4. Cálculo de semivariogramas direccionales	41
3.4.1.5. Análisis de anisotropías	41
3.4.1.6. Cálculo de semivariograma vertical	42
3.4.2. El ajuste de modelos teóricos	42
3.4.2.1. Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental obtenido	43
3.4.2.2. Validación del modelo ajustado	43
3.5. Estimación o Simulación	44
3.5.1. Estimación	44
3.5.1.1. Geoestadística Lineal	45
3.5.1.2. Geoestadística no Estacionaria	45
3.5.1.3. Geoestadística no Lineal	45
3.5.1.4. Geoestadística Multivariada	46
3.5.2. Simulación	46
3.5.2.1. Simulación Condicional	46
3.6. Tratamiento de los resultados geoestadísticos	47
3.6.1. Estimación de reservas	47
3.6.2. Mapas de isovalores	47
3.6.3. Categorización de reservas	48
3.6.4. Optimización de redes	48
3.7. Sistemas para el procesamiento geoestadístico	48
3.8. Conclusiones del capítulo	49

Capítulo IV. Aplicación de métodos geoestadísticos para la caracterización de parámetros geólogo - industriales de algunos bloques del yacimiento laterítico ferroniquelífero Punta Gorda	51
--	-----------

4.1. Introducción	51
4.2. Geología de la región y del yacimiento	52
4.3. Presentación de los datos	52
4.5. Regularización de la información	52
4.6. Análisis exploratorio de datos	52

4.7. Análisis estructural	55
4.7.1. Cálculo de los semivariogramas experimentales	55
4.7.2. Ajuste de modelos teóricos	57
4.8. Estimación	58
4.8.1. Modelo geométrico tridimensional de los bloques estudiados	59
4.9. Cálculo de las reservas	59
4.10. Comprobación de las estimaciones obtenidas	60
4.11. Caracterización del bloque O48	60
4.12. Posibilidades del uso de la varianza de krigeaje en yacimientos lateríticos	62
4.13. Estadística básica de la información del bloque O48	63
4.14. Cálculo y ajuste de modelos teóricos de semivariogramas	64
4.15. Estimaciones y obtención de los valores de varianza de krigeaje	65
4.16. Conclusiones del capítulo	68
 Capítulo V. Estudios de estimación y simulación para proponer redes racionales de exploración en la caracterización de las reservas en los yacimientos lateríticos	 70
5.1. Introducción	70
5.2. Simulación	70
5.3. Posibles valores reales más representativos	73
5.4. Cambio de soporte en la exploración	75
5.5. Obtención de la red racional de exploración	76
5.6. Secuencia metodológica para la caracterización de parámetros geólogo – industriales con la obtención de redes racionales de exploración	78
5.7. Conclusiones del capítulo	80
 Capítulo VI. Obtención de redes racionales en los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 del yacimiento Punta Gorda	 81
6.1. Introducción	81
6.2. Presentación de los datos.	81
6.3. Análisis exploratorio de datos.	81
6.4. Cálculo de los semivariogramas experimentales.	82
6.5. Ajuste de modelos teóricos.	83
6.6. Estimación y Simulación.	83
6.7. Obtención de redes racionales de exploración para los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55.	84

6.8. Conclusiones del capítulo.	86
Capítulo VII. Propuesta para la determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos	87
7.1. Introducción	87
7.2. Métodos tradicionales para la determinación de la masa volumétrica	87
7.3. Propuestas de determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos	88
7.4. Nuevo método para la determinación de la masa volumétrica	90
7.5. Ecuación de regresión	91
7.6. Estadística básica	92
7.7. Análisis de variabilidad de la masa volumétrica	93
7.8. Estimación de la masa volumétrica	93
7.9. Conclusiones del capítulo	94
Conclusiones	95
Recomendaciones	98
Referencias Bibliográficas	99

Indice de figuras y apéndices.	Pág.
Figuras Capítulo II	
2.1. Mapa de ubicación geográfica del yacimiento Punta Gorda	109
2.2. Mapa geológico de la región	110
2.3. Mapa litogenético esquemático de la región del yacimiento Punta Gorda	111
2.4. Mapa de bloques de explotación del yacimiento Punta Gorda	112
2.5. Mapa litológico de la corteza de intemperismo	113
2.6. Mapa de modelado del recurso mineral	114
2.7. Mapa de distribución de mineral	115
2.8. Mapa de superficie del piso de la corteza	116
2.9. Mapa de superficie del piso del escombros	117
Figuras Capítulo IV	
4.1. Mapa de pozos de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55	118
4.2. Histogramas zona de escombros superior, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	119
4.3. Histogramas zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	120
4.4. Semivariogramas medios, zona de escombros superior, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	121
4.5. Semivariogramas medios, zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	122
4.6. Semivariogramas verticales zona de escombros superior, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	123
4.7. Semivariogramas verticales zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	124
4.8. Semivariogramas direccionales de la zona de escombros superior, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	125
4.9. Semivariogramas direccionales de la zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro y c) Cobalto	126
4.10. Ajuste de los semivariogramas de la zona de escombros superior, semivariograma vertical, a) Níquel, c) Hierro y e) Cobalto, semivariograma medio, b) Níquel, d) Hierro y f) Cobalto	127
4.11. Ajuste de los semivariogramas de la zona mineralizada, semivariograma vertical, a) Níquel, c) Hierro y e) Cobalto, semivariograma medio, b) Níquel, d) Hierro y f) Cobalto	128
4.12. Modelo de capas de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, parte del perfil 5516.67 este - oeste	129
4.13. Modelo de bloques de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, parte del perfil 5516.67 este - oeste	130
4.14a. Ejemplo de perfiles estimados para el níquel	131

4.14b. Plano de estimaciones para el níquel de la zona mineralizada, de los bloques O53, O54 O55, P53, P54 y P55	132
4.15. Modelos geométrico tridimensional desarrollado para el bloque O48	133
4.16. Comparación de valores reales contra estimados para la red de 33.33m (figuras a y b) y 16.67m (figuras c y d), para el modelo de bloques (figuras a y c) y modelo de capas (figuras b y d)	134
4.17. Histogramas de las variables níquel y potencia de los compósitos por pozos de la zona mineral del bloque O48	135
4.18. Semivariograma del Ni, para diferentes redes de muestreo, bloque O48.	136
4.19. Semivariograma de la potencia para diferentes redes de muestreo, bloque O48.	137
4.20. Ajuste de los semivariograma del Ni, para diferentes redes de muestreo, bloque O48.	138
4.21. Ajuste de los semivariograma de la potencia, para diferentes redes de muestreo, bloque O48.	139
4.22. Gráfico del comportamiento de la varianza de krigeaje y de los criterios de error a través de un perfil (Y perfil norte - sur)	140

Figuras Capítulo V

5.1. Qqplot, valores reales contra simulados para las variables níquel y potencia	141
5.2. Semivariogramas de los datos simulados, a) níquel y b) potencia	142
5.3. Nomogramas del bloque O48, a) Níquel, b) Potencia, usando muestras puntuales y c) Níquel, d) Potencia, usando cambio de soporte	143

Figuras Capítulo VI

6.1. Mapa de pozos positivos en la zona mineralizada	144
6.2. Histogramas de los valores compositados de la zona mineralizada, a) Níquel, b) Hierro, c) Cobalto y d) Potencia	145
6.3. Semivariogramas medios de los valores compositados para la zona mineral	146
6.4. Mapa de variogramas de los valores compositados en la zona mineral	147
6.5. Semivariogramas direccionales de los valores compositados en la zona mineral	148
6.6. Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental, a) Níquel y b) Potencia mineral	149
6.7. Mapa de estimación y simulación del níquel, a) Estimación y b) Simulación	150
6.8. Mapa de estimación y simulación de la potencia mineral a) Estimación y b) Simulación	151
6.9. Nomogramas del bloque O53, O54, O55, P53, P54 y P55, a) Níquel, b) Potencia, usando muestras puntuales y c) Níquel, d) Potencia, usando cambio de soporte	152

Figuras Capítulo VII

7.1. Ubicación de los pozos criollos en el yacimiento Punta Gorda.	153
7.2. Histograma de los valores de masa volumétrica medidos en la zona mineralizada.	154
7.3. Recta de regresión entre la masa volumétrica y la variable secundaria.	155
7.4. Histograma de la variable secundaria.	156
7.5a. Semivariogramas direccionales de la masa volumétrica.	157
7.5b. Ajuste de los semivariogramas de la masa volumétrica, a) Semivariograma medio y b) Semivariograma vertical.	157
7.6. Perfil 5600 del bloque O48, estimaciones de la masa volumétrica.	158
7.7. Comportamiento de la masa volumétrica promedio y estimada para algunos perfiles.	159
 Apéndice I. Clasificador litológico y de menas vigentes para el modelado geológico de yacimientos lateríticos	 160
 Apéndice II. Conceptos fundamentales de Geoestadística	 165

Introducción

La revolución científico técnica en el campo geólogo - minero, que ha abarcado durante décadas a todo el mundo, se manifiesta en un aumento brusco del ritmo de extracción y utilización de la materia prima mineral. Por este motivo los trabajos de búsqueda, exploración y evaluación geólogo - económica de yacimientos minerales útiles, constituye una de las tareas más importantes en las Empresas y Compañías Geólogo - Mineras. En esta actividad juega un papel fundamental el cálculo de reservas minerales útiles “*in situ*”.

La estimación de reservas es una operación de alta responsabilidad que determina en gran medida el valor industrial de un yacimiento mineral. Este cálculo puede ser realizado por métodos clásicos o modernos: En los primeros se utilizan fundamentalmente valores medios o medias ponderadas para la estimación de bloques definidos convenientemente, por lo que su uso ha estado relacionado con problemas de precisión. Además, la utilización de los métodos clásicos no se recomienda porque aún cuando permiten cuantificar las reservas a escala global, no son adecuados para la caracterización local de las reservas. En los segundos predominan los métodos geoestadísticos, los cuales consisten en el uso de técnicas de regresión, teniendo como premisa fundamental la realización de las estimaciones a partir de las características de variabilidad y correlación espacial de los datos originales. La Geoestadística es resultado de la aplicación de la Teoría de Funciones Aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, fundamentalmente los relacionados con la actividad geólogo minera. Es precisamente en esta actividad donde surge, se desarrolla y consolida en los últimos 35 años como ciencia aplicada, dando respuesta a necesidades prácticas y concretas.

La Geoestadística ha sido ampliamente utilizada internacionalmente. Se ha extendido en la actualidad a otros campos de las Ciencias Naturales que presentan problemas de estimación. En Cuba el uso de estas técnicas de estimación ha estado limitado a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en las empresas geólogo - mineras y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra en general.

La cantidad de cálculos que implica el uso de estos métodos hace imprescindible la utilización de medios automatizados para su práctica y desarrollo. En la esfera internacional existen programas informáticos profesionales que aplican estas técnicas modernas a los problemas de estimación de fenómenos naturales en el campo de la Ciencias de la Tierra, donde se destacan los referidos al modelaje de yacimientos minerales. Entre éstos se pueden citar: DATAMINE,

GEMCOM, VULCAN, MICROMINE, GEOPACK, SURPAC, GEOSTAT, MICROLYNX, MINEMAP, etc., muy pocos introducidos en Cuba. Los sistemas antes mencionados implementan la aplicación de los métodos geoestadísticos de forma muy variada, ofreciendo posibilidades en algunos casos limitadas para los especialistas no entrenados en el tema, fundamentalmente en la determinación de los modelos que describen la continuidad espacial y en el uso del krigeaje como interpolador.

La actividad geólogo - minera cubana tiene en los recursos niquelíferos un renglón importante de la economía nacional, a partir de las menas lateríticas de la corteza de intemperismo, fundamentalmente en la región oriental. Estos recursos son conocidos desde hace más de 200 años, ubicándose la producción de níquel en el cuarto grupo de prioridades de la ciencia y la innovación tecnológica para el 2001-2003, establecidas por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente y recogidas en la Proyección Estratégica del Ministerio de Educación Superior para ese mismo período. En este renglón económico se han invertido en los últimos 5 años más de 400 MM de USD, proponiéndose actualmente como objetivos fundamentales: elevar la competencia internacional en calidad y costos, incrementar la recuperación del níquel y el cobalto contenido en el mineral a los niveles internacionales y reducción sensible de los costos energéticos. En la estimación de las reservas de níquel se han usado fundamentalmente métodos clásicos, siendo reciente la aplicación de los métodos geoestadísticos. De modo que cualquier investigación en este campo se justifica plenamente, ya que contribuye sin lugar a dudas al cumplimiento de los objetivos anteriores.

De lo expresado hasta aquí, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- El cálculo de reservas constituye una actividad de vital importancia en las empresas geólogo - mineras, que da respuesta a necesidades económicas.
- Todas las especialidades de las Ciencias de la Tierra realizan actividades que requieren de cálculos y generan problemas de estimación.
- La práctica actual en la actividad minera y en las geociencias de forma general exige de métodos modernos de estimación.
- En Cuba la práctica y desarrollo de la geoestadística ha estado limitada a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en la actualidad en la actividad minera y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra.
- Todo este proceso requiere de grandes cantidades de cálculos y almacenamiento de grandes volúmenes de información, por lo que es imprescindible el uso de herramientas

informáticas.

- Internacionalmente, los sistemas automatizados que utilizan técnicas modernas de estimación aplicadas al cálculo de reservas, y a los más diversos problemas de las geociencias, ofrecen posibilidades limitadas para especialistas no entrenados en el tema.
- Los contenidos de la Geoestadística no se incluyen ampliamente en los planes de estudio de las carreras de Ciencias de la Tierra.
- Los recursos niquelíferos de las menas lateríticas fundamentalmente de la región oriental de Cuba representan un renglón importante de la economía nacional.
- La estimación de las reservas de níquel en yacimientos lateríticos cubanos se ha realizado utilizado fundamentalmente métodos clásicos, siendo reciente la introducción de métodos modernos como los geoestadísticos.
- La alta variabilidad en los parámetros geólogo – industriales presentes en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, obstaculiza la aplicación de los métodos de la geoestadística lineal para la estimación de reservas a partir de la red de exploración actual.

Este trabajo de investigación parte de la necesidad de organizar y sistematizar los contenidos de la geoestadística, aplicados a la actividad geólogo - minera en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, así como proponer soluciones a la estimación de reservas debido a la alta variabilidad espacial de los parámetros geólogo - industriales en estos yacimientos. Como consecuencia de esto, lograr mayor precisión en la estimación y caracterización de sus reservas minerales. Esto es debido a que la geoestadística no ha sido empleada cotidianamente en la estimación de reservas minerales, ni todas sus potencialidades, fundamentalmente las relacionadas con: el análisis estructural, la estimación y la simulación. Se ha comprobado la disparidad de criterios e inconsistencias metodológicas en las aplicaciones que se realizan actualmente. Por lo que se considera que abordar la base conceptual de la geoestadística, desarrollando criterios para su empleo en estos tipos de yacimientos, contribuye a elevar el conocimiento que se posee de estos recursos.

Objeto

El objeto de esta investigación son los métodos geoestadísticos aplicados a la estimación y caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.

Problema Científico

Los métodos empleados para la estimación y caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos no permiten describir detalladamente los parámetros geólogo - industriales, no tienen en cuenta las características de variabilidad y correlación espacial, no tratan adecuadamente la alta variabilidad espacial presente en estos yacimientos y no utilizan procedimientos modernos para la integración de información que incorporen fuentes con distinto grado de conocimiento, por lo que no se adaptan a las complejidades de estos yacimientos. Por consiguiente los resultados del cálculo de recursos minerales resultan inexactos y poco detallados, lo cual repercute desfavorablemente en la explotación racional de éstos.

Hipótesis General

La elaboración y aplicación de una metodología que regule el uso de los métodos geoestadísticos en la estimación y caracterización de las reservas minerales, en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, haciendo uso de la estimación, la simulación y la integración de información, permitirá la realización de la actividad geólogo minera en estos yacimientos con una mayor precisión, aumentará el conocimiento que actualmente se posee de estos recursos, contribuirá a dirigir este proceso en la industria del níquel de forma más eficiente e incidirá positivamente en la planificación minera. Esto garantiza indudablemente una explotación de este recurso en Cuba de forma más racional y el cumplimiento de los objetivos que se proponen en este renglón económico.

Hipótesis Específicas

- ◆ La determinación de los modelos que describen adecuadamente las características de variabilidad y correlación espacial de los contenidos de Fe, Ni y Co, garantizará una caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos con mayor precisión.
- ◆ El uso de la simulación geoestadística, permitirá proponer soluciones a los problemas relacionados con la estimación de reservas, fundamentalmente con la alta variabilidad espacial de los parámetros geólogo - industriales, al permitir proponer posibles valores reales y cambio de soporte en la exploración.
- ◆ La búsqueda de los bloques de estimación obtenidos dentro del límite de error permitido por la tecnología de la empresa niquelífera cubana, que tengan en cuenta: la unidad de selección minera, los modelos de continuidad espacial y las potencialidades que ofrece la

simulación de variables regionalizadas, permitirá proponer la red racional para la determinación lo más adecuada posible de las reservas locales en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.

- ♦ La integración de la información geológica mediante el uso de la geoestadística multivariada permitirá una caracterización de la masa volumétrica y el recálculo de las reservas de forma más precisa.

Objetivo General

Elaborar una metodología que permita la caracterización de los recursos minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos a partir de la aplicación de métodos de estimación y simulación geoestadística, tomando como caso de estudio el yacimiento Punta Gorda del noreste de Holguín.

Objetivos Específicos

- ♦ Obtener los modelos que describen las características de variabilidad y correlación espacial de los parámetros geólogo - industriales empleados en el cálculo de reservas, que garantice la estimación y la caracterización de estos recursos con mayor precisión tanto a escala global como local.
- ♦ Buscar la red racional de exploración que garantice valores de error de estimación aceptables, en función de la unidad de selección minera a utilizar en la explotación y de las características propias de variabilidad y correlación espacial, a través del uso conjunto de técnicas de estimación y simulación geoestadística.
- ♦ Integrar diferentes fuentes de información en el proceso de estimación, utilizando los contenidos de Fe, Ni y Co de pozos de perforación, las mediciones de masa volumétrica en pozos criollos y de las características de autocorrelación y correlación espacial entre éstos, para lograr un recálculo de las reservas de forma más objetiva.
- ♦ Elaborar una metodología a partir de los resultados prácticos, para la aplicación adecuada de los métodos geoestadísticos en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, que garantice de la mejor forma posible la caracterización de los recursos minerales, incidiendo en la estimación de reservas.

Tareas

Para el cumplimiento de los objetivos fue necesario realizar las siguientes actividades:

1. Revisión bibliográfica de información relacionada con la aplicación de la geoestadística,

particularizando en la actividad geólogo minera, fundamentalmente en la industria del níquel. Estableciendo el marco teórico y práctico de la geoestadística.

2. Participación en eventos nacionales e internacionales con el objetivo de conocer el estado del arte de las aplicaciones geoestadísticas en la industria del níquel y en la minería de forma general en nuestro país e internacionalmente.
3. Recopilación de la información geológica, elaboración, organización y verificación de la base de datos de los parámetros geólogos industriales del yacimiento Punta Gorda, a partir de la información en formato digital obtenida en la Empresa Che Guevara.
4. Recopilar sistemas automatizados que permitan la aplicación de los métodos geoestadísticos y diseñar e implementar algoritmos para los cálculos fundamentales de la geoestadística relacionados con el análisis estructural, que permitan consecuentemente desarrollar aplicaciones informáticas futuras.
5. Definir los elementos fundamentales para la elaboración de una metodología para la aplicación de la geoestadística a la estimación y caracterización de reservas minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos, y que sea extensible a otros campos de las geociencias de forma general.
6. Procesar la información del yacimiento, a través del empleo de la metodología elaborada.
7. Visualizar los resultados obtenidos en el procesamiento.

Los métodos de investigación utilizados para el cumplimiento de las tareas son: la revisión bibliográfica, el análisis de los documentos aprobados por la Oficina Nacional de Recursos Minerales, la modelación numérica y la simulación geoestadística. Los métodos geoestadísticos empleados incluyen: el análisis exploratorio de datos, análisis estructural, estimación por Krigeaje Ordinario de bloque, métodos de integración de información como el Krigeaje con Deriva Externa y Co-Krigeaje con Variable Colocalizada y Simulación Condicional. Se utilizaron en el procesamiento los programas informáticos: *Statistics for Windows* (versión 5.0), *Golden Software Surfer 7*, *Gslib90* (versión 2.905), *MicroLYNX98*, *Microsoft Office 97*, *VarioWin* (versión 2.2) y algoritmos implementados por el autor para la organización de la información y el desarrollo del análisis estructural.

La necesidad actual de la investigación está dada en obtener un mejor conocimiento de los recursos niquelíferos en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, que contribuya a la explotación adecuada de este renglón de la economía nacional.

Esta investigación contribuye al programa estratégico de la expansión de la producción de níquel. Involucra a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, especialistas de la Empresa Geominera de Oriente y a la Universidad de Pinar del Río.

La novedad del tema es la definición e introducción de una metodología óptima para la aplicación de los métodos geoestadísticos en la estimación y caracterización de los recursos en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos, a partir de la alta variabilidad espacial presente en los contenidos tratados en éstos, teniendo como aporte fundamental la organización y aplicación de los elementos fundamentales que proporciona la estimación y simulación geoestadística para la caracterización de estos recursos.

En resumen, con el desarrollo de este trabajo se lograron los siguientes resultados:

- Obtención de los modelos que describen la variabilidad espacial de los parámetros geólogo - mineros en algunos bloques del yacimiento Punta Gorda.
- Se demostró que la calidad de las estimaciones que se realizan no es satisfactoria debido a la alta variabilidad espacial presente en los parámetros estudiados.
- Propuesta y comprobación de la efectividad que representa la aplicación de métodos de simulación geoestadística para la caracterización de los recursos en estos yacimientos, principalmente los relacionados con el cambio de soporte en la exploración.
- Se demuestra que el uso de la varianza de krigeaje no proporciona resultados confiables en la certidumbre de las estimaciones en el yacimiento laterítico tratado, ni en la definición de redes racionales de exploración.
- Se obtuvo por medio de procedimientos conjuntos de estimación y simulación una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración.
- Elaboración de una nueva forma de determinación de la masa volumétrica sobre la base de la aplicación de métodos de integración de información con diferente grado de conocimiento.
- Elaboración de una metodología para la estimación y la caracterización de los recursos en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos.

El trabajo abarca un total de 98 páginas y consta de: resumen, introducción, 7 capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y 50 anexos gráficos y dos apéndices.

En el Capítulo I se hace una referencia a los trabajos fundamentales de geología realizados en la zona de estudio y de la aplicación de métodos geoestadísticos en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos.

El Capítulo II contiene una breve caracterización geológica actualizada del área de estudio.

En el Capítulo III se describe la metodología propuesta por el autor para la aplicación de la geoestadística a la estimación y caracterización de reservas minerales, extensible a los problemas de estimación de las especialidades de las Ciencias de la Tierra de forma general, detallando todos los elementos a tener en cuenta en el procesamiento geoestadístico.

En el Capítulo IV se aplica la metodología propuesta a algunos bloques del yacimiento Punta Gorda sobre un modelo geométrico tridimensional, se obtienen los modelos que describen las características de variabilidad y correlación espacial de los parámetros, se realizan las estimaciones por el procedimiento krigeaje de bloque y se caracteriza la varianza de krigeaje tomando decisiones acerca de su empleo en la definición de redes racionales de exploración.

En el Capítulo V se describe la secuencia metodológica obtenida para la definición de redes racionales de exploración, sobre la base del empleo conjunto de la estimación y la simulación geoestadística.

En el Capítulo VI se aplica la secuencia metodológica para la obtención de redes racionales de exploración en los bloques O53, O54, O55, P53, P54, P55.

En el Capítulo VII se aplican métodos de integración de información de la geoestadística multivariada para la caracterización de la masa volumétrica en el bloque experimental O48.

Se presenta además como apéndices un clasificador litológico y de menas vigentes para el modelado geológico de yacimientos lateríticos y otro con los conceptos fundamentales de la Geoestadística.

Capítulo I. Revisión bibliográfica

1.1. Introducción

Se presenta en este capítulo un breve resumen de los trabajos más importantes realizados en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos de la región oriental, relacionados con: los elementos fundamentales de la geología regional y de la formación de estos yacimientos; el tema de variabilidad de los parámetros y la determinación de redes de exploración; los métodos de cálculo de reservas empleados en la estimación y caracterización de los recursos minerales níquel y cobalto, y el estado actual de la aplicación de métodos geoestadísticos en estos yacimientos. Se aborda además, una síntesis del surgimiento, desarrollo y aplicación de los métodos geoestadísticos en la esfera internacional.

1.2. Trabajos relacionados con la geología regional

Durante la ejecución de la investigación se consultaron trabajos desarrollados en la región oriental, particularmente en el territorio Moa-Baracoa, dirigidos a la evaluación geólogo - económica de las reservas minerales en las menas lateríticas del cinturón ofiolítico de la región. A partir de las palabras del Ministro de la Industria Básica en el Tercer Congreso de Geología y Minería, donde plantea: que el 100% del territorio nacional cuenta con mapas geológicos a diferentes escalas; que la totalidad del territorio nacional está cubierto por levantamientos aeromagnéticos y gravimétricos; que se han ejecutado 75 000 km de líneas sísmicas en zonas de tierra y mar; entre otros aspectos, podemos asegurar que el conocimiento geológico de Cuba por parte de sus profesionales y su registro en documentación es amplio y profundo.

En el caso particular de las rocas ultrabásicas en Cuba, éstas forman parte de un cinturón ofiolítico, que bordea la isla a lo largo de su costa norte por aproximadamente 900 km. Este cinturón es uno de los más largos en todo el mundo y tiene asociado grandes yacimientos de corteza de intemperismo de menas lateríticas ferruginosas niquelíferas cobaltíferas. Estos yacimientos representan el campo de aplicación de la metodología presentada en esta investigación, la cual está relacionada con el uso de los métodos geoestadísticos para la estimación y caracterización de los recursos. Se comienza el análisis bibliográfico con una breve referencia a los trabajos que han tratado las características geológicas de la región.

La distribución de rocas ultrabásicas no es homogénea en todo el cinturón, sus relaciones con las rocas de cobertura platafórmica a veces son muy complejas (Ariosa, 1988). Las cortezas de intemperismo laterítico tampoco se desarrollan de manera uniforme. Se reconocen en el territorio nacional cuatro zonas donde las mismas poseen mayor desarrollo, las cuales son:

- Meseta de Cajálbana en la provincia de Pinar del Río.
- Meseta de San Felipe en la provincia de Camagüey.
- Región de Nicaro en la provincia de Holguín.
- Región Sagua – Baracoa, que abarca la mayor parte de la provincia de Holguín y parcialmente Guantánamo.

Estas últimas son las más importantes tanto por el volumen de las reservas como por la calidad de las menas con elevados contenidos industriales de Ni y Co, representando la columna vertebral del desarrollo minero metalúrgico de Cuba. Sobre la región se han realizado estudios geológicos detallados.

El conocimiento que actualmente se tiene de la zona se debe a un conjunto de investigaciones que desde antes del triunfo de la Revolución fueron desarrolladas y en su momento representaron determinado valor científico; pero no es hasta después del 1959 que se desarrollaron trabajos profundos de carácter regional. En este sentido se describe en las tesis doctorales de Rodríguez (1998), Legrá (1999) y Vera (2001) un amplio resumen sobre las investigaciones más importantes desarrolladas en esta etapa. De estos trabajos es digno mencionar los nombres de: Adamovich y Chejovich (1962), Knipper y Cabrera (1974), Cobiella, Rodríguez y Campos (1984), Lavaut (1987), Quintas (1989), Iturralde (1996) entre otros, los cuales representaron importantes aportes al conocimiento de la geología regional, incluyendo las zonas de desarrollo de cortezas de intemperismo ferroniquelíferas.

Según Vera (1979), las condiciones que han dado lugar a la formación de estos vastos y potentes yacimientos, en el caso particular de nuestro país, han sido las siguientes:

- a) La existencia de un macizo ultrabásico de composición predominantemente harzburgítica (roca compuesta principalmente por "olivino" $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ y "enstatita" $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$), b) la gran densidad de redes de grietas y fracturas de diversos orígenes existentes en la roca, c) las características climáticas propias que incluyen períodos de lluvia y de seca en forma alterna, d) una morfología favorable para la formación y conservación de la laterita y e) un drenaje adecuado que ha facilitado su desarrollo.

Las menas lateríticas de la corteza de intemperismo de Cuba, fundamentalmente en su parte oriental, son conocidas desde hace más de 200 años (Ariosa, 1977). Su existencia quedó registrada en el libro de bitácora de Cristóbal Colón a su paso por las provincias orientales (Vera, 1979). Durante el desarrollo de la guerra anglo - española, el perdigón fue objeto de atención para la obtención del hierro, incluso en la fabricación de pinturas. En esta época compañías norteamericanas mostraron interés por nuestra corteza de intemperismo, realizando trabajos de exploración de las lateritas. Se estudiaron sólo como menas de hierro, produciéndose los denominados aceros especiales de Mayarí, no dándole atención especial al níquel y al cobalto contenido en las lateritas.

Sin pretender abarcar profundamente los trabajos desarrollados sobre la geología oriental, que son ampliamente descritos en Rodríguez (1998) y Vera (2001) se hace a continuación una breve síntesis de los resultados más importantes en el conocimiento de la geología oriental.

Se elaboraron varios mapas geológicos a diferentes escalas, se estableció la secuencia estratigráfica regional, se realizaron reconstrucciones paleogeográficas, caracterizando el relieve pre Maestrichtiano y el actual. Posteriormente se reveló una estructura más compleja, aportándose elementos sobre fuertes movimientos tectónicos tangenciales que provocaban la aparición de secuencias alóctonas y autóctonas intercaladas en el corte geológico, además del emplazamiento de cuerpos serpentiniticos en forma de mantos tectónicos alóctonos sobre las secuencias del Cretácico Superior. Fue establecido un carácter esencialmente sinorogénico al origen y posición geólogo-estructural de los conglomerados y brechas de composición serpentinitica que Adamovich y Chejovich asignaron al período Maestrichtiano, relacionado con los movimientos tectónicos de emplazamiento de los cuerpos serpentiniticos. Se originó de este modo un salto cualitativo en el grado de conocimiento geológico. Como se señala en Quintas (1989) "se fue abriendo paso la concepción movilista como base para la interpretación geológica.....".

Se planteó que los cuerpos de serpentinitas representan fragmentos de corteza oceánica que se deslizaron por planos de fallas profundas hasta la superficie, donde se emplazaron sobre formaciones sedimentarias del Cretácico en forma de mantos tectónicos, abriendo una nueva dirección al indicar la presencia de mantos tectónicos constituidos por rocas ultrabásicas. Se establecen varios elementos, entre los que se puede señalar que la tectónica de sobrempuje

afecta también a las secuencias sedimentarias dislocadas fuertemente, detectando la presencia de mantos alóctonos constituidos por rocas terrígenas y volcánicas del Cretácico Superior. Estos mantos yacen sobre secuencias terrígenas del Maestrichtiano - Paleoceno Superior, demostrándose el carácter predominantemente autóctono de las secuencias formadas en las cuencas superpuestas al arco volcánico del Cretácico.

Se resume la interpretación estratigráfica y paleogeográfica de Cuba oriental delimitando cinco zonas estructuro faciales, subdividiendo las anteriores estructuras propuestas en seis zonas. A partir de trabajos fotogeológicos sobre diferentes áreas del territorio se caracteriza la corteza de intemperismo, realizándose una clasificación de las fracturas que afectan al substrato serpentinitico. Se realiza un estudio detallado de las distintas formaciones geológicas del área de estudio y su caracterización geomorfológica.

Se aportan nuevos elementos desde el punto de vista tectónico sobre la porción oriental de las provincias Holguín y Guantánamo, donde se proponen siete unidades tectono - estratigráficas para el territorio, describiendo las características estructurales de cada una de ellas y estableciéndose los períodos de evolución tectónica de la región. Estudios estratigráficos del extremo oriental de Cuba proponen las asociaciones estructuro - formacionales que constituyen ese extenso territorio, así como las formaciones que las integran. Se realiza la reconstrucción paleogeográfica del Cretácico al Paleógeno, intervalo cronológico de mayor complejidad para la geología de la región oriental. Se resumen las concepciones presentadas por Quintas (1989) e Iturralde (1996), relacionadas con las litologías presentes en la región, las que se detallan en Rodríguez (1998).

1.3. Trabajos relacionados con el tema de variabilidad de los parámetros y la determinación de redes de exploración

Con el objetivo de conocer detalladamente el comportamiento espacial de los parámetros geólogo - industriales de estos yacimientos, debido al incremento de las pérdidas y empobrecimiento en el proceso de extracción, se comienzan a realizar algunos trabajos por parte de las empresas mineras, así como por el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Estos trabajos han estado centrados en la aplicación de métodos analíticos, de ramificación o enrarecimiento, de comparación de resultados de la exploración con los de la explotación y el

estadístico usando el coeficiente de variación y el método de Pearson, para el cálculo de redes óptimas. Deben ser mencionados un grupo de autores entre los que se destacan: Secik (1971), Duda (1971), Pérez (1972), Ruz (1976), Rodríguez (1977), López (1981), Reyes (1982), Leyva y Soler (1984), Riz (1984), Arias del Toro (1984), Bravo (1984), Velázquez (1985), Tamayo (1985), López (1986), Ariosa (1988), Alvarez (1990), García y Pérez (1991) en Vera (2001).

En dichas investigaciones se obtiene como resultado, en algunos casos, que la potencia mineral es el parámetro más variable y en otros se concluye que los métodos estadísticos empleados no se justifican, ni técnica, ni práctica, ni económicamente para obtener la densificación de la red en el escombros en estos yacimientos. Debido a que su aplicación mecánica puede llevar a cometer grandes errores en la determinación del parámetro deseado. En ocasiones se trabajan casos prácticos como el yacimiento Camarioca Este, planteándose específicamente que la red de 33.33x33.33 m asegura la confiabilidad deseada. En otros casos se utilizan bloques del yacimiento Punta Gorda destacando que el horizonte de Serpentinita de Balance (SB) se presenta más variable que el de Laterita de Balance (LB); que el contacto superior de la LB se presenta menos irregular que el inferior y que la parte central del yacimiento es menos variable. Muchos trabajos no presentan una propuesta de densidad de red. Otros planteamientos están relacionados con que la variabilidad de los contenidos de Ni y la potencia de los campos minerales se manifiesta en forma sinuosa, utilizando como caso de estudio el yacimiento Punta Gorda y proponiendo que esta forma puede utilizarse como criterio para elegir la densidad de redes de exploración. Se destaca el hecho de que al densificar la red se observa un aumento de la variación en los niveles del techo y fondo teóricos del mineral útil, aunque aumentan las reservas de LB y disminuyen las de SB, siendo el saldo total una disminución de las reservas.

En este sentido recientemente se realizó una investigación relacionada con procedimientos para la determinación de redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa (Vera, 2001), en la cual se utilizan las bondades de los métodos geoestadísticos para la definición de redes racionales de exploración. Aún cuando se obtienen resultados importantes, a este trabajo se le puede añadir la idea de buscar cuál es la red de exploración para la cual los valores de la varianza de krigeaje satisfacen criterios prácticos. Criterios que deben estar en función de las características de continuidad espacial reveladas de los datos, del tamaño de los bloques de estimación y de la experiencia práctica en

cada yacimiento (Chica, 2002). Constituyendo ésta la idea fundamental, que en opinión del autor, puede aportar los métodos geoestadísticos para la definición de redes de exploración en yacimientos vecinos con iguales características geológicas y que no han sido explorados aún, o en los que la exploración realizada es orientativa. Además, se asume para el error porcentual que incluye a la varianza de krigeaje un valor del 10%, valor de error permisible por la empresa, los cuales en nuestra opinión no guardan relación, debido al carácter puramente geométrico de este término ante yacimientos con alta variabilidad espacial en el comportamiento de sus parámetros geólogo - industriales.

1.4. Métodos de cálculo de reservas empleados en los yacimientos lateríticos cubanos

El método de cálculo de reservas empleado tradicionalmente en los yacimientos de níquel de Cuba es el de áreas cercanas o áreas de influencia, como se puede apreciar en los trabajos de Aleogin et al. (1977), también conocido como Polígonos de Influencia. Este método fue creado por Boldiriev en 1914 y consiste en que a cada muestra se le puede asignar un polígono que establece su área de influencia, para el cual cualquier punto dentro del mismo está más cerca de la muestra central que de cualquier otra muestra. Estos polígonos se obtienen construyendo mediatrices a los segmentos que unen cada par de muestras contiguas. En el caso particular de los yacimientos lateríticos los pozos de perforación están dispuestos en una red regular, por lo que los polígonos que se forman son cuadrados, a los que se les asigna el valor medio ponderado del pozo central. Esto en opinión del autor no es adecuado, por no ser representativo un valor puntual del contenido medio del bloque, debido a la alta variabilidad espacial de los contenidos tratados. Los resultados de los cálculos se emplean no sólo para la evaluación de las reservas, sino también para la planificación de los trabajos de extracción. La introducción en la práctica de otros métodos como el de Bloques Geológicos no fue percibido por los geólogos mineros ni por organizaciones sociales geológicas Aleogin et al. (1977).

El método de cálculo descrito, ha sido empleado en la estimación de las reservas de los yacimientos lateríticos cubanos hasta la actualidad, al mismo se le pueden señalar las siguientes deficiencias:

- a) Para lograr una estimación de reservas lo más precisa posible, la utilización excesiva del método conlleva a encarecer los costos de los trabajos de exploración, porque es necesario realizar al menos un pozo de perforación por cada bloque de estimación según el tamaño que se desee.

- b) No se aprovecha la información que pueden aportar los pozos vecinos, que indudablemente existe y se ha demostrado por métodos geoestadísticos, a través de las características de variabilidad y correlación espacial entre los datos.
- c) Los cambios que se producen en las leyes son bruscos en los bloques vecinos, lo que se acentúa aún más cuando los contenidos medidos son muy variables.
- d) Se considera que asignar el valor de los contenidos del pozo como valor medio a su correspondiente polígono de influencia es vago, porque ante parámetros con tan alta variabilidad presente en estos yacimientos es imposible que pueda existir representatividad.

De lo anterior se infiere que la utilización de métodos clásicos de cálculo de reservas en la explotación actual de las menas níquelíferas cubanas no es recomendada para la caracterización local de las reservas, debido al conocimiento actual que se posee de métodos modernos de estimación de reservas, a la existencia de potentes equipos informáticos que disminuyen considerablemente el tiempo de procesamiento y a la presencia en el mercado de sistemas informáticos para los trabajos geólogo - mineros. Alternativamente se recomienda el uso de la geoestadística, el cual ha sido el método más usado en la esfera internacional en las tres últimas décadas para la estimación de reservas minerales, probando su superioridad en diferentes tipos de minas (Armstrong y Carignan, 1997). En este sentido es importante señalar que aunque existen detractores de su uso como se plantea en (Lepin y Ariosa, 1986), relacionado con que la utilización del krigeaje no ofrece ningún aumento en la precisión de la evaluación de los contenidos medios en el bloque en comparación con los métodos clásicos tradicionales, sólo es posible hacer la siguiente reflexión: si somos capaces de determinar el comportamiento espacial de un atributo, podemos predecirlo en todo el dominio en que se manifiesta y el único método que hasta el momento ofrece herramientas para la determinación de ese comportamiento espacial es el geoestadístico.

Existe otro conjunto amplio de métodos clásicos de cálculo de reservas al que se hace referencia en Lepin y Ariosa (1986) y Díaz (2001), los cuales tienen como objetivo fundamental obtener un volumen equivalente al de las complejas formas que presentan los cuerpos minerales y a la estimación de los parámetros geólogo – industriales. Estos métodos usan valores medios o medias ponderadas, de modo que todos adolecen de realizar las estimaciones en función de las características de continuidad espacial de los datos disponibles, un análisis más profundo no es objetivo en esta investigación.

1.5. Trabajos relacionados con la aplicación de los métodos geoestadísticos en yacimientos lateríticos cubanos

A continuación se relacionan las investigaciones que han incluido la aplicación de los métodos geoestadísticos en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos de la región oriental, para la solución de problemas relacionados con el estudio de los parámetros geólogo - industriales en las menas de níquel y cobalto.

En 1993 comienzan a introducirse en estas investigaciones en Cuba los conceptos sobre geoestadística y el uso de los semivariogramas como herramientas para la caracterización de la variabilidad de los parámetros geológicos en los yacimientos. El trabajo de Gutiérrez y Beyra, (1993) “Introducción al Análisis Variográfico de Yacimientos de Corteza de Intemperismo” marcó pautas y despertó el interés en cuanto al uso de estas nuevas técnicas, desarrolladas por G. Matheron en la Escuela Superior de Minas de París, Francia, estudios que fueron continuados y difundidos por M. David, A.G. Journel entre otros. En este trabajo también se demuestra que el parámetro más variable es la potencia de la capa mineral.

Proenza y Fernández (1994) desarrollan trabajos con el objetivo de iniciar el estudio variográfico en los yacimientos ferroniquelíferos de Cuba oriental. El propósito fundamental de éstos fue la utilización de técnicas geoestadísticas para la solución de diversos problemas como el de no-confirmación de las reservas. Utilizan como objeto de estudio el bloque R-51 con 81 pozos del yacimiento Punta Gorda. Este trabajo aunque es un intento importante de aplicación del análisis variográfico como herramienta fundamental de los métodos geoestadísticos, no presenta gráficos ni expresiones analíticas que caractericen la continuidad espacial, como se señala en Armstrong y Carignan, (1997) y Cuador y Quintero, (1999) y se aplica en otros campos (Quintero y Cuador, 2000; Hernández et al., 1999; Estévez y Cuador 2002; Quintero, 2001).

Legrá (1994) hace una valoración de los métodos clásicos para el cálculo de volúmenes geólogo - mineros, ubicando en un tercer grupo a los métodos geoestadísticos. Plantea que el empleo de estos últimos métodos implica cálculos laboriosos, precisa de gran experiencia previa y del uso de computadoras. En opinión del autor dichos criterios son debido a que en ese entonces aún no se habían introducido en el país sistemas informáticos para el

procesamiento geoestadístico y los equipos de cómputo no eran lo suficientemente potentes como los de la actualidad (Cuador, 1997).

Ilidio (1999) realiza un “Análisis Variográfico del Yacimiento Camarioca Norte”, donde aplica las técnicas de coeficiente de variación y elaboración de semivariogramas direccionales, comprobando que la potencia resultó ser también el parámetro más variable, que los atributos del yacimiento se comportan de manera isotrópica y según el grado de variabilidad, el yacimiento se clasifica de regular a muy irregular. Finalmente propone un espaciamiento entre pozos no mayor de 12 m para un error admisible del 20 por ciento.

Legrá et al. (1999a), presentan elementos de la relación entre el krigeaje y la interpolación lineal, para la modelación de superficies topográficas. Legrá y Guardiola (1999) exponen elementos del análisis variográfico y la estimación por krigeaje y concluyen que estos elementos son una poderosa herramienta que permiten resolver problemas comunes del profesional geólogo - minero, que aunque esta técnica se han popularizado, gracias a sus éxitos prácticos, no se puede confiar en recetas y algoritmos más o menos ingeniosos, sino que se debe conocer a fondo todo lo relacionado con ellas. En tal sentido coinciden con Journel y Huijbregts (1978) y Armstrong y Carignan (1997) en que es necesario un entrenamiento previo para la explotación de los sistemas que incluyen cálculos geoestadísticos, pero se discrepa por parte del autor en el planteamiento de que son algoritmos más o menos ingeniosos, pues éstos han sido teórica y prácticamente demostrados en la esfera internacional.

Legrá et al. (1999b) proponen un método para la determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos, planteando que cualquier inexactitud existente en la determinación de este parámetro se refleja también como inexactitud en los valores de reservas de metal calculados. Hace referencia a que en los yacimientos lateríticos cubanos se obtiene una masa volumétrica promedio para cada uno de los horizontes tecnológicos de mineral, indicando que sin embargo el abuso de valores medios en aras de simplificar los cálculos, ha conducido a la aceptación de métodos simplistas y burdos. Llegando a conclusiones de que el uso del método de krigeaje para la estimación de la masa volumétrica sólo debe ser utilizado en última instancia, proponiendo el método de triangulación para la solución a este problema.

Es posible usar métodos modernos de integración de información, incluidos en variantes que aporta la Geoestadística Multivariada (Wackernagel, 1995 y 1998) como son: los métodos de Krigeaje con Deriva Externa y/o Co-Krigeaje con Variable Colocalizada. En estas variantes se deben considerar los valores medidos de Fe, Ni y Co como variables secundarias y buscar la existencia de alguna correlación entre éstas y los valores medidos de masa volumétrica, considerada como variable primaria o de interés. Así se puede concluir que dependiendo de la existencia de la relación entre las variables y de la variabilidad espacial de éstas, es posible usar las variables secundarias en la estimación de la variable de interés.

Un trabajo importante que incluye la Geoestadística Lineal, aplicada al estudio y explotación de los yacimientos lateríticos, significó el trabajo presentado como tesis doctoral por Legrá, (1999). En este trabajo se presentan modelaciones novedosas tridimensionales de los parámetros geoquímicos incluidos en el programa “Tierra”. El programa fue elaborado para el procesamiento de la información en yacimientos de este tipo genético y se utiliza actualmente como herramienta básica para el pronóstico, la planificación y control de la minería en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. El trabajo antes mencionado resulta muy general al incluir tres elementos importantes “Pronóstico, Planificación y Control”, utilizando los métodos de la Geoestadística Lineal como una herramientas más, por lo que consideramos que un trabajo más centrado en la aplicación de las bondades de dichos métodos, puede dar mayores elementos en la aplicabilidad de éstos en los yacimientos lateríticos.

Jordan (2000), utiliza técnicas geoestadísticas para realizar el “Estudio Variográfico del Grupo VII del Yacimiento Martí”, donde demuestra la alta variabilidad de la potencia mineral, clasificando al yacimiento como muy irregular, obtiene además valores de espaciamiento no mayores de 10 m para un error admisible del 20 %.

Lavaut (2000) ejecuta en el yacimiento Yagrumaje Norte un “Estudio Preliminar de las Redes de Perforación y Muestreo para el Cálculo del Mineral Laterítico”. El trabajo, considerado como uno de los que con más rigor ha tratado el problema de la racionalización de redes de exploración, caracteriza al yacimiento sobre la base del comportamiento de cada uno de sus principales parámetros. En el mismo se aplica el método de variantes para evaluar la

eficiencia de las redes de 100x100 m y 33.33x33.33 m. Se calcula además la densidad óptima de la red usando expresiones matemáticas que consideran las áreas a explorar y el grado de variabilidad. Concluye dicho autor en la necesidad de argumentar las redes según las condiciones geólogo – geomorfológicas y genéticas, considerando así no usar redes con carácter regional como se ha venido haciendo y propone disponer de perforaciones según una red más densa que la de 33.33x33.33 m para precisar las redes óptimas en la exploración geológica y para la explotación. Finalmente estima, de forma preliminar, que para la exploración detallada (categoría probable) es suficiente la red de 33.33x33.33 m mientras que para la categoría probada es suficiente una cuadrícula de 23.57 m.

Recientemente, Vera (2001), desarrolló su tesis doctoral (ya mencionada) titulada “Procedimientos para la determinación de redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa”, donde realiza un importante aporte al establecimiento de dominios geológicos sobre el yacimiento Punta Gorda a través de técnicas de la estadística multivariada. Emplea las bondades de los métodos geoestadísticos para la determinación de redes racionales de exploración utilizando krigeaje puntual y de bloques, predominando la idea de localizar las zonas donde los valores de varianza de krigeaje son elevados para proponer un nuevo sondeo. Estos elementos, en opinión del autor, no explotan suficientemente la posibilidad de definir o establecer una red adecuada en función de la variabilidad espacial y la dimensión de los bloques de estimación para las características propias de cada yacimiento o zonas de un mismo yacimiento, debido al carácter puramente geométrico de este término. En este sentido se introducen en la presente investigación procedimientos conjuntos de estimación y simulación geoestadística.

1.6. Surgimiento, desarrollo y aplicación de los métodos geoestadísticos en la esfera internacional

La ciencia aplicada que hoy se conoce como **Geoestadística**, tuvo su origen en los trabajos de H. Sichel sobre la aplicación de la distribución *log-normal* en estudios de minas de oro. Estos trabajos fueron seguidos por la famosa contribución de D.G. Krige en el uso del análisis de regresión en muestras y bloques mineros (Matheron y Kleingeld, 1987). Siendo ellos los primeros en introducir la estadística a la estimación de reservas minerales. También se destaca la introducción de B. Matern de la teoría de funciones aleatorias para el análisis de la variación espacial de un campo forestal. La Geoestadística se consolidó finalmente con los

trabajos de G. Matheron que se recogen en su tesis doctoral (Matheron y Kleingeld, 1987) sentando las bases de lo que hoy se conoce como la **Teoría de la Variable Regionalizada**.

De acuerdo con las características más importantes que aparecen en su evolución, la Geoestadística se ha dividido en varias generaciones (Matheron y Kleingeld, 1987) que cubren desde la Geoestadística Lineal y No Lineal hasta problemas más complejos asociados con la selección de menas, simulación, etc. En la actualidad se pueden encontrar en el mercado informático programas profesionales que ofrecen opciones para la aplicación de estas técnicas en las especialidades de Ciencias de la Tierra. Entre estos programas se puede mencionar el “*Isatis*” distribuido por la sociedad *Geovariance* y desarrollado en el Centro de Geoestadística de *Fontainebleau* de la Escuela Superior de Minas de París. Existe, además, una amplia gama de sistemas profesionales como: Gemcom, Vulcan, DataMine, etc., destinados al modelaje de yacimientos minerales que incluyen algunas posibilidades para la aplicación de las geoestadística.

Para profundizar en este tema se pueden referir las colecciones de artículos recogidas en los Congresos Internacionales de Geoestadística, celebrados desde 1992 hasta la actualidad (Armstrong, 1994), por ejemplo:

- *Geostatistics Troia'92*. Vols 1 & 2. A. Soares. Kluwer Academic Press.
- *Proceedings of the Geostatistical Simulation Workshop*. Fontainebleau (Francia). 27-28 de mayo de 1993. M. Armstrong & P. Dowd. Kluwer Academic Press.
- *Geostatistics for the Next Century - An International Forum in Honour of Michel David's Contribution to Geostatistics*. Montreal (Canadá). 1993. R. Dimitrakopoulous. Kluwer Academic Press.

En la actualidad la aplicación de los métodos geoestadísticos en la esfera internacional es amplia, existiendo dos polos fundamentales: El Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia y la Universidad de Stanford, Estados Unidos. También hay otros centros, instituciones y empresas que utilizan sus bondades en la caracterización de recursos naturales y aplicaciones a los más diversos problemas de las Ciencias de la Tierra.

1.7. Conclusiones del capítulo

Existen en la actualidad amplios trabajos sobre el conocimiento de la geología de la región oriental donde se encuentran enclavados los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos de la corteza de intemperismo. Tradicionalmente se ha usado el método de áreas de influencia en la estimación de estos recursos tan valiosos para la economía nacional. Aún cuando se han desarrollado investigaciones usando métodos estadísticos y geoestadísticos en diversos problemas relacionados con los yacimientos ferroniquelíferos, no se han explotado todas las potencialidades que ofrece dicha técnica relacionadas con la estimación y fundamentalmente con la simulación geoestadística, que en la esfera internacional ha reportado beneficios.

Capítulo II. Caracterización geológica del área de estudio

2.1. Introducción

En este capítulo se hace una breve caracterización actualizada de la región del yacimiento Punta Gorda y del área patrón de estudio de la investigación (Bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 y el O48) utilizando las concepciones actuales (Lavaut, 1998; Ariosa et al., 2002) de la clasificación litológica de la corteza de intemperismo y sus rocas madres en Cuba (ver apéndice I). Se caracteriza detalladamente los modelos geológicos y de recursos minerales del área tratada del yacimiento Punta Gorda. Los materiales geológicos utilizados fueron actualizados sobre la base de los resultados de las últimas prospecciones geológicas realizadas en el yacimiento y áreas aledañas (figuras 2.1, 2.2 y 2.3).

El yacimiento Punta Gorda, según la denominación actual, se ubica en el área comprendida entre el arroyo Los Lirios y el río Yagrumaje, continuándose lateralmente hacia el este y oeste con los yacimientos Yagrumaje Norte y Moa Oriental, respectivamente, que anteriormente eran considerados como sectores de mismo yacimiento (N. Aguenko et al., 1972, datos de archivo); por el norte limita con el curso del río Moa y al sur con los yacimientos Camarioca Norte y Yagrumaje Oeste (figuras 2.2 y 2.3).

La delimitación del modelo de recursos minerales (reservas) se realizó sobre la base de las condiciones técnico económicas de cálculo, vigentes en la planta Empresa Comandante Ernesto Guevara, que se fundamentan sobre los contenidos de Fe y Ni, sin incluir el cobalto, lo que en nuestra opinión requiere de un estudio aparte.

2.2. Breve historia de los yacimientos lateríticos en Cuba

La existencia de las lateritas fue reconocida por vez primera por Buchanan en 1807. Un siglo después Harrassowitz en 1926 realizó una descripción general de las lateritas y muchas de sus observaciones y sugerencias aún poseen un considerable valor (Lima, 1997). La primera referencia que se tiene acerca de la existencia en este territorio de suelos rojizos portadores de minerales de hierro, según (Vera, 1979), se remonta a la época de la exploración de nuestra isla por el Almirante Cristóbal Colón, en cuyo libro de bitácora quedó registrado este hecho a su paso por las costas de la provincia de Oriente. Referencias posteriores muestran que entre los años 1890 y 1900, estos minerales son considerados, fundamentalmente, como ‘ocres’ más apropiados para la fabricación de pinturas, que como mena de hierro.

En esta época compañías hispano - norteamericanas mostraron interés por nuestra corteza de intemperismo. Se realizan trabajos de exploración de las lateritas, estudiándose sólo como menas de hierro, se producen los denominados **aceros especiales de Mayarí**, no dándole atención especial al níquel y cobalto contenido en las lateritas (Ariosa, 1977). Posteriormente, en 1930 se comenzó a considerar las menas como niquelíferas y no como ferruginosas, a partir de la crisis económica del capitalismo, cuando fueron abiertos los yacimientos de níquel de Nueva Caledonia y de Kalimantan, en Borneo. Empresas norteamericanas realizan estudios tecnológicos de las menas y se inician los trabajos para la construcción de una planta procesadora.

Después del triunfo de la revolución comenzó un proceso de estudio profundo de los recursos niquelíferos sobre una base sistemática y de forma detallada hasta nuestros días (Ariosa, 1977), con la colaboración de especialistas del campo socialista hasta 1983. Se desarrolla la estrategia minero – metalúrgica del norte de Oriente con la construcción de dos nuevas plantas, la Empresa Comandante Ernesto Guevara y las Camariocas, y modernización de las existentes, convirtiéndose el país en uno de los primeros productores y comercializadores de níquel del mundo. Las reservas minerales de los yacimientos niquelíferos de Cuba constituyen del 27 al 28 % de las reservas mundiales de minerales de níquel oxidados y silicatados (Ariosa, 1977), junto a Canadá, Nueva Caledonia y otros.

Hoy día la extracción del níquel y cobalto en nuestras menas lateríticas ferroniquelíferas constituye uno de los renglones más importantes de la economía nacional y el primero de la Industria Geólogo Minera cubana, invirtiéndose cuantiosos recursos, donde se proponen objetivos principales como: elevar la competencia internacional en calidad y reducción de costos, incrementar la recuperación del níquel y el cobalto contenido en el mineral a los niveles internacionales y reducción sensible del consumo energético; alcanzando el mercado actual más de 31 mil toneladas a más de 30 países, lo que se ha realizado también con capital mixto.

2.3. Yacimientos en corteza de intemperismo lateríticos en Cuba

De las cuatro zonas del territorio nacional en que se reconocen las cortezas de intemperismo laterítica, es la región Sagua – Baracoa la que poseen mayor desarrollo tanto por el volumen

de las reservas como por la calidad de las menas con elevados contenidos industriales de Ni y Co. Esta región abarca la mayor parte de la provincia de Holguín y parcialmente Guantánamo.

A lo largo de 150 km de su costa nororiental de Cuba se ubican los principales campos de menas lateríticas que se contabilizan hoy día en más de 3 000 millones de toneladas de menas niquelíferas, de las cuales 800 millones (25% del total) están en la categoría de reservas probadas (Ariosa et al., 2002), representando la columna vertebral del desarrollo minero metalúrgico de Cuba, realizándose sobre esta región estudios geológicos detallados.

Los yacimientos del nordeste de Holguín están situados geográficamente en la zona llamada Cuba Oriental y desde el punto de vista geológico en la región situada al este de la zona de falla de Cauto. Rocas típicas de una secuencia ofiolítica completa (peridotitas con estructuras de tectonitas, cumulos ultramáficos, cumulos máficos, diques de diabasas y niveles efusivos sedimentarios) están presentes en extensos afloramientos en Cuba Oriental. Estas secuencias constituyen la denominada Faja Ofiolítica Mayarí - Baracoa, cuyas principales estructuras están representados por:

1. Macizo Mayarí - Cristal.
2. Macizo Moa - Baracoa.
3. Macizo Sierra del Convento.

A pesar de los variados trabajos realizados, el grado de conocimiento actual del complejo ofiolítico cubano es insuficiente (Proenza, 1997); según este autor, no existe una cartografía de detalle de los diferentes tipos litológicos que integran la asociación ofiolítica, se han realizado muy pocos estudios que tengan en cuenta las concepciones petrológicas, geoquímicas y estructurales actuales de las ofiolitas, no se cuenta con estudios petrológicos y estructurales de detalle que incluyan análisis de fábricas, de química mineral, de geoquímica de elementos en trazas o isotópica, no existen reconstrucciones paleogeográficas fiables a partir de datos paleomagnéticos y los estudios geofísicos son limitados.

Actualmente se tienen reconocidos en esta zona 39 yacimientos lateríticos con diferentes grados de estudio, asignados a las industrias que están en explotación (Ernesto Che Guevara y Moanickel S.A. Pedro Soto Alba de Moa y René Ramos Latour de Nicaro) y a los proyectos Cupey y Pinares, y otros son reservas estatales. El estudio de estos yacimientos sigue siendo una necesidad y una tarea de actualidad, tanto en la exploración detallada de algunos, como en la profundización del conocimiento de su génesis, evolución, estructura actual y la relación de

los materiales que los componen con el aumento de la eficiencia de los procesos metalúrgicos (Legrá, 1999).

2.4. Generalidades sobre la geología de los procesos de intemperismo en la región del yacimiento Punta Gorda

La región del yacimiento Punta Gorda constituye una porción del macizo Moa – Baracoa con amplia propagación de rocas ofiolíticas que ocupa un área de unos 6.5 km² (Vera, 2001). Este macizo fue obducido hasta la superficie durante el colapso de la paleoestructura volcánica de Cuba, manteniendo una elevada base erosional (+50 hasta +900m) en su mayor área durante un tiempo geológico no menor de 80 – 85 millones de años, es decir, desde el Cenomaniano (Lavaut, 1998). Unido a la coincidencia de varios factores como: las condiciones climáticas favorables al intemperismo en el área del Caribe, incluida Cuba, desde el Cretácico Superior (post – Campaniano) y la prolongada estabilidad tectónica de estos territorios ofiolíticos ha dado lugar a vastos y potentes yacimientos.

Todos estos elementos favorecieron la peniplanización parcial del macizo con el desarrollo de una potente corteza de intemperismo laterítica zonal de hasta 25 – 35 m de espesor en el área del yacimiento Punta Gorda, siendo éste el más potente de los yacimientos de la zona. El macizo actualmente es desmembrado por la erosión conjuntamente con la corteza de intemperismo, estableciéndose más de un ciclo erosivo desde la periferia hacia el interior del mismo con la formación de terrenos cerrosos y planicies y pedimentaciones extensas suavemente inclinadas en cuya porción norte, aledaña al océano se ubica el yacimiento Punta Gorda. (figuras 2.2 y 2.3)

Las rocas madres que componen el sustrato de la corteza de intemperismo son tholeitas oceánicas, representadas fundamentalmente por harzburgitas (76% de olivino y 23% de ortopiroxeno) y gabroides (gabro olivínico, troctolita, etc.). Minoritariamente existen otras rocas ultramáficas: lherzolitas, wherlitas, piroxenitas y dunitas. Los gabroides y dunitas excepcionalmente forman cuerpos relativamente grandes de más de un kilómetro cuadrado (figura 2.2). El grado de serpentización de estas rocas es frecuentemente alto (40 – 90 %) con variaciones de su intensidad, en forma areal direccional y verticalmente según la potencia (85 – 90 % en la superficie hasta 30 – 45 % en profundidades someras). Es variable también el tipo de mineral predominante, teniendo mayor difusión la lizardita en la serpentización. La fisuración tectónica de las rocas es muy significativa, por lo que existen dos tipos

principales: agrietamiento tectónico masivo (multiplanar, multidireccional) debido a la cinética del *spreading*, y fracturación local direccional (fallamiento y milonitización hasta los melanges), producida por los fenómenos geodinámicos de emplazamiento y plegamiento geológico ulterior durante el desarrollo geológico de los territorios. Estas fisuraciones son independientes de las provocadas por el intemperismo que se superpone a ambas.

Las condiciones microclimáticas de la región Moa - Baracoa muestra los niveles promedios más altos de lluvia en Cuba oriental son de 2 000 y 3 000 mm/año, respectivamente, donde las fluctuaciones diarias y estacionales de temperatura son muy significativas (hasta 10-15°C), considerando la diferencia climática vertical. Los niveles de radiación solar, rehumectación y drenaje del terreno presentan ciclos diurnos y estaciones significativos. La temperatura media del aire en el invierno es de 22-26°C y en verano 30-32°C. El modulo de infiltración subterránea de las aguas alcanza 10-25 l/s por 1 km². Los terrenos lateríticos están surcados por un sistema hidrográfico importante, compuestos por cañadas, arroyos y pequeños ríos que desembocan en arterias fluviales regionales como los ríos Yagrumaje, Moa, Cayo Guam, Jiguaní y otros, que unido a la altitud de la base erosional, condiciona un enérgico drenaje hidráulico, favorecido por la porosidad de los terrenos lateríticos, lo que provoca la erosión parcial de éstos y la transportación de los limos lateríticos a la plataforma marina, que fosilizados durante el Mioceno conforman sedimentos gravo - arcillosos compuestos principalmente por material laterítico (“corteza redepositada”), mapeados en el área del curso inferior del río Moa (figura 2.3).

Desde el punto de vista morfológico la corteza de intemperismo en la región del yacimiento Punta Gorda es predominantemente eluvial de tipo areal y dentro de estas subordinadamente se presentan cortezas de tipo lineal en forma de bolsones asociados a zonas de fallas (lineales). Además, en el plano norte del yacimiento asociado al desarrollo paleogeográfico del valle (desembocadura) del río Moa se han establecido sedimentos de aguas someras gravo – arcillosos conteniendo abundante material laterítico denominado como “corteza redepositada”, siguiendo la terminología de Guinzburg et al. (Comunicación personal, Lavaut 2002).

Los fenómenos de redeposición en el yacimiento Punta Gorda sobre la base de los resultados de la exploración geológica con perforaciones en redes de 33.33x33.33 m y 16.67x16.67 m y las excavaciones mineras realizadas en el sector central de este yacimiento, se ha podido

precisar su ubicación en las áreas por debajo de la cota 30 – 50 m sobre el nivel del mar, no confiriéndose la extensión de estas formaciones hasta niveles de la cota 200 m, como se había reportado en el año 1970-71. Los documentos geológicos de testigos de perforaciones y frentes de cantera, denotan la existencia de diques de rocas gábricas (in situ) emplazadas en la parte alta ferruginosa de la corteza de intemperismo, lo que demuestra su génesis eluvial, donde anteriormente por datos preliminares habían sido indicados estos depósitos redepositados (hasta la cota 200 m sobre el nivel del mar). Además de diques de gabros, también se establecieron otras características adicionales que indican la naturaleza “in situ” (supergénica) de la parte ferruginosa superior del corte laterítico tales como: tabiques ferruginosos de unión subverticales pseudoestratificados por carga y asentamiento del material, ausencia de microfauna y otros.

En el relieve se distinguen muy bien tres niveles de terrazas escalonadas, suavemente inclinadas hacia el norte. Los niveles de terrazas superiores comprende la parte centro - sur del yacimiento y están representado por una superficie aplanada ligeramente inclinada hacia el norte y desmembrada por los valles poco profundos de ríos y arroyos con alturas absolutas de 50 – 200 m. La pendiente general es hacia el norte. Esta superficie aplanada está cubierta totalmente por la corteza de intemperismo eluvial que posee un perfil generalmente laterítico – saprolítico. Hacia el norte de ésta se ubica otra superficie de terrazas más bajas con una altura absoluta de 30 – 50 m, cubierta por corteza de intemperismo formada “in situ” y por los productos de la redeposición de la corteza de intemperismo, los cuales llegan a predominar completamente hacia la parte norte del yacimiento. El espesor de la corteza de intemperismo varía de 1 a 30 m, siendo como promedio de 20 m.

A lo largo de las mayores corrientes de agua como el río Moa, Yagrumaje, Punta Gorda, etc. en sus cursos medios, en el flanco sur del yacimiento se observan formas erosivo - tectónicas del relieve. Los levantamientos generales del Cuaternario del anticlinorio Moa - Baracoa trajeron como consecuencia una intensificación de la actividad erosiva. Los valles de los ríos en estos lugares tiene forma de V estrecha y presentan terrazas erosivas. La diferencia relativa entre las divisorias y las vaguadas alcanzan 100 m. Los productos friables de la corteza de intemperismo en esas laderas escarpadas no se conservan y por lo tanto en sus partes inferiores y en los cauces de los ríos afloran las rocas madres desintegradas y débilmente lixiviadas. En los cauces inferiores de los ríos se observan formas erosivas acumulativas del relieve que se manifiestan en forma de terrazas aluviales cuyas alturas absolutas se

correlacionan perfectamente con las alturas correspondientes a las de la superficie de abrasión.

De forma general, el relieve es típicamente montañoso, constituido por colinas elevadas, y pequeñas y medianas mesetas cuyas alturas oscilan entre 600 y 800 m sobre el nivel del mar (Lavaut, 1998). La mayor elevación es el alto de La Calinga con 1 100 m sobre el nivel del mar. El sistema orográfico tiene dirección preponderante E – W y NE – SW, direcciones que se mantienen con un paralelismo bastante marcado con el eje longitudinal de la Isla.

2.5. Descripción geológica del área de estudio

El área patrón de estudio para la aplicación geoestadística del presente trabajo comprende los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, además, el bloque O48, que abarcan un área de 0.63 km² ubicada en la parte central del yacimiento Punta Gorda, representando sus flancos oeste y este. Estos bloques fueron seleccionados por constituir dos áreas representativas de la geología actual del yacimiento, están integrados por rocas puramente ultramáficas (bloque O48) y rocas ultramáficas permeadas por material gabroideo (diques, vetas, impregnaciones) representada por gabroides olivinico y peridotitas con plagioclasas y plagioclasitas (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55). La corteza de intemperismo en ambos sectores tiene carácter eluvial “in situ” según se ha podido comprobar por los testigos de perforación hecha por redes detalladas (33.33x33.33 m, 16.67x16.67 m y 8.33x8.33 m) y excavación mineral. Esta área patrón no presenta sedimentos redepositados los cuales en su área de existencia han sido ya escombreados y no representan un elemento importante de la geología actual del yacimiento.

La composición química y mineral de las rocas ultramáficas madres de la corteza de intemperismo se presentan en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1: Composición química de las peridotitas serpentinizadas en la región del yacimiento Punta Gorda. (% en peso). (Tomado de Labierov, 1985).

Sector	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	NiO	CaO	Otros
Norte	38.83	-	0.73	8.24	1.84	0.37	35.81	0.11	0.28	0.31	0.015	14.02
Sur	40.39	-	0.44	6.89	1.18	0.22	36.9	0.1	0.27	0.30	-	13.83

La estructura y composición química y mineral de la corteza de intemperismo se presenta en la tabla 2.3 y 2.4 y en la figura 2.5 de las cuales se puede observar una preponderante difusión de perfiles lateríticos – saprolíticos en el bloque O48 y una alta difusión de perfiles lateríticos en los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, sobre el fondo de propagación de perfiles lateríticos – saprolíticos completos.

La ubicación de perfiles lateríticos en los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 gravitan hacia las rocas madres ultramáficas y las lateritas – saprolíticas hacia las zonas contiguas de las rocas gabroides que siguen direcciones de fallas, según al menos 4 direcciones que concuerdan con las direcciones del fallamiento regional según el mapeo geológico.

La continuidad lateral y variabilidad de la zonalidad litológica de la corteza de intemperismo se muestra en el perfil según la dirección de la línea A-B (figura 2.5). De estos materiales se puede observar una continuidad lateral relevante de los horizontes de ocre estructurales que son principales productores de menas.

Las características del recurso mineral se modelan en la figura 2.6, de la cual se puede ver una alta potencia de escombro (más de 10 m) en los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55, lo que se desarrolla con el mineral en rocas gabro - peridotitas, así como baja potencia de mena LB+SB (menos de 10 m), mientras que en el bloque O48 ocurre lo contrario debido a la formación de la corteza en rocas puramente de tipo ultramáficas.

La distribución de los metales se presenta en la figura 2.7, en la que se puede observar la coincidencia de los más bajos contenidos de níquel y de hierro en forma alineada sobre las rocas gabro - peridotitas (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55), mientras que en el bloque O48 predominan los altos contenidos de hierro (más de 35%) y de níquel mayores de 1.0 %. La distribución de los contenidos de níquel en la vertical se muestra en el perfil presentado en la figura 2.7, en la que se manifiesta una lixiviación intensa de este metal en la parte superior de la corteza y su concentración en la parte media y baja, lo que es típico del desarrollo de las cortezas eluviales.

Las características de variabilidad estadística y espacial se exponen en los capítulos de aplicación (Capítulos IV y V). Según se muestra en los mapas de la corteza y rocas madres,

perfiles y diagramas de bloques (figuras 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9) las fluctuaciones de la morfología y la discontinuidad de los dominios geológicos se controla tanto por la existencia de variedades de rocas madres (diferente composición química y mineral y resistencia al intemperismo), así como a la dislocación tectónica, sistemas de grietas y exfoliación de las rocas del basamento. La fisuración se crea principalmente por líneas tectónicas que se representan en los mapas y perfiles expuestos en este epígrafe.

2.6. Conclusiones del capítulo

Los yacimientos lateríticos en corteza de intemperismo de la región nororiental de Cuba, particularmente el yacimiento Punta Gorda, son muy complejos geológica y estructuralmente, lo que hace que sus parámetros geólogo - industriales sean extremadamente variables espacialmente. Lo anterior se evidencia en los siguientes elementos:

- ◆ Existencia de variedades de rocas madres con diferente resistencia a los procesos de meteorización (desigual distribución espacial de materiales blandos, duros y semiduros)
- ◆ Existencia de grietas, fallas y exfoliaciones en las rocas madres.
- ◆ La estructura litológica variable de la corteza de intemperismo (existencia de diferentes tipos de perfiles de intemperismo) condiciona variaciones en la estructura del campo mineral.
- ◆ Diferentes condiciones geomorfológicas, hidrogeoquímicas y microclimáticas.

Desde el punto de vista geomatemático, la variabilidad espacial de los depósitos minerales es compleja, tanto para la capa de escombros superior como para el cuerpo menífero, lo que no impide su modelación con el aparato geoestadístico. La suficiencia de la modelación geomatemática dependerá de la existencia de una red detallada que capte las fluctuaciones reales del depósito, esto implica la necesidad de la argumentación de la geometría y paso de la red de mediciones (muestreo) para cada área en particular.

Tabla 2.2. Composición mineral media de las rocas madres en la corteza de intemperismo del yacimiento Punta Gorda (en % de volumen).

(Según Lavaut et al., 1987)

Variedad petrográfica	Olivino (relictos)	Piroxeno rómbico	Piroxeno monoclinico	Lizardita	Crisotilo	Antigorita	Bastita	Plagioclasa	Cuarzo
Harzburgita serpentinizada	29	15	-	39.8	2	-	14.4	-	-
Serpentinita por harzburgita	8.5	17.3	-	73.2	+	+	26.5	-	-
Serpentinita antigorítica	-	-	-	-	-	99	-	-	-
Gabro olivínico leucocrático	15	-	24	-	-	-	-	60	-
Plagiogranito (diorita a tonalita)	-	-	Actinolita + tremolita = 5	-	-	-	-	70	20
Diorita porfírica	-	-	Actinolita + tremolita = 14	-	-	-	-	50	-
Albitita	-	-	Actinolita + tremolita = 7	-	-	-	-	90	3
Anfibolita	-	2	Antofillita = 98	-	-	-	-	-	-
Recálculo a composición inicial de la harzburgita promedio	76.02	23.5	1.25	-	-	-	-	-	-

Tabla 2.3. Composición química promedio de la corteza de intemperismo del campo mineral Punta Gorda.

Zonas de la corteza de intemperismo	Potencia promedio (m)	Composición química promedio (%)											Resultados del muestreo ordinario		
		Fe ₂ O ₃	FeO	NiO	CoO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P.P.I	Fe	Ni	Co
1. Zona de concreciones ferrosas	3.5	64.10	0.26	0.73	0.079	3.98	0.39	14.23	2.55	0.44	0.340	12.43	44.19	0.66	0.046
2. Zona de ocre inestructurales	2.1	68.55	0.20	1.29	0.116	3.54	1.08	8.47	2.70	0.84	0.110	11.94	45.16	0.81	0.059
3. Zona de ocre estructurales finales	4.5	62.85	0.24	1.65	0.117	7.19	2.37	7.99	2.85	0.96	0.090	12.27	45.37	1.34	0.115
4. Zona de ocre estructurales iniciales	3.4	32.84	0.68	2.01	0.089	25.82	16.63	5.56	1.47	0.68	0.070	12.18	22.94	1.38	0.053
5. Zona de rocas madres lixiviadas	2.5	15.13	0.89	1.84	0.027	36.46	29.04	2.01	0.99	0.17	0.030	13.03	10.66	1.05	0.022
6. Zona de rocas madres agrietadas	1.9	8.11	1.24	1.07	0.016	39.17	34.86	1.12	0.41	0.12	0.029	13.02	5.93	0.45	0.012

Tabla 2.4. Composición mineral de la corteza de intemperismo de Hiperbasitas en el campo mineral del yacimiento Punta Goda.

Zonas de la corteza de intemperismo	Cantidad de muestras	Composición Mineral (%)							
		Goethita	Magnetita - maghemita	Minerales de manganeso	Gibbsita	Cromo - espinélicos	Serpentinas (crisotilo, serpofita, antigorita y otras)	Minerales arcillosos (nontronita, beidelita)	Cuarzo
1. Zona de concreciones ferrosas	5	72.69	0.52	0.87	16.32	3.62	0.14	0.49	1.62
2. Zona de ocre inestructurales	7	76.89	0.44	1.50	9.71	4.10	0.73	0.86	1.43
3. Zona de ocre estructurales finales	56	70.82	1.13	3.28	8.40	3.45	2.69	0.08	2.13
4. Zona de ocre estructurales iniciales	3	20.62	3.45	0.62	4.0	1.19	43.60	21.0	1.44
5. Zona de rocas madres lixiviadas	2	9.52	0.10	0.22	-	1.54	66.45	20.0	-
6. Zona de rocas madres agrietadas	2	3.58	2.56	0.11	-	0.53	77.78	11.32	-

Capítulo III. Aspectos metodológicos para la aplicación de la Geoestadística

3.1. Introducción

El uso de los métodos geoestadísticos exige un análisis previo de la estructura espacial de la información disponible. Antes de proceder a la realización de las estimaciones por el procedimiento krigearse se deben tomar en consideración algunos aspectos como: conocimiento del problema a resolver, cálculo de la estadística básica a fin de conocer el comportamiento de la información, cálculo de los semivariogramas experimentales, que revelan las características de continuidad espacial del fenómeno que se estudia, ajuste de los modelos teóricos de semivariogramas y finalmente, realización de las estimaciones. En este capítulo se abordan estos elementos, haciendo especial énfasis en el caso de estudio tratado.

3.2. Elementos para la aplicación de la Geoestadística

La aplicación de la Geoestadística tiene como objetivo, obtener la mejor estimación posible a partir de la información disponible resultado de los trabajos de exploración (Armstrong y Roth, 1997; de Fouquet, 1996; Christakos y Raghu, 1996; Christensen et al., 1993). Esta estimación se obtiene tomando en cuenta las características estructurales del objeto de estudio. Los pasos presentados en este capítulo pueden ser aplicados a todos los campos de las geociencias, que presentan problemas de estimación de algún parámetro o propiedad medida en localizaciones de su dominio, en particular para la estimación de reservas minerales en yacimientos lateríticos ferroniquelíferos.

De forma general, las observaciones van acompañadas de una posición en el espacio, es decir, son georeferenciadas, característica que las distingue del resto de las variables estadísticas, éstas son llamadas **variables regionalizadas** (Matheron, 1970; Journel y Huijbregts, 1978; Curran y Atkinson, 1998; Pawlowsky et al., 1995).

La estimación geoestadística puede hacerse de dos formas:

Estimación puntual, sólo se obtiene un valor estimado en una localización deseada o en los puntos de una red de estimación definida sobre la región de estudio.

Estimación de bloque, se obtiene el valor medio de la propiedad que se estima en bloques definidos sobre el dominio, rectángulos para aplicaciones en dos dimensiones y paralelepípedos para tres dimensiones.

Los puntos o bloques a estimar deben ser seleccionados de los definidos en una región rectangular que cubra el dominio, con el objetivo de contornear la zona de interés, es decir, seleccionar los puntos, cuadrículas o bloques que están dentro de los límites de la región de estudio, en el caso minero la zona mineralizada de interés.

En una aplicación geoestadística, se transita por cuatro etapas fundamentales que varían de acuerdo al problema particular a resolver. En el cuadro sinóptico de la figura 3.1 se muestra la relación entre éstos y se describen en los epígrafes siguientes. Estas etapas son: 1.- Conocimiento del problema. 2.- Análisis estructural. 3.- La estimación o simulación. 4.- Tratamiento de los resultados geoestadísticos.

3.3. Conocimiento del problema

Una vez obtenidos los datos, es necesario que se controlen integralmente para verificar su exactitud, esto significa que todos los errores numéricos deben estar corregidos en la base de datos, es importante además que se esté familiarizado con el problema a resolver. Al comienzo del estudio es imprescindible discutir todos los elementos necesarios a fin de saber: geología del yacimiento, tipos de procedimientos de medición empleados, si se produjeron cambios en éstos, si la zona es geológicamente homogénea o si existen heterogeneidades de diferente naturaleza como la presencia de fallas grandes, entre otras, si las zonas de valores grandes han estado privilegiadas por las mediciones, y si éstas son representativas de la realidad que se estudia (Armstrong y Carignan, 1997). Todo esto permitirá realizar adecuadamente la regularización de la información y un detallado análisis exploratorio de datos. Esta etapa incluye los siguientes pasos: 1. Estudio geológico del problema, 2. Información de exploración, 3. Corrección numérica de la información en soporte magnético, 4. Regularización de la información, y 5. Análisis exploratorio de datos.

3.3.1. Estudio geológico del problema

Para la aplicación efectiva de la geoestadística es un requerimiento fundamental tener conocimiento de la estructura geológica en que se desarrolla la mineralización (David, 1977; Journel y Huijbregts, 1978). Esto incluye, para el caso minero, la génesis del yacimiento y las rocas encajantes entre otros. Si los datos contienen información de una misma estructura geológica y la existencia de grandes fallas ha provocado la destrucción de la continuidad espacial, entonces la información debe ser dividida y estudiada como poblaciones independientes. En resumen deben conocerse todos los elementos que permitan inferir el modelo geológico del yacimiento, o las características del fenómeno en estudio.

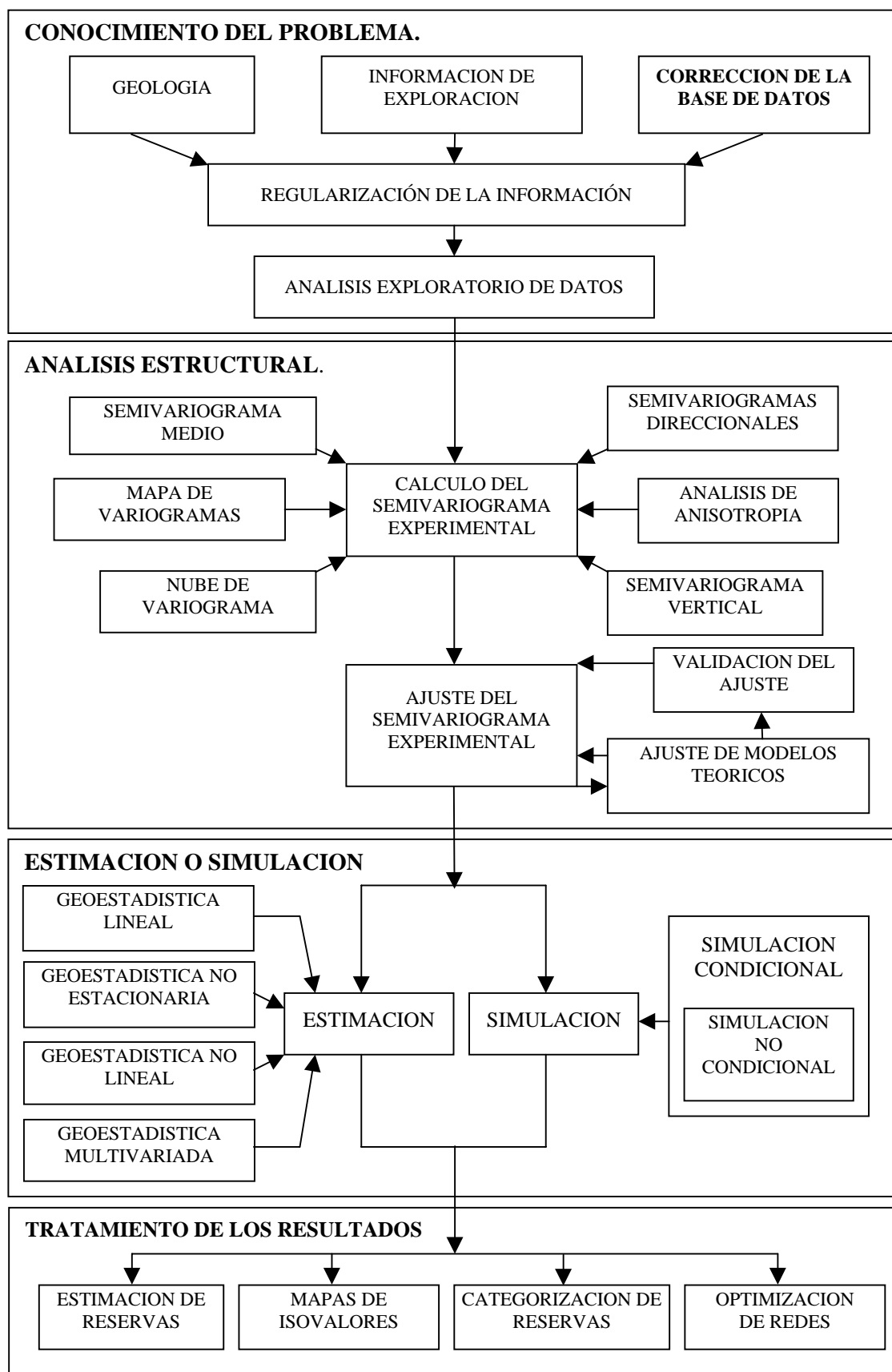


Figura 3.1. Elementos que integran un estudio Geoestadístico.

Según Journal y Huijbregts (1978) existen tres generalizaciones en la forma del cuerpo mineral a tomar en cuenta:

- 1.- Cuerpos estratiformes: Tienen como característica fundamental que la estructura de la mineralización y la disposición de los datos disponibles en el espacio tridimensional favorecen una dirección respecto a otra, esto es, el espesor de la mineralización es mucho menor que las dimensiones en el plano del cuerpo. Estos cuerpos también son conocidos como tabulares, lenticulares. Pueden ser estudiados de forma bidimensional y tridimensional.
- 2.- Cuerpos isométricos: En éstos la geometría de la mineralización no tiene una dirección de prolongación o aplanamiento de preferencia, es decir, las dimensiones de sus tres componentes son comparables, por lo que su tratamiento se desarrolla fundamentalmente de forma tridimensional.
- 3.- Cuerpos vetíticos. En estos casos el problema es determinar, desde el punto de vista geoestadístico cuándo un yacimiento puede ser considerado de tipo veta. Un depósito de brecha con múltiples vetas entrelazadas, puede ser visto como un depósito isométrico, pero en el caso de vetas aisladas, su estudio puede ser reducido al plano de las vetas y tratados de forma bidimensional como los cuerpos estratiformes.

3.3.2. Información de exploración

La información obtenida de los trabajos de exploración en la actividad minera comprende el resultado de los análisis químicos, fundamentalmente de los testigos de perforación, información que puede organizarse según la tabla 3.1. Pueden utilizarse además, muestras de afloramiento, galerías, etc. En otros campos de las geociencias esta información la constituyen los valores medidos en los puntos de muestreo del dominio en que se manifiesta el fenómeno regionalizado en estudio (tabla 3.2).

Tabla 3.1. Organización de la información de exploración minera.

No. Pozo	X	Y	Z	Profundidad

No. Pozo	No. Muestra	Desde	Hasta	Litología	Contenidos

No. Pozo	Profundidad	Acimut	Inclinación

Tabla 3.2. Organización de la información para el caso bidimensional.

No. Muestra	X	Y	Variables o contenidos

3.3.3. Corrección numérica de la información en soporte automatizado

Un elemento a tomar en cuenta en el almacenamiento de la información es la calidad de la información primaria, tanto aquella procedente de informes como la de formato digital, ya que ésta va a determinar la veracidad de los resultados (Armstrong y Carignan, 1997). Antes de comenzar el procesamiento de la información debe controlarse y corregirse toda la información numérica, lo cual resulta de gran importancia debido a que, un error en la etapa inicial se reflejará sistemáticamente durante todo el estudio. Existe momentos en los que las herramientas informáticas a aplicar pueden detectar anomalías en la información, pero que dependiendo del grado de la modificación introducida pueden también quedar ocultas. Los resultados del procesamiento son sensibles al nivel y calidad de la información.

3.3.4. Regularización de la información

Este aspecto tiene como objetivo organizar la información para el procesamiento, debe efectuarse sobre toda la zona de interés y puede incluir los siguientes casos:

- ♦ Atendiendo a que frecuentemente los testigos de perforación no tienen siempre la misma longitud, se calcula una media ponderada a intervalos del orden del valor medio de la longitud de los testigos de perforación para cada pozo en la zona mineralizada. Todo esto permitirá realizar un análisis de la variabilidad espacial en iguales soportes. A este proceso se le llama regularización de la información.
- ♦ Para el caso de los cuerpos en los que su análisis se hace de forma bidimensional, es necesario computar por pozos una media ponderada de los valores de todas las variables de interés a partir de las muestras de toda la zona mineralizada, a éstos les acompañan las coordenadas del centro de ésta y el espesor de la misma, es decir, el parámetro potencia. Así se puede desarrollar el análisis de variabilidad horizontal a lo largo de la estratificación.
- ♦ Para los cuerpos isométricos que su análisis se desarrolla en tres dimensiones, la regularización de la información se hace a distancias regulares en la zona mineralizada, de modo que se tienen bancos de datos por niveles. Esto permite la realización del análisis de variabilidad en la dirección horizontal y vertical. Es importante aclarar que aún cuando el

semivariograma puede ser calculado en tres dimensiones se recomienda el análisis de estas direcciones por separado.

Los casos antes mencionados se presentan particularmente durante la exploración minera en los pozos de perforación, donde se dispone de un conjunto de muestras por pozo. Para el caso de mediciones realizadas en otras especialidades de las geociencias, donde cada localización está acompañada de un valor, el procesamiento geoestadístico se desarrolla directamente.

3.3.5. Análisis exploratorio de datos

Una vez que se tiene conocimiento del problema, se poseen los datos corregidos, y la información regularizada, es importante calcular las estadísticas básicas a fin de determinar homogeneidad en la información. Buscar valores extremos o poblaciones mixtas que puedan influir negativamente en el procesamiento geoestadístico. En este paso es útil estudiar los histogramas y el mapa de localización de datos reales de manera conjunta. Esto permite reflejar las localizaciones de posibles valores extremos y la existencia de poblaciones mixtas, que pudieran encontrarse diferenciadas geográficamente e impliquen ser tratadas por separado. Pueden compararse los valores de la media y la mediana (los cuales deben ser del mismo orden), el valor del coeficiente de variación debe ser menor que uno, para un conjunto pequeño de datos es conveniente inferir del histograma si éstos se distribuyen de forma normal y comprobar la normalidad con pruebas de bondad de ajuste. En el caso de poblaciones con un número grande de muestras, por Teorema Central del Límite se puede inferir homogeneidad estadística (Walpole y Myers, 1996; Isaaks y Srivastava, 1989; Clark, 2002), y sólo hacer un análisis exploratorio de datos que permita descubrir la existencia de valores anómalos, datos erróneamente muestreados, etc.

La inexistencia de homogeneidad estadística, puede ser debida a las siguientes razones:

- 1.- La información obtenida resultado de la exploración, no es suficiente para realizar inferencia alguna.
- 2.- La información presenta un alto coeficiente de asimetría. En este caso las técnicas que mejores resultados ofrecen son las de la Geoestadística no Lineal.
- 3.- La información presenta poblaciones mixtas, que pueden estar diferenciadas geográficamente, lo que implica realizar estudios por separado de las mismas.

3.4. El análisis estructural

El análisis estructural o estudio de variabilidad es la etapa fundamental de todo estudio geoestadístico. Este tiene como objetivo determinar las características estructurales del fenómeno estudiado, utilizando la herramienta más valiosa de que se dispone: el semivariograma experimental. Posteriormente se reflejan las características de variabilidad y correlación espacial a través de modelos teóricos de semivariogramas. (Armstrong y Carignan, 1997). Este análisis puede ser aplicado a todo tipo de variable regionalizada, y se complementa con la interpretación geológica (Sahin et al.,1998). Esta etapa incluye los siguientes pasos: 1. El cálculo del semivariograma experimental, 2. El ajuste de modelos teóricos conocidos.

3.4.1. Cálculo del semivariograma experimental

El cálculo del semivariograma experimental tiene como objetivo revelar las características de continuidad espacial del fenómeno en estudio, es decir, tener conocimiento de cómo cambia el valor de la variable de una localización a otra. Este representa el útil más importante para el desarrollo del análisis estructural (Weerts y Bierkens, 1993; Sahin et al.,1998). Los parámetros a tener en cuenta para el cálculo son: el incremento (*lag* en inglés), la tolerancia lineal, la cual debe ser la mitad del incremento inicial y las direcciones de cálculo con sus correspondientes tolerancias angulares. Es importante significar que el semivariograma debe ser calculado hasta aproximadamente la mitad de la distancia máxima entre las muestras, según la dirección de cálculo. Este hecho se debe a que a partir de esta distancia la cantidad de pares comienzan a disminuir y la información que se aporta deja de ser estadísticamente significativa. El incremento, para múltiplos del cual se calculan los valores del semivariograma, se recomienda sea del orden de la distancia promedio entre las localizaciones contiguas.

Esta etapa incluye los siguientes elementos que se complementan mutuamente: 1. Cálculo de semivariogramas medios o globales, 2. Mapa de variogramas, 3. Nube de variogramas, 4. Cálculo de semivariogramas direccionales, 5. Análisis de anisotropías, y 6. Cálculo del semivariograma vertical.

3.4.1.1. Cálculo de semivariogramas medio o globales

El semivariograma medio u “omnidireccional” conocido también como semivariograma isotrópico o global, tiene como objetivo proporcionar la variabilidad espacial de los datos de

forma global, sin centrar la atención en alguna dirección en particular. Utiliza tolerancia angular de 90° , lo cual hace que sus valores para cada paso sean iguales para cualquier dirección analizada. Es el más idóneo para obtener un comportamiento espacial estructurado y advertir sobre la existencia de semivariogramas direccionales erráticos, por lo que se propone sea calculado inicialmente. Si este semivariograma no produce una estructura definida, no debe esperarse un mejor aspecto en los semivariogramas direccionales, en este caso es importante descubrir las causas de la erraticidad. (Armstrong y Carignan, 1997).

3.4.1.2. Mapa de variogramas

El mapa de variogramas visualiza de una forma rápida y práctica la existencia de anisotropía, permitiendo obtener de forma aproximada la dirección de mayor y menor continuidad espacial para iniciar el cálculo de los semivariogramas direccionales. Proporciona la vía para la realización de un análisis de anisotropía adecuado. En ocasiones se hace difícil su interpretación, por que se debe recurrir al cálculo de semivariogramas en diferentes direcciones revelando la existencia de un comportamiento espacial diferente a partir de éstos. (Frykman y Rogon, 1993; Homand-Etienne et al., 1995; Isaaks & Co., 1999).

3.4.1.3. Nube de variogramas

Este proceso de análisis de variabilidad espacial puede resultar engorroso por la existencia de valores extremos en los datos. La nube de variogramas es una herramienta útil que tiene como objetivo detectar diferencias significativas en los valores de los pares de datos, de encontrarse éstas, el par correspondiente no debe tenerse en cuenta en el cálculo del semivariograma. Además, brinda la posibilidad de encontrar el incremento adecuado en el cálculo de los semivariogramas. (Armstrong y Carignan, 1997).

3.4.1.4. Cálculo de semivariogramas direccionales

Los semivariogramas direccionales tienen como objetivo realizar al análisis de la variabilidad de la información centrando la atención en una dirección particular. Utilizan tolerancia angulares menores de 90° , permitiendo el desarrollo del análisis de anisotropía.

3.4.1.5. Análisis de anisotropías

Con el objetivo de encontrar diferencias en el comportamiento espacial en las diferentes direcciones del plano de la mineralización, se realiza un análisis de anisotropía. Esto implica calcular varios semivariogramas, más exactamente, pueden ser calculados en cuatro

direcciones separadas 45° , con tolerancia angular de 22.5° , o en ocho direcciones separadas 22.5° con tolerancias angulares 11.25° u otras combinaciones, comenzando por la dirección 0° hasta encontrar la dirección de mayor y menor continuidad espacial. Una forma práctica es utilizar la dirección obtenida de forma aproximada en el cálculo del mapa de variogramas. Los semivariogramas calculados deben ser ploteados en un mismo gráfico. Cuando ya se dispone de las direcciones de mayor y menor continuidad es suficiente analizar sólo éstas (Zimmerman, 1993).

Cuando los semivariogramas calculados de esta forma no presentan diferencias significativas, el fenómeno se considera isotrópico, y el comportamiento de su variabilidad puede ser descrito por el semivariograma medio correspondiente.

3.4.1.6. Cálculo del semivariograma vertical

El semivariograma, teóricamente, puede ser calculado en tres dimensiones, pero como en la práctica encontramos siempre una dirección que juega un rol diferente a la del resto, se recomienda analizar por separado esta dirección. En nuestro estudio lo haremos a través del semivariograma vertical, siempre sobre el mismo soporte en que fue analizada la variabilidad horizontal. Este cálculo tiene como objetivo descubrir la continuidad espacial en la dirección perpendicular al plano de la mineralización, a lo largo de los pozos de perforación. El semivariograma obtenido será usado posteriormente en el proceso de estimación por krigeaje en tres dimensiones. (Armstrong y Carignan, 1997).

3.4.2. El ajuste de modelos teóricos

Los resultados obtenidos con los semivariogramas experimentales no son utilizados directamente en el proceso de estimación, para ello deben antes ajustarse modelos teóricos a los semivariogramas experimentales. Este proceso se realiza de forma visual, y debe ser validado. Los modelos teóricos utilizados deben ser los autorizados, es decir, aquellos que sean “definido positivo” o de “tipo positivo”, si no puede existir el riesgo de encontrar varianzas negativas. (Cressie y Grondona, 1992; Deutsch, 1994; Armstrong y Carignan, 1997; Wackernagel, 1995).

Esta etapa incluye los siguientes pasos: 1. Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental obtenido, y 2. Validación del modelo ajustado.

3.4.2.1. Ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental

El ajuste de modelos teóricos de semivariogramas tiene como objetivo obtener un modelo que represente las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado a través de una expresión analítica. En general este ajuste se desarrolla de forma visual, aproximando modelos de semivariogramas conocidos a los puntos experimentales, donde debe obtenerse el valor del **efecto pepita**, si existe, un **modelo de semivariograma** por cada estructura ajustada con sus correspondientes parámetros **meseta y alcance**. Si el fenómeno presenta anisotropía se obtiene un alcance por cada dirección de mayor y menor continuidad espacial, de lo contrario existe isotropía y es suficiente un solo alcance (Myers, 1991b; Pannatier, 1993; Pitard, 1994; Wallace y Hawkins, 1994; Lamorey et al., 1995; Xie y Myers, 1995 a y b; Genton, 1998a). En ocasiones se realizan ajustes automáticos (Zhang et al., 1995; Genton, 1998b; Gotway, 1991; Zimmerman y Zimmerman, 1991). En este caso, aunque se encuentra el mejor ajuste, es importante verificar que el modelo obtenido sea de tipo positivo (Chauvet, 1994). Por lo que se recomienda el uso de modelos autorizados y el ajuste visual, con el correspondiente proceso de validación. Finalmente debe obtenerse uno o varios modelos de semivariogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance, dados por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = C_o + \sum_{i=1}^n C_i \cdot \text{Modelo}_i(a_x, a_y, a_z)$$

donde: C_o es el efecto de pepita, C_i la meseta, modelo_i el modelo de semivariograma con los alcances en las tres direcciones posibles y n es el número de estructuras utilizadas en el ajuste. El modelo así obtenido debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del semivariograma experimental, el cual será usado posteriormente en el proceso de estimación o simulación. (Journel y Huijbregts, 1978; Dubrule, 1994; Echaabi, 1995).

3.4.2.2. Validación del modelo ajustado

Con el objetivo de validar el modelo ajustado en la etapa anterior se utiliza el método de validación cruzada (Lajaunie, 1997; Bacchi y Kottegoda, 1995; Kiyono y Suzuki, 1996; Host et al., 1995; Madani, 1998; Carr, 1994). Este procedimiento consiste en eliminar temporalmente el valor de una localización en la información inicial y reestimar éste por krigeaje a partir de la información restante, repitiendo el proceso para cada localización muestreada. De este modo se obtiene un error de estimación dado por la diferencia de los valores reales y los estimados para cada dato disponible. Es razonable esperar que la media de los errores y la de los errores estandarizados estén próximas a cero, la varianza de los errores

estandarizados esté próxima a uno. Se debe esperar además que la nube de correlación entre los valores reales y estimados muestre puntos próximos a la recta central con buena correlación. En el caso de conjuntos de datos con un gran número de muestras no es imprescindible realizar una validación del modelo ajustado, es conveniente detallar la continuidad espacial a pequeñas distancias y el comportamiento del semivariograma en el origen, debido a la propiedad del krigeaje de asignar mayor peso a las muestras más cercanas a la localización o bloque que se desea estimar que a las más distantes. Este proceso de validación puede resultar en algunos casos innecesarios cuando la curva teórica describe exactamente la curva experimental de los semivariogramas (Armstrong y Roth, 1997; Armstrong y Carignan, 1997).

El proceso de análisis estructural culmina cuando se ha obtenido una validación aceptable de acuerdo a los criterios mencionados o un análisis adecuado de la estructura espacial y se dispone del modelo a utilizar en el proceso de estimación o simulación.

3.5. Estimación o Simulación

Una vez obtenido el modelo que describe la variabilidad espacial del fenómeno estudiado, se utiliza éste en el proceso de estimación o simulación.

3.5.1. Estimación

La estimación tiene como objetivo proporcionar en cada punto de la red un valor lo más próximo posible del valor real y desconocido, a través del estimador krigeaje, el cual puede ser implementado de forma puntual o de bloque y exige además del modelo de continuidad espacial una vecindad de búsqueda para evitar un exceso de efecto de pantalla en el krigeaje (Arik, 1990; Schaug et al., 1993). Para el caso que tratamos, estimación de reservas minerales, es suficiente utilizar el Krigeaje Ordinario de bloques, el cual ofrece buenos resultados cuando la información inicial presenta homogeneidad estadística y el espaciamiento entre los datos es del orden de la correlación espacial entre los mismos.

En este proceso se obtiene para cada localización estimada un error de estimación, **la varianza de krigeaje**, como criterio de la certidumbre de la estimación realizada (Armstrong y Carignan, 1997), lo que distingue a este procedimiento de otros métodos de interpolación (Abasov et al., 1990; Haas, 1992; de Fouquet, 1996). Este valor se ha usado frecuentemente para la definición de redes racionales de exploración y clasificación de reservas, criterio que

en muchas ocasiones no ofrece buenos resultados debido a su carácter puramente geométrico, fundamentalmente cuando existe alta variabilidad espacial de las variables estudiadas. Pueden ser utilizados otras variantes de krigeaje (ASCE Task, 1990; Carr, 1995; Myers, 1992; Pan y Arik, 1993), de la Geoestadística no estacionaria, la no Lineal y la Multivariada.

3.5.1.1. Geoestadística Lineal

Los valores estimados en geoestadística lineal se obtienen a partir de una combinación lineal de pesos asociados a los datos disponibles utilizados en el proceso de estimación. Cuando la información presenta característica de estacionaridad evidentes se utilizan los datos originales en la estimación, existiendo las variantes: Krigeaje Simple y Krigeaje Ordinario, las cuales pueden ser implementadas de forma puntual o de bloque. (Armstrong y Carignan, 1997).

3.5.1.2. Geoestadística no Estacionaria

Cuando en el análisis estructural de los datos originales se revela un comportamiento preferencial en alguna dirección, es decir, existe tendencia o deriva en la información, puede obstaculizar los métodos de la Geoestadística Lineal mencionados anteriormente. Es necesario entonces separar la variable en dos componente, $Y(x)$ que representa la parte estacionaria del comportamiento de los datos y $m(x)$ la parte determinística o la deriva, esto es, realizar un análisis de tendencia, donde se logra obtener el semivariograma estacionario sustrayendo a los datos originales la tendencia por el polinomio correspondiente a la deriva presente en los datos. Se utiliza en este caso la variante Krigeaje Universal o Krigeaje con Modelo de Tendencia. (Carr, 1990; Jones y Vecchia, 1993; Chauvet, 1994; Christensen, 1990; Renard, 1998; Maisonneuve, 1998).

3.5.1.3. Geoestadística no Lineal

Cuando los datos originales presentan comportamientos asimétricos, de modo que no se revelan característica de estacionaridad evidentes. Se hace necesario realizar transformaciones en los datos con el objetivo de obtener distribuciones simétricas, y entonces utilizar el krigeaje sobre los datos transformados y finalmente devolver las estimaciones a través de la transformación inversa. Estas variantes pueden ofrecer buenos resultados cuando existen poblaciones de datos con alta asimetría. Las variantes fundamentales utilizadas en este caso son: Krigeaje Lognormal, Krigeaje Multigaussiano, Krigeaje de Indicadores o Krigeaje Disyuntivo (Roth, 1998).

3.5.1.4. Geoestadística Multivariada

Cuando el fenómeno que se estudia está caracterizado por más de una variable, con el mismo o diferente nivel de conocimiento, es posible utilizar éstas de forma conjunta en el proceso de estimación, usando variantes como el Co-Krigeaje. La justificación fundamental para el uso de estos métodos es la falta de conocimiento en algún atributo, por ejemplo, variables no muestreadas suficientemente, variables con escaso nivel de conocimiento con respecto a otras. En estos casos se deben buscar relaciones de correlación entre las variables, de modos que las de mayor conocimiento o variables secundarias contribuyan a la estimación de las de menor conocimiento o variables primarias. (Myers, 1991d; Carr y Mao, 1993; Almeida y Jounel, 1994; Myers, 1991a; Wackernagel, 1994). Este método utiliza además de la autocorrelación, la correlación entre las variables, es decir, los semivariogramas cruzados.

Existen métodos modernos de integración de información que permiten una estimación más precisa, al incluir en el proceso datos con diferente grado de conocimientos, el Krigeaje con Deriva Externa o Co-Krigeaje con Variable Colocalizada. Estos tienen como condición fundamental el conocimiento de las variables secundarias en todas las localizaciones a estimar la primaria o de interés (Myers, 1991c; Zhang et al., 1992; Wackernagel, 1995; D'Agostino y Zelenka, 1992; Pawlowsky et al., 1994; Carr y Myers, 1990).

3.5.2. Simulación

En la estimación, cualquiera sea el interpolador utilizado, se obtiene una imagen suave o lisa de la realidad que se modela. Con el objetivo de lograr una representación que muestre las fluctuaciones existentes en la realidad se propone la Simulación Geoestadística. La simulación proporciona una de las posibles realizaciones que pueden ser representativas de la realidad. Esta se obtiene a partir de las características de dispersión del fenómeno real reveladas de la información disponible (Lantuéjoul, 1997 y 1998; Rivoirard, 1998). Ahora, es digno destacar que en cada localización el valor simulado $Z_S(x)$ no es el mejor valor estimado de $Z(x)$ que se puede obtener, por lo que para la estimación de reservas minerales el valor utilizado debe ser el estimado o el promedio de un número grande de simulaciones (Lantuéjoul, 1997; Cuador et al., 2000).

3.5.2.1. Simulación Condicional

El desarrollo de este procedimiento incluye, primero, la generación de valores con iguales características de variabilidad y correlación espacial que las obtenidas de los datos originales

en el proceso de análisis estructural, esto es una simulación no condicional (Quintero et al., 2000). Los valores simulados de esta forma son posteriormente condicionados a los datos reales. Este proceso en la generalidad de los sistemas se desarrolla de forma conjunta, permitiendo obtener una de las realizaciones del fenómeno real, de la cual, la realidad desconocida también es considerada una realización.

3.6. Tratamiento de los resultados geoestadísticos

En esta última etapa se utilizan los resultados de las estimaciones obtenidas del procesamiento Geoestadístico, ya sea de forma puntual o de bloque, con diferentes fines, en el campo de las geociencias. (Chica, 1989; Armstrong y Carignan, 1997).

3.6.1. Estimación de reservas

Los resultados del procesamiento geoestadístico en la actividad geólogo - minera son utilizados fundamentalmente en el cálculo de las reservas “in-situ” de minerales. Se realiza primero una evaluación a escala local, es decir, se multiplica el volumen de cada bloque de estimación por la masa volumétrica correspondiente, obteniéndose el tonelaje. Este resultado se multiplica por el contenido medio estimado en el bloque, lo cual da la cantidad de componente útil. Posteriormente se puede realizar la evaluación global del depósito sobre la base de los resultados locales. En este procedimiento se revela significativamente la importancia de las estimaciones geoestadísticas en la elevación de la calidad de la estimación de reservas para la toma de decisiones mineras. (Chica, 1989; Rivoirard y Guiblin, 1997).

3.6.2. Mapas de isovalores

En todos los campos de las geociencias, los resultados geoestadísticos permiten la confección de mapas de isovalores, que reflejan el comportamiento espacial o tendencia de las variables estudiadas.

Es importante plantear que como resultados del procesamiento geoestadístico, se obtiene la varianza de krigeaje. Este valor que depende del modelo de continuidad espacial obtenido, de la configuración espacial de los datos y de tamaño del bloque de estimación, puede ser utilizado cuidadosamente cuando existe continuidad espacial evidente con dos fines fundamentales: La categorización de reservas y la definición de redes de muestreo. No se recomienda su uso cuando existe alta variabilidad en los parámetros estudiados.

3.6.3. Categorización de reservas

En la categorización de las reservas los bloques que presenten valores bajos de varianza de krigeaje, pueden ser clasificados en una categoría superior respecto a los que presentan valores altos. Se acostumbra utilizar como criterio un valor adimensional o error porcentual resultado de dividir para cada bloque procesado la desviación estándar de la varianza de krigeaje entre el valor estimado. Algunos autores asumen para este criterio un valor límite igual al error porcentual permisible para que las reservas puedan ser clasificadas como probadas, otros toman valores límites a partir de la experiencia práctica en el estudio de diferentes yacimientos (Chica, 2002). Este criterio debe ser cuidadosamente tratado, como ya fue planteado, debido a que tiene un carácter puramente geométrico y conduce a la falsa idea de que la geoestadística puede contribuir directamente a la clasificación de reservas. Se puede plantear que el uso de este criterio no es definitorio, sino que puede ser utilizado conjuntamente con otros criterios geológicos expuestos en las normas de clasificación establecidas al efecto (ONU, 1996; ONRM, 1999).

3.6.4. Optimización de redes

La presencia de valores altos de varianza de krigeaje puede indicar zonas de mayor desconocimiento e indicar los futuros puntos de muestreo, este aspecto puede ser utilizado en la definición de redes óptimas de muestreo. Para una unidad de selección minera dada y a partir del modelo de continuidad obtenido de un nivel de información inicial, es posible encontrar el espaciamiento de la red que garantiza valores inferiores al error porcentual de estimación, el cual debe ser tomado a partir de las características propias de cada yacimiento. De esta forma establecer una red adecuada para la exploración, que puede ser extendida a yacimientos con característica geológicas similares. Ahora, por el carácter puramente geométrico de este criterio, debe ser utilizado cuidadosamente y no como definitorio, fundamentalmente cuando los parámetros estudiados presentan alta variabilidad espacial. (Armstrong y Roth, 1997)

3.7. Sistemas para el procesamiento geoestadístico

Para el procesamiento geoestadístico es imprescindible el uso de sistemas automatizados, debido a la gran cantidad de cálculos que se realizan y al volumen de datos que se almacenan. Los pasos presentados previamente pueden ser ejecutados en cualquier sistema disponible para el modelaje geológico y procesamiento geoestadístico o geomatemático, dependiendo de las posibilidades que se ofrecen en éstos. Existen sistemas profesionales que, en ocasiones,

ofrecen posibilidades limitadas para profesionales no entrenados en el tema. Los sistemas de dominio público de más amplia difusión en Cuba, que pueden ser utilizados para el procesamiento Geoestadístico son:

VarioWin: Puede ser utilizado para la realización del análisis estructural en dos dimensiones, ofreciendo facilidades para el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste de modelos teóricos. Está limitado por la cantidad de datos de entrada. (Pannatier, 1993).

Surfer: Puede ser utilizado para la realización del análisis estructural, la estimación por krigeaje en dos dimensiones, facilita la visualización gráfica de los resultados. (Surfer v7.0, 1999).

Geostatistical Library, GsLib: Puede ser utilizado para el procesamiento Geoestadístico integral, fundamentalmente en el proceso de análisis estructural, la estimación por krigeaje puntual y de bloque en las variantes más usada actualmente y la simulación geoestadística. No posee ambiente visual para el procesamiento y no ofrece posibilidades para el modelaje de cuerpos geológicos, hecho por el cual puede ser erróneamente rechazado por los especialistas de las geociencias, A pesar de lo anterior la GsLib ofrece en el procesamiento ventajas superiores a los sistemas geólogo mineros más populares en la actualidad. La filosofía de trabajo de este sistema se concentra en la definición ficheros de entrada, la ejecución del programa ejecutable y la interpretación de los resultados de ficheros de salida, resultados que pueden ser visualizados con aplicaciones propias de la GsLib o auxiliándose de otros sistemas. (Deutsch y Journel, 1998)

3.8. Conclusiones del capítulo.

Los pasos presentados para la aplicación de la geoestadística, son resultado del análisis bibliográfico realizado para el desarrollo de nuestro trabajo de investigación y la experiencia obtenida en la solución de casos prácticos reales.

Es importante destacar que el aporte fundamental que hace la geoestadística, es la estimación de variables geólogo - mineras a partir de las características estructurales de la información de exploración, es decir, de sus características de variabilidad y correlación espacial. Estas características son obtenidas o reveladas a partir de la información disponible con la herramienta fundamental, el cálculo de los semivariogramas experimentales al que se ajustan modelos teóricos autorizados. Este último elemento es utilizado posteriormente en el proceso de estimación, lo que se hace en correspondencia con el modelo geológico que se presentan en los diferentes casos particulares.

Los pasos presentados en este capítulo deben ser realizados en el orden de los epígrafes, y a su vez en los subepígrafes correspondientes. Estos últimos, dependiendo de los problemas prácticos en cuestión se utilizan conjuntamente e indistintamente para cumplir con los objetivos de los pasos 3.3. Conocimiento del problema, 3.4. Análisis estructural y 3.5. Estimación o Simulación, para finalmente obtener los resultados deseados según el epígrafe 3.6.

Las referencias citadas permiten profundizar de forma teórica y práctica en los elementos tratados. En el Apéndice II se presentan los conceptos fundamentales de la geoestadística aplicada que en unión a los aspectos discutidos en este capítulo puede constituir una guía útil para el desarrollo de aplicaciones geoestadísticas en la actividad geólogo - minera y en el campo de las geociencias en general.

Capítulo IV. Aplicación de métodos geoestadísticos para la caracterización de parámetros geólogo - industriales de algunos bloques del yacimiento laterítico ferroniquelífero Punta Gorda

4.1. Introducción

Con el fin de mostrar la aplicación de los elementos teóricos discutidos en el capítulo anterior, se presenta aquí un estudio Geoestadístico de algunos bloques del yacimiento laterítico ferroniquelífero Punta Gorda, noreste de la provincia de Holguín. El objetivo del estudio es la estimación y caracterización de reservas minerales *in situ* de los contenidos de hierro, níquel y cobalto. Para lo cual se desarrolla un análisis de la información, corrección de la base de datos en formato digital, el análisis de la estadística básica, un detallado análisis de las características de continuidad espacial de los contenidos estudiados, y la estimación de reservas usando el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques. Se desarrolla el estudio sobre los Bloques O-53, O-54, O-55, P-53, P-54 y P-55 con un soporte de datos que contenga las muestras de las zonas de escombros superior y mineralizada, es decir, las que contienen la Laterita y la Serpentina de Balance, obteniéndose para éstos los modelos que describen la variabilidad y correlación espacial de los contenidos de los elementos analizados: Fe, Ni y Co. La estimación se realiza sobre un modelo geométrico tridimensional que incluye un modelo de capas y otro de bloques, fraccionado en bloques de dimensiones $8.33 \times 8.33 \text{ m}^2$ y $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$, respectivamente, para cada zona analizada. Las dimensiones horizontales de los bloques son aproximadamente una cuarta parte de la distancia entre las perforaciones de la red de exploración detallada de $33.33 \times 33.33 \text{ m}$. Se obtienen las reservas estimadas tanto de forma global como local.

Además es realizada, una caracterización de la varianza de krigeaje para comprobar las posibilidades que ofrece al valorar la certidumbre de las estimaciones. Se desarrollan estudios de comprobación de las estimaciones sobre la información aportada por el bloque O48 del mismo yacimiento Punta Gorda, explorado en una red de $8.33 \times 8.33 \text{ m}$, utilizando los datos en las redes de $33.33 \times 33.33 \text{ m}$ y $16.67 \times 16.67 \text{ m}$ para estimar bloques de $8.33 \times 8.33 \text{ m}$ y comparar con los valores de la red de $8.33 \times 8.33 \text{ m}$ a través de dos criterios: el error porcentual que incluye la varianza de krigeaje y el error real de las estimaciones.

4.2. Geología de la región y del yacimiento

En el capítulo II se hace referencia a todos los elementos que permiten establecer el modelo geológico del yacimiento en el área de estudio y tener ideas de las posibles características de variabilidad natural de los parámetros geólogo - industriales en este yacimiento. Es posible plantear aquí a manera de resumen que el yacimiento estudiado se ubica sobre rocas máfico – ultramáficas del complejo cumulativo ultramáfico de la asociación ofiolítica, la cual se encuentra cabalgada sobre formaciones vulcanogénicas del Cretácico Inferior y son sobreyacidos por formaciones terciarias terrígeno - sedimentarias correspondientes a cuencas superpuestas. Estos elementos muestran que estamos en presencia de yacimientos extremadamente complejos tanto en su geometría tridimensional como en la variabilidad espacial de sus parámetros.

4.3. Presentación de los datos

El estudio se realiza sobre los Bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 por solicitud de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. La información de exploración en estos bloques está formada por 478 pozos de perforación distribuidos en una red de 33.33x33.33 m (figura 4.1), que contiene 8177 muestras. La profundidad promedio de los pozos es de 16.81 m, oscilando de 2.30 m a 33.00 m, con una desviación estándar de 5.44 m, lo que es un índice de la variabilidad de este parámetro y del contacto con la roca madre. Las variables estudiadas son los contenidos de hierro (Fe), níquel (Ni) y cobalto (Co). Fue creada, organizada y verificada la base de datos con la información correspondiente a estos bloques a partir de la información digital obtenida de la empresa.

4.5. Regularización de la información

En Geoestadística, como hemos visto, se debe trabajar con valores regularizados en un mismo soporte, o sea, que las muestras tengan la misma longitud. Para el caso del yacimiento Punta Gorda y en particular en los bloques estudiados, la mayor parte de las muestras poseen 1m de longitud, representando éstas el 95% del total, se decide entonces utilizar los datos en su forma original para el procesamiento tridimensional. En el caso del estudio a desarrollar en dos dimensiones se tomaron los compósitos o valores medios ponderados por cada pozo en las zonas de escombros superior y zona mineralizada.

4.6. Análisis exploratorio de datos

Antes de comenzar el análisis exploratorio de datos y con el objetivo de conocer

detalladamente la información a procesar, se estudiaron y analizaron las características geológicas del yacimiento, su génesis, el modelo geológico de forma general, lo que permitió advertir sobre la posible variabilidad natural de los contenidos a estudiar. Esto fue posible a partir de los resultados sobre las condiciones de formación de los yacimientos en corteza de intemperismo cubano y en particular sobre el yacimiento en estudio, obtenidos por otros autores, como se describe en el capítulo anterior.

En el procesamiento estadístico se calcularon las medidas de tendencia central y medidas de dispersión fundamentales: media, mediana, valor mínimo y máximo, rango, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría y curtosis; para todas las variables estudiadas y en cada zona analizada, las cuales se muestran en las tablas 4.1 y 4.2 para la zona de escombros superior y mineralizada, respectivamente.

Tabla 4.1. Estadística descriptiva de la zona de escombros superior.

	Ni	Fe	Co
No. de muestras	5206	5206	5206
Media	0.452	39.418	0.059
Mediana	0.420	43.300	0.038
Mínimo	0.020	2.300	0.003
Máximo	1.700	56.000	0.620
Rango	1.680	53.700	0.617
Varianza	0.054	128.020	0.003
Desviación estándar	0.233	11.315	0.059
Coeficiente de variación	0.516	0.287	0.995
Coeficiente de asimetría	0.623	-1.562	2.499
Curtosis	0.136	1.703	10.572

Tabla 4.2. Estadística descriptiva de la zona mineralizada.

	Ni	Fe	Co
No. de muestras	2453	2453	2453
Media	1.278	37.842	0.106
Mediana	1.240	41.200	0.096
Mínimo	0.090	4.500	0.002
Máximo	4.420	55.000	0.620
Rango	4.330	50.500	0.618
Varianza	0.110	112.147	0.004
Desviación estándar	0.332	10.590	0.063
Coeficiente de variación	0.259	0.280	0.595
Coeficiente de asimetría	1.310	-0.844	2.276
Curtosis	6.431	-0.396	11.100

En las tablas 4.1 y 4.2 se puede constatar, para todas las variables analizadas, que la media y la mediana presentan valores similares; se observan distribuciones unas veces asimétricas

positivas, otras negativas y más bien leptocúrticas, es decir, mucho más apuntadas que la distribución normal. En todos los casos los coeficientes de variación son menores que 1, aspecto éste para el cual se justifica la utilización de técnicas geoestadísticas lineales que producen resultados aceptables.

En las figuras 4.2 y 4.3 se presentan los histogramas de frecuencias absolutas calculados para las variables Fe, Ni y Co, en las zonas de escombros superior y mineralizada, respectivamente; en los mismos se muestra de forma más detallada el comportamiento de los contenidos estudiados.

Se observan distribuciones unimodales; quizás en algunos casos se pudiera pensar en la existencia de dos poblaciones (distribución bimodal). Profundizando en el análisis se hicieron divisiones en los datos para obtener nuevos histogramas, cuyas distribuciones de frecuencias continuaron mostrando las mismas características que la de los datos sin dividir. No se observan valores extremos que pudieran influir negativamente en el cálculo de los semivariogramas a desarrollar posteriormente. Estas cuestiones fundamentan que aunque estamos en presencia de contenidos muy variables propios de los yacimientos lateríticos en cortezas de intemperismo existe homogeneidad estadística en los datos. El procedimiento anterior también se desarrolló en el análisis de variografía, donde los semivariogramas continuaron mostrando el mismo comportamiento espacial que el de los datos sin dividir.

A partir de la cantidad de muestras utilizadas en el procesamiento, la inexistencia de heterogeneidad estadística y considerando el Teorema Central del Límite (Isaaks y Srivastava, 1989; Walpole y Myers, 1996; Clark, 2002) se puede asumir normalidad en la información, que conlleva al cumplimiento de las hipótesis de estacionaridad, por lo que se justifica la aplicación de técnicas geoestadísticas.

En las tablas 4.3 y 4.4 se presentan las matrices de correlación para la zona de escombros superior y mineralizada, respectivamente, donde se observa que no existen valores altos de correlación entre las leyes de las variables estudiadas, esto no justifica la aplicación de procedimientos de estimación que incluyan varias variables, lo que además resultaría innecesario al conocerse los valores de los contenidos estudiados para todas las muestras.

Tabla 4.3. Matriz de correlación en la zona de escombros superior.

	Ni	Fe	Co
Ni	1.00		
Fe	0.30	1.00	
Co	0.52	0.14	1.00

Tabla 4.4. Matriz de correlación en la zona mineralizada.

	Ni	Fe	Co
Ni	1.00		
Fe	-0.13	1.00	
Co	-0.11	0.59	1.00

De lo antes expuesto se puede apreciar que la información presenta homogeneidad estadística, que en términos geoestadísticos se traduce como que existe estacionaridad, con lo cual se obtienen los mejores resultados posibles mediante la aplicación de la Geoestadística Lineal a partir del nivel de información que se posee.

4.7. Análisis estructural

El objetivo del análisis estructural, como hemos discutido, es obtener un modelo que represente fielmente las características de variabilidad y correlación espacial de la información, para lo cual primero se realiza el cálculo de los semivariogramas experimentales y posteriormente el ajuste de modelos teóricos autorizados.

4.7.1. Cálculo de los semivariogramas experimentales

Para el cálculo de los semivariogramas experimentales se utilizó un incremento o paso de 33.33 m que coincide con el espaciamiento entre pozos en la red de exploración detallada, la tolerancia lineal fue la mitad del incremento inicial y el cálculo se realiza hasta aproximadamente la mitad de la mayor dimensión de la zona estudiada, incluyendo 12 puntos en el semivariograma.

Inicialmente se calcularon los semivariogramas medios, que como se ha discutido, tienen tolerancia angular de 90°, éstos como incluyen mayor cantidad de pares, representan una idea inicial de la variabilidad espacial de los atributos estudiados. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra el aspecto de los semivariogramas medios calculados para las variables en estudio, donde se puede observar una estructura definida en todos los casos. Es de notar la alta variabilidad de todas las variables estudiadas, lo que se manifiesta por el alto valor alcanzado en los primeros puntos de los semivariogramas, que representan un alto por ciento de la varianza de los datos.

Como los semivariogramas medios calculados no tienen en cuenta la variabilidad en las diferentes direcciones del espacio, se procede a realizar un análisis de anisotropía. Este análisis como se ha discutido debe ser realizado primero para la dirección vertical y posteriormente en el plano de la mineralización.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran los semivariogramas verticales para cada variable y zona estudiada, los cuales fueron calculados usando 1 m de incremento que coincide con el tamaño de las muestras, una tolerancia lineal igual a la mitad del incremento inicial, acimut 0° e inclinación 90° , con tolerancias y ancho de bandas pequeños, con el objetivo de concentrar el análisis en la variabilidad vertical. Estos semivariogramas fueron calculados hasta 15 puntos, aproximadamente la longitud promedio de los pozos: 16.81 m. Se considera que hasta la mitad de esta distancia, 8 m, tiene mayor significación la variabilidad vertical.

Para el análisis de anisotropía en el plano de la mineralización partimos de que los semivariogramas de volumen no tendrían efecto, dado por las características de la mineralización de corteza de intemperismo, que representa una capa fina sobre la roca madre. Se calcularon los semivariogramas en diferentes direcciones del espacio para cada variable estudiada y para cada zona, exactamente cada 22.5° desde 0° hasta 180° , con tolerancia angular de 22.5° y ancho de banda 135 m. Las figuras 4.8 y 4.9 muestran los semivariogramas direccionales en cada caso.

Es de notar que los semivariogramas direccionales no presentan grandes diferencias entre sí e incluso ni con el semivariograma medio u omnidireccional y que para cortas distancias, es decir, hasta 100 m o 200 m, muestran un comportamiento similar. Por este motivo se decide realizar el ajuste de modelos teóricos al semivariograma medio y al obtenido según la dirección vertical. Se debe destacar que los semivariogramas verticales muestran un comportamiento continuo con crecimiento exponencial hasta aproximadamente la distancia de 8 m, lo que concuerda con la consideración de que hasta esta distancia son significativos, mostrando que la variabilidad espacial en la dirección vertical no presenta un valor alto de efecto de pepita. Esto induce a plantear que existe una continuidad espacial de todos los contenidos según esta dirección. Por otro lado los semivariogramas horizontales muestran una alta variabilidad en los contenidos estudiados, lo cual se aprecia en su tendencia a cortar el eje $G(h)$ en un alto por ciento con respecto a la varianza de los datos. Esta se representa por la

línea horizontal que se observa en las figuras 4.8 y 4.9. Este razonamiento es importante para el ajuste de modelos teóricos, porque es la variabilidad espacial en la dirección vertical la que determina la existencia o no de un valor de efecto de pepita en el modelado de los semivariogramas.

4.7.2. Ajuste de modelos teóricos

Como hemos dicho el ajuste de modelos teóricos se desarrolla sobre el semivariograma vertical y el omnidireccional en cada caso, los cuales están formados en su totalidad por estructuras imbricadas. Los ajustes pueden ser observados en las figuras 4.10 y 4.11 para las variables y zonas estudiadas en el tratamiento tridimensional. En las tablas 4.5 y 4.6 se muestran los modelos obtenidos.

Tabla 4.5. Parámetros ajustados a los semivariogramas, zona de escombros superior.

Variable	Estructura	Meseta	Alcance horizontal	Alcance vertical
Níquel	Efecto de pepita	0.005	-	-
	Exponencial	0.040	20	14
	Esférico	0.012	650	6
Hierro	Efecto de pepita	5	-	-
	Exponencial	92	30	15
	Esférico	31	500	8.2
Cobalto	Efecto de pepita	0.0001	-	-
	Exponencial	0.0032	30	12
	Esférico	0.0012	700	10

Tabla 4.6. Parámetros ajustados a los semivariogramas, zona mineralizada.

Variable	Estructura	Meseta	Alcance horizontal	Alcance vertical
Níquel	Efecto de pepita	0.010	-	-
	Exponencial	0.075	20	36.6
	Esférico	0.042	560	2.4
Hierro	Efecto de pepita	6	-	-
	Exponencial	92	28	15.2
	Esférico	30	780	5.8
Cobalto	Efecto de pepita	0.00030	-	-
	Exponencial	0.00345	22	9
	Esférico	0.00052	650	6

Los modelos presentados anteriormente pueden ser escritos de forma analítica considerando la ecuación: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = C_0 + C_1 \text{Modelo}(a_x, a_y, a_z) + C_2 \text{Modelo}(a_x, a_y, a_z) + \dots$

donde: C_0 es el valor del efecto de pepita, C_i el valor de la meseta que se corresponde con un modelo teórico con sus alcances en las direcciones del espacio tridimensional.

Los modelos obtenidos se presentan a continuación en forma analítica:

- Zona de escombros superior:

Níquel: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.005 + 0.040 \text{ Exp}(20, 20, 14) + 0.012 \text{ Sph}(650, 650, 6)$

Hierro: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 5 + 92 \text{ Exp}(30, 30, 15) + 31 \text{ Sph}(500, 500, 8.2)$

Cobalto: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.0001 + 0.0032 \text{ Exp}(30, 30, 12) + 0.0012 \text{ Sph}(700, 700, 10)$

- Zona mineralizada:

Níquel: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.010 + 0.075 \text{ Exp}(20, 20, 36.6) + 0.042 \text{ Sph}(560, 560, 2.4)$

Hierro: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 6 + 92 \text{ Exp}(28, 28, 15.2) + 30 \text{ Sph}(780, 780, 5.8)$

Cobalto: $\gamma(h_x, h_y, h_z) = 0.00030 + 0.00345 \text{ Exp}(22, 22, 9) + 0.00052 \text{ Sph}(650, 650, 6)$

Los modelos ajustados utilizando los compósitos por pozos en cada zona para el tratamiento bidimensional se presentan a continuación:

- Zona escombros superior:

Níquel: $0.012 \text{ Exp}(9) + 0.010 \text{ Sph}(500)$

Hierro: $35 \text{ Exp}(16) + 15 \text{ Exp}(90) + 12 \text{ Sph}(580)$

Cobalto: $0.00100 \text{ Exp}(12) + 0.00035 \text{ Exp}(120)$

- Zona mineralizada:

Níquel: $0.047 \text{ Exp}(12) + 0.034 \text{ Sph}(580)$

Hierro: $56 \text{ Exp}(12) + 8 \text{ Exp}(30) + 14 \text{ Sph}(600)$

Cobalto: $0.00175 \text{ Exp}(10) + 0.00025 \text{ Sph}(200)$

Estos modelos fueron validados, reportándose criterios aceptables en cada caso, coincidiendo con el hecho de que las curvas teóricas describen lo mejor posible las curvas experimentales de los semivariogramas, para lo cual cualquier variación sensible en los ajustes realizados no afecta significativamente los resultados de las estimaciones correspondientes.

4.8. Estimación

Después de obtenidos los modelos que representan la continuidad espacial de las variables estudiadas, se procede a la estimación de las mismas por el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques. Para esto se desarrolló un modelo de capas con bloques de dimensiones $8.33 \times 8.33 \text{ m}^2$, y un modelo de bloques con bloques de dimensiones de $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$, aún cuando el caso de estudio de esta investigación es, como se conoce, un yacimiento en corteza de intemperismo con dimensiones a través del estrato muy superiores a su potencia media, que

podiese sólo ser estudiado con un modelo de capa. En cada modelo geométrico la estimación de todas las variables se realiza para un mismo soporte, los cuales responden a los intereses de la Empresa Comandante Che Guevara. Para este proceso fue necesario modelar las zonas de interés haciendo una interpretación de la información aportada en los pozos de perforación, lo que permitió crear el modelo geométrico de la mineralización y posteriormente aplicar el control geológico, es decir, determinar qué bloques de la talla deseada se encuentran dentro de cada zona. Se debe señalar que a partir de los modelos obtenidos, es posible hacer estimaciones para cualquier configuración y variable, atendiendo a las exigencias de la selectividad minera (Lantuéjoul, 1994). Para la realización de los modelos geológicos descritos se utilizó el sistema MicroLYNX (Lynx mining systems, 1998).

4.8.1. Modelo geométrico tridimensional de los bloques estudiados

Para construir el modelo geométrico de los bloques estudiados del yacimiento Punta Gorda a través del modelo de capas y el modelo de bloques, fue necesario definir 18 perfiles en la dirección oeste – este y digitalizar en éstos las capas de escombros superior y mineralizada. Para ello se usó el sistema de modelaje geológico MicroLynx a partir de la información que presentan los pozos de cada perfil, (puede ser utilizado cualquier otro sistema que permita estas facilidades). Es importante señalar que se digitalizaron dos tipos tecnológicos: zonas de escombros superior y zona mineralizada, atendiendo a intereses prácticos de la explotación y de la empresa. En el proceso de digitalización y correlación entre pozos de cada capa se tuvieron en cuenta los criterios presentados en Lavaut, (1983) para la composición por menas en el cálculo de reservas de lateritas. Las figuras 4.12 y 4.13 muestran el modelo geométrico tridimensional obtenido para el modelo de capas y el modelo de bloques, respectivamente.

4.9. Cálculo de las reservas

Las estimaciones realizadas permitieron obtener las reservas para cada variable estudiada, las cuales se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Reservas estimadas de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55.

Zona	Tonelaje (ton)	Ley media (%)			Cantidad de metal (ton)		
		Ni	Fe	Co	Ni	Fe	Co
Escombros superior	9 200 000	0.47	39.42	0.058	42 000	3 600 000	5 700
Mineralizada	2 600 000	1.25	35.85	0.102	33 000	960 000	29 000

La figura 4.14 (a y b) muestra algunos perfiles y planos de las estimaciones para la variable níquel como ejemplo, obtenidas sobre los modelos geométricos.

4.10. Comprobación de las estimaciones obtenidas

Con el objetivo de comprobar la calidad de las estimaciones obtenidas, teniendo en cuenta la alta variabilidad de los contenidos estudiados, se procedió a aplicar el procedimiento desarrollado anteriormente sobre el bloque O48 del propio yacimiento.

4.11. Caracterización del bloque O48

El bloque O48 fue explorado en una red de 8.33x8.33 m, por lo que la información de exploración geológica existente en este bloque brinda la posibilidad de realizar comprobaciones de las estimaciones. Es posible realizar las estimaciones con los datos correspondientes a las redes de 33.33x33.33 m y 16.67x16.67 m y comparar los resultados con los datos de la red de 8.33x8.33 m.

El bloque presenta de forma general iguales características de formación geológica que los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 estudiados en este capítulo, así como similar comportamiento en la variabilidad espacial, aún cuando se encuentren situados en diferentes dominios geológicos, definidos por Vera (2001).

Se realizó un modelo geométrico tridimensional de este bloque, obteniéndose el modelo de capas y el modelo de bloques correspondiente (figura 4.15), con un soporte de estimación de $8.33 \times 8.33 \text{ m}^2$ y $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$, respectivamente, similar al realizado anteriormente. Estos soportes de estimación coinciden con la red de exploración de 8.33x8.33 m, permitiendo la comparación de los valores reales y estimados.

Antes de proceder a la estimación se desarrolló el proceso de análisis exploratorio de datos y análisis estructural, utilizando los compósitos de los datos en correspondencia con los modelos geométricos tridimensionales realizados sobre los contenidos de níquel, utilizada como ejemplo por ser la de interés fundamental. La estadística básica de esta variable muestra homogeneidad en el comportamiento de la misma, presentando valores próximos de la media y la mediana 1.29 y 1.27, respectivamente. El coeficiente de variación es de 0.14 y no se observan valores extremos. Se obtuvieron las características de continuidad espacial de esta variable a utilizar en la estimación, para la que se consideró un comportamiento isotrópico en

la dirección horizontal, aspecto que coincide con los modelos obtenidos en los bloques estudiados anteriormente.

El modelo de variabilidad espacial obtenido para el níquel en la red de 33.33x33.33 m se describe de forma analítica a través de las siguientes expresiones:

Para el tratamiento tridimensional:

Semivariograma vertical: $G(h) = 0.03 + 0.09 \text{ Sph}(7.2) + 0.01 \text{ Sph}(30)$

Semivariograma horizontal: $G(h) = 0.03 + 0.09 \text{ Sph}(35) + 0.01 \text{ Sph}(180)$

donde: 0.03 representa el efecto de pepita, $0.09 \%^2$ la meseta del primer modelo Sph (Sph: Modelo Esférico, ver Apéndice I) y $0.01 \%^2$ es la meseta del segundo modelo Sph. Cada modelo tiene como argumentos los alcances. Para el semivariograma vertical 7.2 m y 30 m para la primera y segunda estructura, respectivamente, para el horizontal 35 m y 180 m, en este caso como el fenómeno es considerado como isotrópico en el plano de la mineralización se considera el mismo alcance para todas las direcciones posibles. Este análisis es el mismo para cada expresión escrita de forma analítica con los correspondientes valores de: **efecto de pepita, mesetas, modelos y alcances**, obtenidos en el proceso de ajuste de modelos teóricos al semivariograma experimental.

Para el tratamiento bidimensional: $G(h) = 0.0034 + 0.02 \text{ Sph}(40) + 0.003 \text{ Sph}(180)$

Como resultados de la estimación en el modelo de capas y el modelo de bloques, se obtiene el gráfico de dispersión mostrado en la figura 4.16 (a) y (b), respectivamente.

De lo anterior se puede apreciar que debido a la alta variabilidad de los contenidos de níquel en estos yacimientos lateríticos, no es posible obtener buenas estimaciones en las reservas utilizando la red actual de 33.33x33.33 m, si utilizamos en la comparación los valores de las variables medidas en el pozo central como representativos. De donde se desprenden algunas reflexiones importantes:

- a) La falta de correlación espacial entre las muestras a pequeñas distancia en el plano de la mineralización indica el grado de independencia entre éstas, por lo que no es posible realizar una adecuada estimación de los recursos.
- b) Los valores asignados a los bloques de estimación a partir del pozo central, no son representativos de los mismos.

Los elementos anteriores pueden ser explicados a partir de la falta de control geológico, es decir, el espaciamiento entre las muestras en la dirección horizontal es superior a la distancia de correlación espacial de los datos experimentales y a la variabilidad natural de los contenidos presentes en estos yacimientos.

Utilizando ahora la red de 16.67x16.67 m se obtienen los siguientes resultados en la estimación. El modelo estructural utilizado es:

Para el tratamiento tridimensional:

Semivariograma vertical: $G(h) = 0.02 + 0.08 \text{ Sph}(9.0) + 0.04 \text{ Sph}(12.0)$

Semivariograma horizontal: $G(h) = 0.02 + 0.08 \text{ Sph}(20) + 0.04 \text{ Sph}(50)$

Para el tratamiento bidimensional: $G(h) = 0.004 + 0.020 \text{ Sph}(20) + 0.008 \text{ Sph}(100)$

Los resultados de las estimaciones y comparación para el modelo de bloques y el modelo de capas, se presentan en la figura 4.16 (c y d), respectivamente. Es esta figura se puede apreciar que mejoran las estimaciones, pero no lo suficiente, pues las correlaciones siguen siendo bajas, lo cual se ratifica en la dispersión que se observa en los gráficos. Además, no se puede asegurar que un alto por ciento de los bloques sea estimado con un error inferior al 10% para dimensiones de 8.33x8.33 m². Todo lo cual constituye una premisa indispensable de la necesidad que existe de realizar estudios de redes racionales en función de la unidad de selección mineral a utilizar.

4.12. Posibilidades del uso de la varianza de krigeaje en yacimientos lateríticos

A partir de los resultados anteriores y advertidos de la variabilidad espacial obtenida, se decide evaluar las posibilidades que ofrece la varianza de krigeaje para caracterizar la certidumbre de las estimaciones realizadas y para la definición de redes racionales de exploración.

Uno de los criterios que más se usa en la literatura consultada como medida de la certidumbre de las estimaciones realizadas por el krigeaje es el cociente de la desviación estándar de la varianza de krigeaje entre el valor estimado, para cada bloque procesado, esto es σ_k^*/Z_k^* , (Chica, 1987). Este criterio ha reportado resultados en yacimientos con continuidad en la mineralización a gran escala y ha sido usado en la definición de redes racionales de exploración, incluso en yacimientos lateríticos cubanos (Vera, 2001). En este último trabajo se asumen reservas determinadas en categoría de probadas con un valor inferior al 10% por este criterio, con lo que se discrepa, debido a la alta variabilidad espacial presente en los

contenidos estudiados en el caso particular del yacimiento analizado, es importante probar las bondades de usar este criterio. La varianza de krigeaje es una medida de la certidumbre de las estimaciones que tiene un carácter puramente geométrico, es decir, es relativa a la configuración espacial de los datos y a la variabilidad de éstos (Journel y Huijbregts, 1978; Krajewski y Gibbs, 1993; Armstrong y Carignan, 1997; Deutsch y Journel, 1998), pero no tiene en cuenta los valores de los datos usados en la estimación. Por esto es importante comparar los valores del criterio antes mencionado con los errores permisibles por la Empresa Ernesto Che Guevara. Como el bloque O48 del yacimiento en estudio, ofrece información en una red de 8.33x8.33 m, es posible utilizar los datos de las redes de 33.33x33.33 m y 16.67x16.67 m para estimar a partir de éstas bloques con dimensiones que coincidan con la red de mayor conocimiento (la red de 8.33x8.33 m). De este modo se comparan los valores reales con los estimados usando dos criterios: el error porcentual que ofrece la Geoestadística a través de la varianza de krigeaje y el error permisible por la Empresa dado por la siguiente expresión: $Abs(Z^* - Z^R)/Z^*$, donde Abs es el valor absoluto, Z^* es el valor estimado y Z^R es el valor real. Antes de pasar a la comparación de los resultados de aplicar los dos criterios mencionados es importante realizar el análisis exploratorio de datos y de variabilidad de las variables a procesar en este bloque.

4.13. Estadística básica de la información del bloque O48

Se tomaron para el estudio de comprobación de las estimaciones los compósitos calculados para la zona mineralizada de las variables níquel y potencia, por resultar éstas los parámetros de menor y mayor variabilidad en esta investigación, así como en estudios realizados por otros autores (Legrá, 1999; Vera, 2001). La estadística básica de las variables se presenta a continuación en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Estadística básica de las variables potencia mineral y níquel, bloque O48.

	Potencia	Níquel
No. de muestras	1262	1262
Media	14.104	1.296
Mediana	14.000	1.274
Mínimo	1.000	33.000
Máximo	0.828	2.311
Rango	32.000	1.483
Varianza	28.722	0.032
Desviación estándar	5.359	0.178
Coeficiente de variación	0.380	0.138
Coeficiente de asimetría.	0.122	-0.325
Curtosis	0.969	2.149

Los histogramas de frecuencias absolutas calculados (figura 4.17) muestran el comportamiento de los contenidos tratados. No se observan valores extremos que puedan afectar la realización del análisis estructural ni en el proceso de estimación al sobrestimar o subestimar las correspondientes zonas.

4.14. Cálculo y ajuste de modelos teóricos de semivariogramas

Los semivariogramas calculados en las diferentes direcciones del contenido de níquel no muestran grandes diferencias, lo que permite considerar un comportamiento isotrópico, que coincide con la naturaleza geológica del fenómeno del intemperismo y las observaciones locales en cortes naturales (afloramientos), hecho éste que puede ser observado en los mapas de modelado por litología y por mena del capítulo II (figuras 2.5 y 2.6). Se decide entonces utilizar los semivariogramas omnidireccionales, destacándose nuevamente la alta variabilidad presente dado por el alto valor del semivariograma que se alcanza para pequeñas distancias.

Los semivariogramas en las diferentes redes no presentan diferencias significativas en el comportamiento de la variabilidad usando la información de las redes de 33.33x33.33 m, 16.67x16.67 m y 8.33x8.33 m, lo cual se muestra en las figuras 4.18 y 4.19 para las variables níquel y potencia mineral, respectivamente. El ajuste fue realizado utilizando un modelo exponencial y dos modelos esféricos. Atendiendo a la experiencia práctica de especialistas y tomando en cuenta las regularidades geológicas del intemperismo no se consideró ajustar un efecto de pepita para el comportamiento espacial de la variable níquel. Lo anterior se justifica por ser el intemperismo un fenómeno volumétricamente irregular, localmente intensificado por las direcciones de agrietamiento de las rocas madres, de las pendientes del terreno, de la existencia y régimen de aguas subterráneas, del régimen de lluvia, etc. Además, se justifica por el comportamiento de los semivariogramas verticales calculados para el procesamiento en tres dimensiones y, en segundo orden, por la práctica del minado de este yacimiento que revela la existencia de continuidad geométrica en la mineralización.

El hecho de no modelar usando un efecto de pepita, no entra en contradicción con la alta variabilidad del níquel en el yacimiento, lo cual se refleja en que para distancias pequeñas, es decir, para los primeros puntos de los semivariogramas se alcanzan rápidamente valores altos de la varianza de los datos. El análisis anterior es válido para el resto de metales: hierro y cobalto.

El modelo ajustado se presenta en la siguiente ecuación:

$$G(h) = 0.024 \text{ Exp}(3.5) + 0.003 \text{ Sph}(50) + 0.005 \text{ Sph}(225)$$

La figura 4.20 muestra el ajuste realizado a los semivariogramas para el níquel en las diferentes redes analizadas. Para el caso de los semivariogramas calculados con los datos de las redes de 16.665 m y 33.33 m se ajustó utilizando el mismo modelo anidado, pero considerando el por ciento que representa cada meseta individual de las varianzas de los datos correspondientes.

Estos modelos son:

- Red de 16.67x16.67 m $G(h) = 0.022 \text{ Exp}(3.5) + 0.003 \text{ Sph}(50) + 0.005 \text{ Sph}(225)$
- Red de 33.33x33.33 m $G(h) = 0.019 \text{ Exp}(3.5) + 0.002 \text{ Sph}(50) + 0.004 \text{ Sph}(225)$

Se observa que los modelos ajustados describen correctamente la variabilidad espacial de la variable analizada en las diferentes redes.

Similar análisis se hizo para la potencia de la zona mineralizada, pero para esta variable sí se consideró la existencia de efecto de pepita, debido a la alta fluctuación de la misma y a que el contacto escombro - zona mineral y el de esta última con la roca madre es extremadamente variable. Se obtuvo el siguiente modelo de variabilidad espacial.

$$G(h) = 15.00 + 6.00 \text{ Sph}(25) + 7.72 \text{ Sph}(240)$$

La figura 4.21 muestra el ajuste realizado para la potencia en las diferentes redes de muestreo. De igual modo para las redes de 16.665 m y 33.33 m se ajustaron las mismas estructuras, pero considerando el por ciento que representa cada meseta individual de la varianza de los datos correspondientes. Estos modelos son:

- Red de 16.67x16.67 m $G(h) = 13.50 + 5.40 \text{ Sph}(25) + 6.95 \text{ Sph}(240)$
- Red de 33.33x33.33 m $G(h) = 10.02 + 4.01 \text{ Sph}(25) + 5.16 \text{ Sph}(240)$

Los modelos obtenidos serán usados en el proceso de estimación, para posteriormente comparar los dos criterios de error porcentual señalados.

4.15. Estimaciones y obtención de los valores de varianza de krigeaje

En la estimación se usó el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques, en una red que coincide con la red de exploración más densa: 8.33x8.33 m. Se utilizó el modelo de semivariograma correspondiente a la red de datos a probar en la estimación y con una vecindad que garantice la cantidad de datos suficientes para este proceso. La red de estimación es:

$$X_{\min} = 4716.67 \quad X_{\max} = 5008.34$$

$$Y_{\min} = 5525.00 \quad Y_{\max} = 5816.67$$

El tamaño de los bloques de estimación es de $8.33 \times 8.33 \text{ m}^2$, con 36 bloques en cada dirección.

Los resultados utilizando el criterio $\sigma_k^*/Z_k^* \cdot 100$ son:

Tabla 4.9. Rango de valores del error porcentual ($\sigma_k^*/Z_k^* \cdot 100$) para diferentes redes.

Variable	Red $33.33 \times 33.33 \text{ m}$	Red $16.67 \times 16.67 \text{ m}$	Red de $8.33 \times 8.33 \text{ m}$
Níquel	De 3.63 a 8.50	De 3.39 a 8.28	De 2.89 a 5.20
Potencia	De 7.58 a 29.39	De 6.76 a 28.30	De 5.44 a 25.77

En la tabla anterior se presenta el rango de valores que toma el criterio para las diferentes redes cuadradas. Es de notar que para la variable níquel los valores son inferiores al 10% en todos los casos, lo que conduce a considerar que ésta presumiblemente queda correctamente determinada con la red de $33.33 \times 33.33 \text{ m}$. Para la potencia el rango de valores es superior al 10% en un alto por ciento de los bloques estimados.

Los resultados utilizando el criterio $\text{Abs}(Z^* - Z^R)/Z^* \cdot 100$ se presentan en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Estimación y comparación para diferentes redes.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%		
	Red $33.33 \times 33.33 \text{ m}$	Red $16.67 \times 16.67 \text{ m}$	Red $8.33 \times 8.33 \text{ m}$
Níquel	62.68	69.78	90.09
Potencia	22.50	30.11	49.05

De la tabla 4.10 se infiere que a medida que disminuye la red de estimación el por ciento de bloques con error de estimación inferior al 10% aumenta. Para el caso de la red de $8.33 \times 8.33 \text{ m}$ la variable níquel, como es de esperar, alcanza un alto por ciento de bloques en categoría de reservas probadas, según ONRM (1999) y ONU (1996); sin embargo, para la potencia mineral, no ocurre lo mismo, pues existe un alto por ciento de bloques fuera del intervalo, lo cual constituye un índice de la variabilidad de este parámetro.

Comparando los resultados arrojados por los dos criterios se puede llegar a la conclusión de que asumir el error del 10%, permisible por la empresa, como el error porcentual que brinda la Geoestadística, no es conveniente y conduce a la idea de que las reservas de níquel quedan determinadas por la red de $33.33 \times 33.33 \text{ m}$. Además en este caso la varianza de krigeaje es muy sensible, debido a la alta variabilidad que se aprecia en los semivariogramas calculados.

Aquí se considera importante visualizar los gráficos de líneas según los dos criterios analizados a través de un perfil en las direcciones X o Y (figura 4.22), lo cual permite mostrar el carácter geométrico de la varianza de krigeaje y la imposibilidad de establecer una relación entre éstos.

De lo discutido anteriormente y de los resultados obtenidos por otros autores (Deutsch y Journel, 1998), se puede concluir que la varianza de krigeaje depende de tres factores:

- 1.- El modelo de continuidad espacial obtenido en el análisis estructural.
- 2.- El tamaño de los bloques de estimación, disminuyendo con el aumento de éstos para una red de exploración constante.
- 3.- El espaciamiento de la red de exploración, aumentando con el aumento de ésta para un tamaño de bloques de estimación constante.

Este valor de varianza de krigeaje ha sido frecuentemente utilizado por algunos autores para la clasificación de las reservas y para la definición de redes racionales de exploración. Es opinión del autor de este trabajo que los valores de este criterio deben ser cuidadosamente utilizados en unión de otros que se presentan en las metodologías para la clasificación de reservas (ONU, 1996; ONRM, 1999), de modo que contribuya como un elemento más a tener en cuenta, pero sin tener un carácter definitorio.

Ahora, como el segundo criterio $\text{Abs}(Z^*-Z^R)/Z^*100 < 10\%$ es un criterio real exigido en las estimaciones de la Empresa, se decide abandonar el uso del primer criterio para el estudio de los contenidos en yacimientos lateríticos, tomando como referencia el caso de estudio abordado. Esto no quiere decir que este primer criterio no pueda ofrecer resultados ventajosos en otros tipos de yacimientos, incluso en otros yacimientos del mismo tipo que presenten mayor continuidad espacial en la mineralización.

Otro elemento importante a tener en cuenta es que no es representativo asignar al bloque de 8.33x8.33 m el valor del contenido medido en el pozo central de la red de 8.33x8.33 m del bloque correspondiente, debido a las fluctuaciones que presentan los parámetros analizados. Por lo anterior se considera más conveniente asignar un posible valor real, más representativo de los contenidos medios de los bloques, a través del promedio de valores vecinos obtenido por ventanas móviles, usando las posibilidades que ofrece la simulación geoestadística. En el siguiente capítulo proponemos el uso de la simulación con varios fines: asignar un valor más

representativo al contenido medio del bloque, obtener redes racionales de exploración y realizar cambio de soporte en la observación, todo lo cual se revertirá en una mejor caracterización de los parámetros en estos yacimientos.

4.16. Conclusiones del capítulo

Partiendo de la caracterización del modelo geológico del yacimiento, es posible concluir que se trata de una mineralización alojada en corteza de intemperismo con complejidades litológicas, lo que dificulta en gran medida la modelación por litologías, de ahí que se decida realizar la modelación geológica por tipos tecnológicos, de acuerdo a los intereses de la empresa.

Se obtuvo un modelo geométrico tridimensional de los bloques O53 O54 O55 P53 P54 y P55 estudiados, del yacimiento Punta Gorda por tipos tecnológicos, lo cual permitió la realización de estimaciones de cada variable estudiada: hierro, níquel y cobalto.

Los trabajos de exploración detallada se ejecutaron en una red de 33.33x33.33 m. Es importante señalar aquí que se corrobora el inconveniente que representa para el procesamiento numérico el utilizar una red con valores decimales inexactos.

Los semivariogramas experimentales calculados muestran estructuras definidas en todas las direcciones, considerándose el comportamiento de todas las variables como isotrópico en el plano de la mineralización y anisotrópico entre este plano y la dirección vertical.

Se detectó y corroboró una alta variabilidad en los contenidos estudiados, lo cual se aprecia en los altos valores alcanzados para los primeros puntos de los semivariogramas.

El comportamiento de la variabilidad espacial cuestiona la calidad de las estimaciones realizadas. Se decide comprobar éstas aprovechando la información que aporta el bloque experimental O48 del mismo yacimiento, al poder realizar la comparación de los datos reales con los estimados.

En el bloque O48 se obtuvieron correlaciones muy pobres entre los valores reales y estimados, usando los valores reales como representativos, esto indica que no es posible utilizar la red de 33.33x33.33 m para determinar con eficiencia las reservas locales de los

yacimientos lateríticos o que los valores puntuales no pueden ser tomados como representativos. Relacionado con esto, el método de áreas de influencia tradicionalmente empleado en el cálculo de reservas en estos yacimientos, no permite una caracterización detallada a escala local de los parámetros geólogo – industriales, no adaptándose a las complejidades geológicas en la corteza de intemperismo.

Se realizó la caracterización de la varianza de krigeaje, obteniéndose que es imposible su uso en los yacimientos lateríticos debido a dos aspectos fundamentales: la alta variabilidad presente en los parámetros estudiados y el carácter puramente geométrico de este indicador, por lo que se decide abandonar este criterio para la obtención de redes racionales de exploración.

Capítulo V. Estudios de estimación y simulación para proponer redes racionales de exploración en la caracterización de las reservas en los yacimientos lateríticos

5.1. Introducción

Este capítulo se propone utilizar las bondades de la simulación geoestadística para la caracterización de los parámetros geólogo - industriales en yacimientos lateríticos. Se sustituyen los valores reales por los promedios móviles de los valores simulados en una red de 1x1 m en bloques de 8x8 m, además, se propone un estudio de redes racionales de exploración utilizando los valores reales propuestos y la simulación. Se utiliza como ejemplo las variables níquel y potencia mineral del bloque O48, por ser los parámetros fundamentales, el de menor y mayor variabilidad, respectivamente. Se obtiene una secuencia metodológica como solución a los problemas de estimación en el yacimiento estudiado a partir del uso de la simulación, que puede ser extendida al resto de los yacimientos que presenten similares características geológicas y de variabilidad espacial.

5.2. Simulación

Las estimaciones locales y globales son en ocasiones insuficientes para lograr una caracterización adecuada de las reservas en la etapa de planeamiento minero (Journel y Huijbregts, 1978), fundamentalmente cuando estamos en presencia de parámetros variables espacialmente, como es el caso de estudio que hemos tratado en el capítulo anterior. Por tal motivo, es esencial predecir las fluctuaciones presentes en la práctica a partir de la variabilidad espacial revelada de los parámetros en estudio, lo cual sólo es posible a través de la simulación (Cuador y Quintero, 2001).

Para lograr una representación equivalente al yacimiento real, se utiliza la simulación geoestadística, la cual proporciona una herramienta útil para reproducir la distribución espacial de los datos (Carrasco y Jara, 1998). Esta consiste primero, en generar valores con iguales características de dispersión que los datos originales, lo que se logra a través de la simulación no condicional y posteriormente condicionar los valores obtenidos a los datos reales, esto es la Simulación Condicional. De esta forma se obtiene una de las posibles realizaciones del yacimiento, de la cual la información real también es considerada como una realización.

Para implementar la simulación se utilizó la librería geoestadística GsLib (Deutsch y Journel, 1998), a partir de las características de variabilidad y correlación espacial de las variables a estudiar obtenidas en el proceso de análisis estructural correspondiente. Se generaron valores simulados en una red densa, que permitieron la descripción detallada del comportamiento de las variables. El procedimiento se describe a continuación.

La librería GsLib, es un conjunto de programas que ofrece las más diversas posibilidades de procesamiento geoestadístico. Su ambiente de trabajo consiste en definir las características del procesamiento en un fichero de parámetros, los cuales son definidos en correspondencia al cálculo a desarrollar. Estas definiciones son leídas en el momento de la ejecución de los programas ejecutables, generándose un fichero de salida con los resultados del procesamiento. Estos resultados deben ser interpretados y utilizados por el usuario. Para el caso particular de la obtención de simulaciones se procede de la siguiente forma:

- 1.- Se utiliza inicialmente el programa “Nscore” para normalizar los datos, este requerimiento se debe a que el programa de simulación exige datos normalizados.
- 2.- A través del programa “Sgsim” se realiza la simulación, que incluye internamente los procesos de simulación no condicional y condicional anteriormente descritos. En este paso se debe definir una red densa que permita caracterizar las fluctuaciones de los parámetros de forma detallada. Debe tenerse en cuenta que el modelo de variabilidad espacial a introducir es el de los datos normalizados obtenidos en el primer paso.
- 3.- Después de generada la simulación se adicionan las coordenadas a los valores obtenidos usando el programa “Addcoord”, a partir de la misma red utilizada en el segundo paso.

Según el procedimiento descrito se obtuvieron las simulaciones de las variables níquel y potencia de la zona mineral del bloque O48, bloque utilizado para la comprobación de las estimaciones realizadas en el capítulo anterior.

Antes de proceder a utilizar los valores de la simulación, se debe justificar la veracidad de la misma. Como se ha dicho en el proceso de simulación geoestadística se reproducen las características de dispersión de los datos originales, lo que puede ser verificado para las variables tratadas en las tablas 5.1 y 5.2. El semivariograma calculado sobre los valores simulados revela la misma variabilidad de los datos originales.

Tabla 5.1. Estadística de datos reales y simulados para el níquel.

	Reales	Simulados
No. De muestras	1262	82944
Mínimo	0.828	0.828
Máximo	2.311	2.310
Rango	1.483	1.482
Media	1.296	1.299
Mediana	1.274	1.279
Varianza	0.032	0.031
Desviación estándar	0.178	0.177
Coefficiente de variación	0.138	0.136

Tabla 5.2. Estadística de datos reales y simulados para la potencia.

	Reales	Simulados
No. De muestras	1262	82944
Mínimo	1.00	1.00
Máximo	33.00	33.00
Rango	32.00	32.00
Media	14.10	13.93
Mediana	14.00	14.00
Varianza	28.72	28.07
Desviación estándar	5.36	5.30
Coefficiente de variación	0.38	0.38

Además es posible observar el gráfico de dispersión entre los valores reales y simulados. La figura 5.1 muestra este resultado para las dos variables tratadas, donde se puede observar buena correlación en ambos casos. La figura 5.2 muestra los semivariogramas experimentales calculados sobre los valores simulados, en los cuales se observa que éstos describen la variabilidad de los datos originales.

Si se considera también la Teoría de las Funciones Aleatorias, de la cual parte la Geoestadística, que interpreta el fenómeno de la mineralización como una función aleatoria (Matheron, 1970), es posible justificar que la simulación obtenida es una función aleatoria

estacionaria y ergódica. Un proceso estocástico es estacionario cuando sus propiedades permanecen invariantes para cualquier traslación en el espacio, donde los valores esperados y las varianzas del proceso son constantes. Este hecho se puede verificar en la simulación obtenida, con la comparación mostrada en las tablas 5.1 y 5.2. En éstas se puede observar que tanto la media como la varianza de los valores simulados y reales de los parámetros de la mineralización son prácticamente iguales. Esta comparación puede ser verificada para cualquier simulación que se practique. Otro aspecto a tomar en consideración es que la función de autocovarianza se expresa en función de la diferencia entre las localizaciones, la cual tiende a cero cuando la distancia entre los datos aumenta, lo que se infiere al observar los semivariogramas calculados.

Por todo lo antes explicado se puede plantear que la simulación obtenida puede ser considerada ergódica, es representativa de la realidad que se estudia y los resultados obtenidos utilizando una simulación son similares a los esperados si se contara con los valores reales del yacimiento.

Hasta aquí se han generado valores que pueden sustituir la realidad, es decir, tenemos una de las posibles realizaciones de los parámetros estudiados del yacimiento real. Sobre estos valores se puede experimentar al realizar la exploración con redes de diferentes tamaños sin necesidad de hacer nuevas perforaciones, lo cual es mucho más económico en la etapa de pronóstico al realizar estudios de redes racionales de exploración. En la práctica sería imposible este estudio al encarecerse los costos con la densificación de las redes de muestreo, si partimos de que el 75 % de éstos en la exploración del yacimiento se corresponden con los gastos de la exploración detallada, entiéndase red básica (verbigracia 33.33x33.33 m en el caso del yacimiento en estudio).

5.3. Posibles valores reales más representativos

Para proponer posibles valores reales, que sean más representativos, se tomaron los valores medios de las simulaciones obtenidas en la red de 1x1 m, incluidos en el interior de bloques de 8x8 m, utilizando el procedimiento de promedio móviles. Los valores obtenidos se proponen como reales. En este caso además, se elimina el inconveniente de trabajar con redes inexactas que resulta extremadamente incómodo en el procesamiento numérico.

A continuación se exploró la simulación para obtener redes de 8x8 m, 16x16 m, 24x24 m y 32x32 m y así realizar igual análisis que cuando se disponía sólo de un valor central por pozo, que representaba el contenido del bloque correspondiente. Utilizando el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques se estimaron los valores de las variables analizadas en la misma red donde fueron obtenidos posibles valores reales, realizándose la comparación y obteniendo los resultados que se presentan en la tabla 5.3. En ésta se representa el por ciento de bloques estimados con un error inferior al 10% para cada red y variable estudiada (el 10% es el error permisible exigido para las reservas probadas por la Empresa).

Tabla 5.3. Comparación de los resultados para el níquel y la potencia.

Variable	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	82.26	84.85	88.94	95.51
Potencia	37.35	38.73	40.82	53.01

De la tabla 5.3 se puede inferir que para la red de 32x32 m, cercana a la que existe actualmente en estos yacimientos, es mayor la cantidad de bloques con error de estimación inferior al 10% que en la comparación realizada en el capítulo anterior, donde se utilizaba como valor representativo el correspondiente al de un pozo central. Esto demuestra que el valor medio obtenido por ventanas móviles es más representativo. Aunque se mejora el por ciento de bloques con error inferior al 10% para el níquel en las diferentes redes, no se satisface la calidad de las estimaciones para la potencia, ni en la red más densa, representando esto una evidencia más de la variabilidad de este parámetro en el yacimiento laterítico tomado como caso de estudio. Es criterio del autor de este trabajo que esta inferencia puede ser extendida al resto de los yacimientos de la región con características similares.

A partir del resultado anterior y con el objetivo de mejorar las estimaciones, se considera apropiado realizar un cambio de soporte en la observación, ya que es imposible realizar en la práctica un barrenos con dimensiones superiores a la de los pozos de perforación. Se propone entonces, a partir de los valores simulados, realizar la exploración, ahora con los valores medios en bloques de igual tamaño, por ejemplo: 4x4 m (16 valores) y 8x8 m (64 valores). Sobre esta base se realizan las estimaciones por el método de krigeaje y se comparan los resultados.

5.4. Cambio de soporte en la exploración

Los resultados obtenidos usando bloques de dimensiones de $8 \times 8 \text{ m}^2$ se presentan en la tabla 5.4. Aquí de igual modo se muestra el por ciento de bloques estimados con error inferior al 10% para cada red y variable estudiada.

Tabla 5.4. Comparación de los resultados para el níquel y la potencia.

Variable	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x 16 m	Red 8x8 m
Níquel	84.86	87.58	91.84	100.00
Potencia	41.05	46.86	57.64	87.58

A partir de los resultados de esta tabla se demuestra que en el caso de la variable níquel, para todas las redes, se obtiene un alto por ciento de los bloques estimados con error permisible inferior al 10%. Considerando ahora, la tabla de clasificación de reservas de Deah y Davis (Annels, 1991) y ajustando ésta a las normas establecidas al efecto para los recursos y reservas (ONRM, 1999), se puede apreciar que en las estimaciones de la variable níquel se supera suficientemente el 80% de los bloques estimados con error inferior al permitido para reservas probadas. Esto indica que la red racional para esta variable puede ser mayor que la red de exploración detallada realizada actualmente en los yacimientos lateríticos cubanos. Sin embargo, para el parámetro potencia no se satisface la condición para las redes de 32x32 m, 24x24 m y 16x16 m, siendo satisfecha solamente para la red más densa, lo que permite inferir que la red racional para la determinación de este parámetro (parámetro que define el tonelaje de mena) es de un espaciamiento ligeramente superior a $8 \times 8 \text{ m}$. Lo anterior es un índice de la posibilidad que brinda el cambio de soporte para la caracterización de los contenidos tratados.

Para la variable níquel en la red de 32x32 m fue posible lograr un aumento del por ciento de bloques con error inferior al 10%: desde 62.68% (tabla 4.10), utilizando el valor medio ponderado del pozo central como representativo del bloque, hasta un 84.86% (tabla 5.4), utilizando el cambio de soporte. En el caso de la potencia mineral, aún cuando el aumento es significativo, se alcanza sólo un 41.05% de los bloques con error inferior al error establecido, lo cual coincide con los estudios realizados por otros autores acerca de la variabilidad de este parámetro (Lavaut, 2000; Vera, 2001).

En ambos casos es posible obtener, a partir de los resultados anteriores, el espaciamiento de los pozos de perforación si construimos un gráfico del espaciamiento de la red contra el por ciento de bloques estimados con error inferior al establecido para la categoría de reservas que se desee (probadas o probables). Esto permite proponer un nuevo método para la definición de redes racionales de exploración utilizando las ventajas que brinda la simulación geoestadística de variables regionalizadas.

5.5. Obtención de la red racional de exploración

La obtención de la red racional de exploración es posible a partir de los resultados obtenidos y la construcción de los nomogramas, gráficos de espaciamiento de la red contra el por ciento de bloques estimados con error inferior al permisible para la categoría en cuestión. A los puntos plotados en estos nomogramas se les puede ajustar una curva teórica, que permite conocer la red que determina un por ciento de bloques cualquiera con error de estimación inferior a la categoría de reserva utilizada. Los límites de error a considerar siguiendo las definiciones de clasificación de reservas presentadas en Annels (1991) y equiparándolas con las normas nacionales (ONRM, 1999) son: para las reservas probadas, más del 80% de bloques determinados con un error inferior al 10% y para las reservas probables, más del 60% de los bloques determinados con un error inferior al 20%. Para el caso de estudio tomado como referencia, el bloque O48, los resultados obtenidos en la zona mineralizada y considerando la categoría de reservas probadas se muestran en la figura 5.3.

En esta figura se presentan los nomogramas obtenidos para las variables níquel y potencia. En las figuras 5.3 a y b se muestran los resultados relacionados con la estimación utilizando valores puntuales obtenidos de la simulación, y en las figuras 5.3 c y d, cuando se realiza el cambio de soporte.

Se puede observar que para el níquel, en los dos casos, se garantiza más de un 80% de bloques estimados con error inferior al 10%, lo que permite plantear que la red racional para esta variable tiene un espaciamiento superior a la red actual de 33.33x33.33 m. Es posible obtener la red racional para los límites de error establecidos a partir de la curva potencial ajustada en cada caso. En la figura 5.3a la red puede tener un espaciamiento de 40.25 m y en la figura 5.3c de 51.85 m. Esto demuestra que los contenidos en este bloque pueden ser determinados suficientemente con la red de exploración detallada de 33.33x33.33 m en bloques de tamaño 8.33x8.33 m².

Ahora, para la potencia mineral no es posible obtener una red racional utilizando valores puntuales en la estimación, sólo haciendo un cambio de soporte se puede lograr una red racional ligeramente superior a las dimensiones de los bloques de estimación. La red racional para este parámetro puede ser obtenida de la curva ajustada en la figura 5.3d, la cual es de 9.22x9.22 m. Esto reafirma la alta variabilidad de la potencia y la necesidad de buscar soluciones para su determinación, soluciones que no pueden ser encontradas a partir de la información de geoquímica de pozos, debido a que una red con estas características sería extremadamente costosa. En este sentido consideramos que se debe incrementar trabajos geofísicos con el objetivo de caracterizar este parámetro, para lo cual ya existen trabajos realizados en la esfera internacional (Peric, 1981; Queen y Parkinson, 1998; Francké y Parkinson, 1999) y el ámbito nacional (Mondelo y Acosta, 1998; Acosta y Dussac, 1999; Hernández, 1999), además de resultados y experiencias por especialistas de otras instituciones nacionales como por ejemplo el ISPJAE.

A partir de los resultados obtenidos y utilizando igual procedimiento que el descrito anteriormente, se probaron otras configuraciones de bloques con un soporte diferente al utilizado, bloques de 4x4m, y se exploraron en redes de: 4x4 m, 8x8 m, 12x12 m, 16x16 m, 20x20 m, 24x24 m, 28x28 m, 32x32 m. Se realizaron las estimaciones por el procedimiento Krigeaje Ordinario de bloques y se compararon con los supuestos valores reales. Los resultados obtenidos muestran que la elección de una red de exploración depende del tamaño de la unidad de selección minera que se desee utilizar. Si dividimos la red obtenida para un por ciento de bloques determinados con un error límite establecido entre el tamaño del bloque utilizado en la estimación, obtenemos un coeficiente que determina la red racional para la configuración presentada en función de las dimensiones de los bloques de estimación. Así para el caso que hemos tratado, en la variable níquel se obtiene un valor de 5.03 y 6.48 cuando se utilizan valores puntuales y cambio de soporte, respectivamente. Para la potencia mineral un valor de 1.15 cuando se realiza cambio de soporte. Estos valores se mantienen constantes para cualquier configuración practicada.

De los resultados obtenidos hasta aquí se reafirma la posibilidad que brinda el desarrollar cambio de soporte en la observación, es decir, en la exploración. Este proceso en la práctica es imposible, pero a través de la Geoestadística se puede simular, sin apartarnos de lo que ocurriría con la información real del yacimiento (información que nunca será totalmente

conocida a detalle). Este nuevo procedimiento permite dar un tratamiento adecuado a los problemas de las estimaciones de los parámetros en estos yacimientos que presentan alta variabilidad; sin embargo para la potencia no se logran buenos resultados. En opinión del autor es imposible para este parámetro obtener una red racional usando sólo la información de geoquímica de pozos de perforación.

5.6. Secuencia metodológica para la caracterización de parámetros geólogo - industriales con la obtención de redes racionales de exploración

A partir de los resultados expuestos en este capítulo se propone que para realizar la caracterización de los parámetros geólogo - industriales en yacimientos lateríticos, se debe desarrollar una red básica característica de cada depósito. Esta red debe ofrecer la suficiente representatividad para la obtención de los semivariogramas y para el procesamiento confiable de la simulación geoestadística. El estudio geoestadístico de la simulación permite elevar el grado de estudio del depósito sin la necesidad de nuevas perforaciones, desarrollando una red teórica más densa que la básica, hasta lograr el nivel de error y probabilidad estipulado para cada categoría de recurso o reserva.

Una secuencia metodológica para la caracterización de los parámetros geólogos industriales en yacimientos lateríticos puede ser dividida en los siguientes pasos:

Primero: Obtener la red racional de exploración para los parámetros geólogo - industriales.

La búsqueda de la red racional se puede lograr utilizando los nomogramas de por ciento de bloques estimados con error inferior al 10% o 20%, según la categoría de reservas que se desee (probadas y probables, respectivamente), contra el espaciamiento de la red. A partir de éstos se selecciona la curva teórica que mejor ajusta y mediante ésta es posible determinar la red para la cual se cumple con los requerimientos de la tarea técnica en cuestión, lo que implica:

- 1.- Partir de una red básica. La red básica puede ser obtenida utilizando métodos de la estadística clásica. En la literatura de búsqueda y exploración de yacimientos minerales se presentan metodologías para la determinación del número de pozos a desarrollar (Lepin y Ariosa, 1986). Una posibilidad es partir de la información obtenida en los estadíos de exploración y exploración preliminar y desarrollar perforaciones en crucetas con poco espaciamiento entre los pozos (4 m para el caso de yacimientos lateríticos con una cantidad en

cada dirección no menor de 10) en una zona geológicamente representativa del depósito. Esto permite revelar las características de variabilidad y correlación espacial a pequeñas distancias, es decir, la continuidad en el origen y la existencia de anisotropía en la mineralización.

2.- Desarrollar el estudio geoestadístico de análisis exploratorio de datos y análisis estructural con la información obtenida en el primer paso, obteniéndose los semivariogramas representativos de la continuidad espacial de la zona del yacimiento en proceso.

3.- Generar simulaciones a partir de las características de continuidad espacial del paso anterior, en una red densa (puede utilizarse 1x1 m) que permita caracterizar los parámetros geólogos - industriales con elevado nivel de detalle.

4.- Buscar por el método de los promedios móviles, los valores medios de bloques de tamaño igual a la unidad de selección minera a utilizar de acuerdo al grado de estudio buscado. Aquí es posible definir una unidad menor que conlleve a un mayor grado de conocimiento de las reservas a escala local, lo cual es una consecuencia del presente estudio a través del uso de la simulación.

5.- Construir la gráfica de espaciamiento de la red contra el por ciento de bloques estimados con error inferior al permisible para cada categoría (10% para la categoría de reservas probada y 20% para la categoría de probable), es decir, nomogramas. Ajustar una curva teórica a los puntos del nomograma y obtener la ecuación correspondiente.

6.- Encontrar por medio de la curva ajustada en el paso anterior la red que cumple los requisitos de la tarea técnica (reservas probadas o probables y recurso). Esta sería la red que determina las reservas y recursos en la categoría correspondiente, cumpliendo con las normas exigidas, pero con un soporte igual a la unidad de selección minera a utilizar.

Segundo: Si se utiliza el método de áreas de influencia proponer una modificación al mismo. El método de áreas de influencia, empleado actualmente en los yacimientos lateríticos cubanos, utiliza como valor representativo los parámetros medidos en el pozo central y asignados al bloque de tamaño igual al espaciamiento entre las perforaciones. Se propone sustituir este valor por uno más representativo obtenido por promedios móviles sobre la simulación realizada en una red densa de 1x1 m en igual soporte de información, lo que implica:

- 1.- Realizar el estudio geoestadístico, el análisis exploratorio de datos y el análisis estructural con la información de la red de exploración obtenida en los trabajos de exploración detallada o exploración de explotación (actualmente en Cuba se ha utilizado en yacimientos lateríticos de la Empresa Che Guevara una unidad de 33.33x33.33 m para la explotación detallada y 16.67x16.67 m para la exploración de explotación). Como resultado de esto se obtienen los semivariogramas representativos de la variabilidad espacial de cada zona del yacimiento que se procese.
- 2.- Generar simulaciones a partir de las características de continuidad espacial reveladas en el paso anterior, en una red densa (puede utilizarse 1x1 m) que permitan caracterizar los parámetros geólogos - industriales con elevado nivel de detalle.
- 3.- Buscar por el método de los promedios móviles los valores medios de bloques de tamaño igual al espaciamiento entre las perforaciones y de esta forma obtener un valor más representativo para cada parámetro a utilizar en el cálculo de reservas.

5.7. Conclusiones del capítulo

El uso de la simulación geoestadística permitió obtener una secuencia metodológica para el desarrollo de un nuevo método de obtención de redes racionales de exploración en yacimientos lateríticos, tomando como caso de estudio la información aportada por el bloque experimental O48.

Los resultados obtenidos a partir de una de las simulaciones para cada variable estudiada, al ser realizaciones con iguales características de variabilidad y correlación espacial que las de los datos originales, permiten asegurar que éstos serían los mismos resultados que se obtendrían si se contara con los datos reales.

Capítulo VI. Obtención de redes racionales en los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 del yacimiento Punta Gorda

6.1. Introducción

En este capítulo se aplica la secuencia metodológica obtenida en el capítulo anterior, sobre la zona mineralizada de los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 del yacimiento Punta Gorda, con el objetivo de obtener una red racional de exploración, para la determinación de los parámetros geólogo - industriales en los mismos. El procedimiento se desarrolla sobre las variables níquel y potencia mineral, que han resultado las de menor y mayor variabilidad, respectivamente.

6.2. Presentación de los datos

La información está constituida por los resultados de las variables analizadas en 478 pozos, de los cuales 85 resultaron pozos negativos, restando 393 pozos que se utilizan en este estudio y se encuentran distribuidos en una red de 33.33x33.33 m (figura 6.1). Se creó y organizó la base de datos correspondiente a los compósitos de los contenidos de níquel, hierro, cobalto y la potencia de la zona mineralizada, datos obtenidos a partir del modelo tridimensional desarrollado en el capítulo anterior.

6.3. Análisis exploratorio de datos

El procesamiento estadístico se desarrolló para todos los compósitos de los datos para la zona mineralizada. Se calcularon las medidas de tendencia central y medidas de dispersión fundamentales. Los cálculos pueden ser observados en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Estadística descriptiva de los compósitos de las variables por pozos.

	Ni	Fe	Co	Potencia
No. De datos	393	393	393	393
Media	1.244	36.023	0.100	6.064
Mediana	1.197	37.633	0.096	5.000
Mínimo	0.140	8.300	0.014	0.100
Máximo	2.720	50.867	0.299	20.500
Rango	2.580	42.567	0.285	20.400
Varianza	0.070	75.093	0.002	17.185
Desviación estándar	0.265	8.666	0.045	4.146
Coefficiente de variación	0.213	0.241	0.450	0.684
Coefficiente de asimetría	1.175	-0.826	0.830	0.868
Curtosis	4.667	0.087	1.618	0.352

En la figura 6.2 se presentan los histogramas de frecuencias absolutas calculados para las variables Fe, Ni Co y potencia de los datos en la zona mineralizada. En los mismos se muestra de forma detallada el comportamiento de los parámetros estudiados.

Se observan distribuciones unimodales en todas las variables, no existen valores extremos que pudieran influir negativamente en el procesamiento geoestadístico de la estimación y la simulación. Como se observa en la tabla 6.1 la variable más estable es el níquel con menor coeficiente de variación 0.21 y la menos estable la potencia con coeficiente de variación 0.68. En lo adelante el estudio se desarrollará sobre estas variables en la zona mineralizada a modo de ejemplo.

6.4. Cálculo de los semivariogramas experimentales

Para el cálculo de los semivariogramas experimentales se escogió un incremento o paso de 33.33 m que coincide con el espaciamiento entre pozos en la red de exploración, como tolerancia lineal se tomó la mitad del incremento y el cálculo se realizó hasta aproximadamente 450 m, que es la mitad de la distancia máxima de las dimensiones de los bloques estudiados según la dirección este - oeste, incluyéndose hasta 15 puntos en el cálculo. Dependiendo de la estructura espacial que se muestre, se pueden calcular hasta más de 15 puntos en el semivariograma.

Se comienza el análisis estructural con el cálculo del semivariograma medio para cada variable, con una tolerancia angular de 90°, presentando una idea inicial de la variabilidad espacial de las variables. En la figura 6.3 se muestra el aspecto de los semivariogramas medios calculados para las variables níquel y potencia, donde se observan estructuras definidas en ambos casos, siendo suficiente la cantidad de pares computados.

A continuación se realiza el análisis de anisotropía para cada variable a partir del cálculo de los mapas de variogramas (figura 6.4), los cuales están en correspondencia con la variabilidad de cada parámetro estudiado. El mapa de variograma del níquel refleja un comportamiento más continuo, presentando una aparente anisotropía aproximadamente en la dirección 155°. En el mapa de variograma de la potencia se revela un comportamiento menos continuo, presentando también una aparente anisotropía aproximadamente en la dirección 140°. Los semivariogramas direccionales fueron calculados según las direcciones obtenidas anteriormente y sus intermedias.

En la figura 6.5 se presentan los semivariogramas direccionales calculados en las direcciones 155°, 65°, 110° y 20° para el níquel y 140°, 50°, 95° y 5° para la potencia, es decir, en las direcciones de posible anisotropía y sus perpendiculares e intermedias. En ambos casos se aprecia un comportamiento similar en todos los semivariogramas direccionales calculados para cada variable, lo que permite asegurar que el comportamiento de ambas variables es isotrópico en los bloques estudiados. Este hecho no está en contradicción con la alta variabilidad mostrada, es decir, la existencia de un aparente efecto de pepita que tiende a alcanzar un 60% de la meseta para el níquel y un 75% para la potencia. Puede apreciarse además, que la diferencia de los semivariogramas calculados en las diferentes direcciones es mínima comparada con la varianza de los datos.

6.5. Ajuste de modelos teóricos

Los modelos ajustados a los semivariogramas experimentales de las variables están formados, en los dos casos, por estructuras imbricadas: un modelo exponencial y uno esférico. Para el níquel no se consideró efecto de pepita por suponer continuidad a pequeña escala, debido a las características propias de la mineralización en el yacimiento laterítico estudiado, ya discutidas con anterioridad; para la potencia sí se consideró. Los ajustes realizados pueden ser observados en la figura 6.6, en los cuales se presenta para cada variable el semivariograma medio. Los modelos pueden ser escritos de la siguiente forma:

$$\text{Níquel:} \quad \gamma(h_x, h_y) = 0.047 \text{ Exp}(12) + 0.034 \text{ Sph}(580)$$

$$\text{Potencia:} \quad \gamma(h_x, h_y) = 12.0 + 6.5 \text{ Sph}(250)$$

Las estructuras con sus parámetros para cada variable son descritas en la siguiente tabla.

Tabla 6.2. Estructuras y parámetros ajustados para los parámetros níquel y potencia en los Bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 del yacimiento Punta Gorda.

Variable	Estructura	Meseta	Alcance X	Alcance Y
Níquel	Exponencial	0.047	12	12
	Esférico	0.034	580	580
Potencia	Efecto de pepita	12	-	-
	Esférico	6.5	250	250

6.6. Estimación y Simulación

Después de obtenidos los modelos que representan la continuidad espacial de las variables níquel y potencia mineral se procedió a realizar la simulación geoestadística. Esta se obtuvo

en una red de estimación de 1x1 m, lo cual permite describir detalladamente las fluctuaciones presentes en la práctica. Se desarrolló además, la estimación de las variables en una red definida por bloques de dimensiones 8.33x8.33 m², que coincide con la unidad de selección minera utilizada en la empresa, con el objetivo de ilustrar comparativamente las fluctuaciones de la simulación alrededor de los valores ricos y pobres de la estimación.

La red utilizada en la estimación fue de 108 columnas de bloques de dimensiones 8.33325 m en la dirección oeste - este, comenzando en la coordenada mínima 6195.83688 m, hasta 7095.82788 m, y 72 líneas de bloques de tamaño 8.33325 m, en la dirección sur - norte, comenzando en la coordenada mínima 54.83688 m, hasta 7104.16113 m. Se resalta aquí el inconveniente de trabajar con valores inexactos en el Sistema Internacional de Unidades. Este es el motivo por el que se definió una red con valores aproximados hasta cinco lugares decimales, con el único propósito de hacer coincidir los pozos de perforación con el centro de los bloques de dimensiones 8.33325x8.33325 m².

Las figuras 6.7 y 6.8 presentan los mapas de estimaciones y simulaciones obtenidos para las variables níquel y potencia mineral, respectivamente. Los mapas estimados muestran una imagen más suave, característica propia de todo interpolador, lo que no ocurre en el proceso de simulación en que se reflejan más las fluctuaciones siempre presentes en la realidad. Se puede notar la similitud entre los valores estimados y simulados, es decir, en las zonas ricas los valores simulados fluctúan alrededor de los correspondientes valores estimados, de igual modo ocurre para las zonas pobres. Lo expuesto anteriormente representa un índice de las ventajas de la simulación para la caracterización de los parámetros geólogo - industriales tratados. Esta característica de la simulación es usada en esta investigación, como hemos indicado, para realizar estudios de redes racionales de exploración.

6.7. Obtención de redes racionales de exploración para los bloques O53, O54, O55, P 53, P54 y P55

A partir de los valores simulados fueron obtenidos los posibles valores reales según el procedimiento de promedios móviles en bloques de dimensiones 8x8 m². Se exploraron las simulaciones de forma puntual, obteniéndose juegos de datos de redes de 8x8 m, 16x16 m, 24x24 m y 32x32 m. Utilizando los modelos de variabilidad obtenidos para las variables tomadas como ejemplo, fueron realizadas estimaciones y se computaron los por cientos de bloques que resultaron estimados con errores inferiores al 10% para cada espaciamiento de la

red. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.3. Comparación de los resultados usando valores puntuales en la estimación.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%			
	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	75.23	80.86	83.95	94.35
Potencia	32.34	34.60	37.85	45.15

Haciendo similar análisis, pero esta vez tomando valores medios en torno a los puntos de las redes de estimación de 8x8 m, 16x16 m, 24x24 m y 32x32 m, es decir, haciendo cambio de soporte en la exploración, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 6.4. Comparación de los resultados usando cambio de soporte en la estimación.

Variable	Por ciento de bloques con error inferior a 10%			
	Red 32x32 m	Red 24x24 m	Red 16x16 m	Red 8x8 m
Níquel	81.67	85.332	89.45	99.69
Potencia	37.80	45.18	55.06	81.48

En las tablas 6.3 y 6.4 se puede observar que el por ciento de bloques aumenta cuando disminuye el espaciamiento de la red, y aumenta aún más, cuando se realiza el cambio de soporte. Para la variable níquel se alcanza en la red de 32x32 m un por ciento de bloques superior al 80% establecido. Para la potencia mineral este por ciento sólo se alcanza para la red de 8x8 m. La figura 6.9 muestra los nomogramas obtenidos para los bloques estudiados sobre los resultados presentados en las tablas 6.3 y 6.4.

A partir de las curvas ajustadas en la figura 6.9 se obtienen los siguientes valores de espaciamiento de redes racionales. Para el níquel 26.29 m (figura 6.9a), utilizando valores puntuales en la estimación y 36.85 m haciendo cambio de soporte (figura 6.9c). Para la potencia, 8.24 m sólo para el caso en que fue utilizado el cambio de soporte. Comparando los resultados con los obtenidos en el bloque O48 en el capítulo anterior (tablas 5.3 y 5.4, figura 5.3) se puede afirmar que estamos en presencia de una de las zonas del yacimiento con mayor variabilidad en el comportamiento de sus parámetros, lo que coincide con los resultados relacionados con las complejidades de esta zona conocida como Altos Escombros, obtenidos por otros autores (Vera, 2001).

6.8. Conclusiones del capítulo

La secuencia metodológica obtenida fue aplicada sobre los bloques O53, O54, O55 P53, P54 y P55. El espaciamiento de la red racional para la variable níquel supera sólo al de la red actual de 33.33x33.33 m al hacer un cambio de soporte. Si se utilizan valores puntuales en la estimación, el espaciamiento de la red racional es inferior, pudiendo ser considerada una red de 25x25 m.

En el caso de la potencia mineral es imposible obtener una red racional utilizando en la estimación valores puntuales, sólo se obtiene una red con espaciamiento de 8.24 m cuando se realiza el cambio de soporte, es decir, un espaciamiento ligeramente superior al tamaño de los bloques de estimación de dimensiones de 8x8 m².

Comparando los resultados obtenidos con los del bloque O48, es posible asegurar que las redes racionales de exploración son diferentes para cada grupo de bloques administrativos o partes del yacimiento con cierta homogeneidad.

Como el espaciamiento de la red racional para la determinación de la potencia mineral es ligeramente superior a las dimensiones de los bloques de estimación, esto conlleva a elevar sustancialmente los costos en la exploración. Así se puede afirmar que la determinación de la potencia mineral y, por tanto, del tonelaje de mena es imposible a partir de la información de los pozos de perforación.

Consideramos como resultado de esta investigación que se deben utilizar redes de perforación operativas que medien entre la obtenida para la potencia y los contenidos de interés haciendo cambio de soporte, de modo que se ajusten a una adecuación económica. Conjuntamente se debe incrementar la realización de trabajos de geofísicos encaminados a la caracterización de los contactos y con éstos el parámetro potencia en el espacio inter-red. La unión de estas informaciones permitirá una mejor caracterización de las reservas.

Capítulo VII. Propuesta para la determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos

7.1. Introducción

En este capítulo se presenta un nuevo procedimiento para la determinación de la masa volumétrica, usando métodos de la Geoestadística Multivariada de integración de información. Estos métodos aprovechan la variabilidad espacial del parámetro de interés o variable primaria, masa volumétrica, y la relación que ésta presente con la o las variables que llamaremos secundarias, para la estimación o simulación de la primaria. En nuestro caso se utilizan como variables secundarias los contenidos de Fe, Ni y Co medidos en pozos de perforación, o simplemente los valores estimados de éstos, siempre con una condición, la variable primaria sólo puede ser estimada en aquellas localizaciones en que es conocida la variable secundaria. Se aplica el método en el bloque O48 puesto que no es posible su aplicación a los bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 por falta de información.

7.2. Métodos tradicionales para la determinación de la masa volumétrica

La masa volumétrica (MV) es un parámetro geólogo - minero de importancia en el cálculo de reservas ya que determina el tonelaje de mena y por tanto la cantidad de metal. Un error en la determinación de la MV conduce a errores en el cálculo de las reservas del mismo modo que una insuficiente estimación de los parámetros potencia o contenidos minerales (Lepin y Ariosa, 1986).

La MV se puede determinar por varios procedimientos, mediante el pesaje de las muestras y la determinación de sus volúmenes en los laboratorios, a través de la toma de muestras volumétricas y las mediciones necesarias de sus volúmenes en el campo. Otro método es mediante la toma de muestras especiales en el campo, el cual es el más exacto y auténtico. Este método es obligatorio y fundamental para minerales pulverulentos fuertemente agrietados o cavernosos. En otros casos, el método se utiliza para controlar los resultados de los trabajos de laboratorios o las mediciones geofísicas, así como la determinación directa de la MV en los pozos de perforación. Los valores de este parámetro se pueden obtener de manera indirecta para cualquier muestra química o mineralógica. Esta determinación se realiza para cada clase industrial de mineral útil, al menos de 10 a 20 veces si su calidad es homogénea y de 30 a 40 veces si es irregular o muy irregular.

Con este propósito se utilizan las correlaciones entre la magnitud de la MV de una parte y de otra el contenido del componente útil o mineral valiosos en la mena. Las dependencias correlativas obtenidas se establecen como norma, con bastante certeza y se aproximan a las funcionales. Sobre esta base se confeccionan las ecuaciones de regresión o se dibujan los nomogramas cuya utilización exitosa es conocida en el cálculo de reservas.

La MV de mineral útil se determina generalmente en su estado húmedo y puede variar mucho en un mismo punto del cuerpo mineral de acuerdo con la temperatura y la posición del nivel de las aguas freáticas; además, las reservas minerales útiles deben calcularse en estado seco sin el agua que ellas puedan contener. Por tanto, en la mayoría de los casos el valor de la MV obtenido a través de la muestra húmeda correspondiente (d_h) debe corregirse mediante la siguiente fórmula $D_s = d_h [(100 - W)/100]$, donde: D_s es la MV del mineral útil seco y W es la humedad de la muestra en %.

La MV del mineral útil es mucho menos variable que el contenido del componente útil o la potencia del cuerpo mineral, por esta razón es posible determinarla de manera selectiva utilizando con esta finalidad sólo una parte de los pozos de perforación. Las variaciones de este parámetro para cada clase industrial de mineral útil son aún menores y por eso el valor promedio de la MV en el bloque de cálculo se obtiene casi siempre por el método de la media aritmética. Sin embargo, si en el bloque se encuentran diferentes clases de menas y los puntos donde se determina la MV se ubican de manera muy irregular, el valor promedio de este parámetro se puede calcular como media ponderada. La utilización de la media ponderada sobre la base de las áreas de influencia de cada valor industrial de la MV, sólo es racional si existe la correlación de sus valores contiguos, fenómeno que se confirma muy raras veces en la práctica de los trabajos geológicos.

7.3. Propuestas de determinación de la masa volumétrica en yacimientos lateríticos

En los yacimientos lateríticos cubanos se han empleado dos métodos diferentes para la determinación de la MV a partir de las mediciones en pozos criollos (Vera, 1979). El primer método consiste en obtener una MV promedio para cada uno de los horizontes tecnológicos de mineral. Esto significa que mediante el pesaje y determinación de la humedad de todo el mineral del pozo criollo, comprendido en la zona que se haya clasificado como laterita de balance de acuerdo con los resultados de la perforación, se establece una sola MV para ese mineral. En la misma forma se procede con la serpentinita. Ahora, en realidad, el mineral

comprendido dentro del horizonte de serpentinita blanda estará compuesto por fracciones de rocas duras hasta terrosas, y por alguna laterita presente como bolsones o desarrollada en grietas preexistentes. Aunque cada una de estas fracciones posee de hecho una MV propia, se obtiene para todo el material una MV promedio. Este método facilita las operaciones de cálculo (Vera, 1979).

Otro método consiste en clasificar los minerales en subtipos, atendiendo a las distintas características físicas presentes en el mismo. Estas características se refieren a las diferencias de color, granulometría, compacidad y textura. En la misma forma se procede con el mineral serpentinitico. Al proceder a la apertura del pozo criollo, se extrae el mineral del primer intervalo, determinándose mediante su inspección macroscópica, que tipo de mineral lo componen. A continuación se establece la MV mediante el método habitual de pesaje y determinación de la humedad. Como resultado de este procedimiento quedará establecida toda una serie de valores de MV, que abarcarán los distintos subtipos de mineral. Con la aplicación de este método laborioso, se espera mayor precisión en el cálculo del tonelaje de mineral, pero en la práctica no se garantiza que se obtengan las ventajas que la aplicación de dicho método hace esperar. Se ha demostrado que todos los muestreos no clasifican la misma muestra de igual forma y que los resultados obtenidos presentan muy poca diferencia con el primer método. Se ha decidido aplicar la MV promedio por tipo de mineral tecnológico (Vera, 1979).

Otros autores han propuesto métodos para el establecimiento de la MV en yacimientos lateríticos, basados en que la MV es un parámetro geólogo - industrial que juega un papel importante en el calculo del tonelaje de las reservas de un yacimiento. Su determinación es importante para el cálculo final de las reservas tanto a escala global como local del mismo modo que influyen los contenidos de mineral. Estos trabajos parten de que tradicionalmente se toman los valores medios de MV por litologías y a partir de éstos se calcula el tonelaje. Consideran además, que en los valores de la MV influyen directamente una gran cantidad de características físicas (Legrá et al., 1999b), las que varían sensiblemente tanto en diferentes yacimientos como en distintas zonas de un mismo yacimiento; por lo que cualquier inexactitud existente en la determinación de la MV empleada se refleja también como inexactitud de los valores de las reservas de metal calculadas, y que el abuso de los valores medios, en aras de simplificar los cálculos, ha conducido a la aceptación de métodos simplistas y burdos (Legrá et al., 1999b).

Legrá et al. (1999b) proponen métodos ingeniosos, haciendo uso de interpolación por triangulación, resolviendo el problema de la determinación de la MV con mayor precisión que los métodos tradicionalmente aplicados. Así, la estimación se hace por tipos tecnológicos y no se aprovecha la continuidad espacial que puedan tener los valores de MV y su relación de correlación con los contenidos Fe, Ni y Co medidos en pozos criollos.

7.4. Nuevo método para la determinación de la masa volumétrica

Un nuevo método a aplicar para la determinación de la MV en yacimientos lateríticos lo brinda la Geoestadística Multivariada, a través de métodos de integración de información con diferente grado de conocimiento. Esto es, si se puede establecer alguna relación entre los valores de una o varias variable (que llamaremos secundaria) conocida en todo el dominio de estimación, con la variable de interés, la MV (que llamaremos primaria), es posible usar métodos para estimar la variable primaria en los puntos donde es conocida la variable secundaria, haciendo uso de sus relaciones.

Los valores de Fe, Ni y Co obtenidos en los 18 275 bloques de estimación con dimensiones $8.33 \times 8.33 \times 1 \text{ m}^3$, definidos por el modelo geométrico tridimensional desarrollado para el bloque O48, son considerados para conformar la variable secundaria. Los valores de MV medidos en muestras de 1m de longitud en 44 pozos criollos se consideran como variable primaria o de interés. Los pozos criollos fueron desarrollados en una red irregular mucho menos densa que la de pozos de perforación, dispuestos según la figura 7.1. Proponemos buscar una ecuación de regresión que relacione los contenidos Fe, Ni y Co con los de MV medidos en pozos criollos, de modo que a partir de esta relación y la continuidad espacial de la variable primaria o de interés, se puedan generar valores de MV en las localizaciones donde ya se conoce un valor estimado de la variable secundaria.

Esta generación de valores se puede hacer por medio de la simulación o estimación geoestadística con integración de información usando métodos como: Co-Krigeaje con Variable Colocalizada y Krigeaje con Deriva Externa. Posteriormente, se pueden utilizar los valores estimados de la MV en el proceso de cálculo de reservas. Para llevar a la práctica este nuevo método, es necesario buscar la ecuación de regresión entre la variable primaria y secundaria, realizar los cálculos de estadística básica, el análisis estructural y, finalmente, la estimación de la MV.

7.5. Ecuación de regresión

Para analizar la posible existencia de relación entre las variables masa volumétrica, Fe, Ni y Co, se aplicó la técnica de análisis de correlación y regresión múltiple.

La ecuación para la estimación de la MV en los pozos criollos desarrollados a partir de su relación con los contenidos de Fe, Ni y Co, se obtuvo mediante la aplicación del método de los mínimos cuadrados (Webster, 1996). Este método hace mínima las desviaciones con respecto a la recta estimada. La ecuación de regresión estimada y la significación de sus parámetros se muestra a continuación.

$$MV = 1.509 + 0.004 \text{ Fe} - 0.311 \text{ Ni} - 1.267 \text{ Co} \quad \text{con: es.} = 0.28, R = 0.63, R^2 = 0.39$$

Aún cuando el coeficiente de determinación R^2 , el cual mide el por ciento de la variabilidad total que es explicado por el modelo de regresión, no es tan explicativo, éste es aceptable para la aplicación de métodos de integración de información planteados (Deutsch, 2002; Pardo-Iguzquiza, 2002).

El valor del error de estimación (es.) del estadígrafo (F) y del nivel de probabilidad (p), en el análisis de varianza (tabla 7.1), son datos que permiten emitir criterios sobre la calidad de la ecuación de regresión estimada.

Tabla 7.1. Significación de los parámetros de la ecuación de regresión estimada.

Pozos criollos	T(568)	P
Intercepto	27.59	0.00
Ni	-13.67	0.00
Fe	-5.82	0.00
Co	3.63	0.00

Tabla 7.2. Análisis de varianza de la regresión.

	Sumas de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Nivel de probabilidad
	29.01	3	9.679	122.90	0
Residual	44.70	568	0.079		
Total	73.71				

A partir del análisis de varianza de la regresión (tabla 7.2) se observa que la ecuación de regresión estimada es significativa ($p < 0.05$), es decir, sirven para hacer estimaciones del valor esperado de la masa volumétrica, en función de los contenidos Fe, Ni y Co.

7.6. Estadística básica

La estadística básica de la MV medida en pozos criollos y para la zona mineralizada se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7.3. Estadística básica de la masa volumétrica.

No. de muestras	331
Media	1.072
Mediana	1.007
Mínimo	0.560
Máximo	2.960
Rango	2.400
Varianza	0.088
Desviación estándar	0.297
Coefficiente de variación	0.277
Asimetría	2.199
Curtosis	8.837

En la tabla 7.3, se observan valores próximos de la media y la mediana, un valor pequeño del coeficiente de variación, elementos que indican la homogeneidad estadística de la variable. En la figura 7.2 se presenta el histograma de la MV, en la que se aprecia la existencia de un valor anómalo superior a 2, el cual fue eliminado al realizar el análisis exploratorio de datos y de variabilidad, el resto de los datos presentan una distribución normal.

La matriz de correlación entre los contenidos de Fe, Ni, Co y MV se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 7.4. Matriz de Correlación entre las variables Fe, Ni, Co y MV.

	Ni	Fe	Co	MV
Ni	1.00			
Fe	-.32	1.00		
Co	.28	.28	1.00	
MV	-.60	.23	-.31	1.00

La MV posee mayor correlación con el Ni siendo negativa, como se observa en la tabla 7.4, la correlación con el resto de las variables es pobre, aún así, a partir de la ecuación de regresión obtenida en el epígrafe anterior se obtiene una nueva variable que posee una correlación de

0.63 con la MV. La figura 7.3 muestra la relación entre esta variable que se toma como secundaria para la estimación de la MV y la figura 7.4 el histograma.

7.7. Análisis de variabilidad de la masa volumétrica

El análisis de variabilidad espacial de la MV, para la zona mineralizada utilizada como ejemplo, se realizó en la dirección vertical y en la dirección horizontal, es decir, en el plano de la corteza de intemperismo. En la dirección vertical fue utilizado un incremento de 1m que coincide con el tamaño de las muestras, para la dirección horizontal se utilizó un incremento de 300 m, aproximadamente la distancia promedio entre las muestras contiguas y hasta una distancia tal que permita el uso de todas las muestras en el análisis. En este caso fueron calculados los semivariogramas en diferentes direcciones, desde 0° hasta 157.5° con intervalos de 22.5 grados, mostrándose estructuras similares en todas direcciones (figura 7.5 a), considerándose apropiado ajustar el semivariograma medio. Los ajustes se presentan en la figura 7.5 b. El modelo obtenido se representa por la siguiente expresión.

$$G(h_x, h_y, h_z) = 0.030 \text{ Exp}(500, 500, 5) + 0.058 \text{ Sph}(1650, 1650, 10)$$

7.8. Estimación de la masa volumétrica

Para la estimación de la MV se utilizó como variable secundaria los valores obtenidos por la ecuación de regresión entre la MV y los contenidos de Fe, Ni y Co, en los bloques de estimación definidos por el modelo geométrico tridimensional del bloque O48. Se empleó el procedimiento Co-Krigeaje con Variable Colocalizada (Collocated CoKriging) a través del promedio de 30 simulaciones de esta variable, para lo que se usó la librería GsLib (Deutsch y Journel, 1998). Los resultados de la estimación se muestran en la tabla 7.5 y en las figuras 7.6 y 7.7. La figura 7.6 muestra un perfil con las estimaciones de la MV y la figura 7.7 muestra dos gráficos de línea como ejemplo del comportamiento de la MV estimada y los valores promedios tradicionalmente usados en el yacimiento Punta Gorda, para una intersección entre los bloques contenidos en un perfil y un nivel cualquiera del depósito (B).

En la tabla 7.5 se presenta el cálculo de reservas utilizando los valores de masa volumétrica promedio y estimada. En esta tabla se presentan los valores sin aproximarlos por redondeo para significar las diferencias del cálculo utilizando los dos valores de MV: promedio y estimada. Es de notar que las reservas globales calculadas por el nuevo método son sólo ligeramente inferiores a las calculadas usando la MV promedio. De los gráficos de líneas de la figura 7.7 se deduce que las reservas a escala local son más precisas.

Tabla 7.5. Reservas estimadas para el bloque O48 usando MV promedio y estimada.

Zona mineralizada bloque O48	Tonelaje (ton)	Ley media (%)			Cantidad de metal (ton)		
		Fe	Ni	Co	Fe	Ni	Co
MV Promedio	1,329,931.30	39.40	1.37	0.09	596481.34	20735.33	1362.18
MV Estimada	1,283,949.82	39.40	1.37	0.09	506004.62	17590.11	1155.55

7.9. Conclusiones del capítulo

El nuevo método para la determinación de la MV, permite obtener valores de este parámetro de acuerdo dos elementos importantes: su variabilidad espacial y su relación con los contenidos de los metales medidos o estimados, por lo que proporciona una estimación de reservas más precisa a escala local. Para el caso particular del bloque O48, las reservas calculadas por el nuevo método de determinación de la MV son ligeramente inferiores a las obtenidas considerando los valores medios de MV utilizados en el yacimiento Punta Gorda.

Conclusiones

La metodología propuesta y su aplicación a algunos bloques del yacimiento Punta Gorda, nos ha permitido arribar a las siguientes conclusiones:

1. La modelación numérica de los yacimientos lateríticos cubanos se dificulta por la compleja estructura geológica y, consecuentemente, del campo menífero, lo que está condicionado por la naturaleza irregular de la constitución de la roca madre, la distribución de las propiedades físico – mecánicas, estructura litológica variables en la corteza de intemperismo y diferentes condiciones geomorfológicas, hidrogeológicas y microclimáticas.
2. Las características de variabilidad espacial de los parámetros de los depósitos minerales lateríticos solamente es posible modelarla eficientemente a través de mecanismos geoestadísticos detallados y conjuntos de estimación y simulación: Análisis estructural, Estimación por krigeaje, Simulación geoestadística y Geoestadística Multivariada.
3. Los modelos de variabilidad espacial obtenidos demuestran la ineficiencia de la información sobre los contenidos de metales Fe, Ni, Co y morfología del depósito (Potencia de mena) a partir de la información por la red estándar actual de (33.33x33.33 m), a pesar de obtenerse a partir de éstos los mejores estimados posibles. Por lo que la correcta caracterización de los parámetros geólogo – industriales de los yacimientos lateríticos cubanos requieren de la aplicación de una red más adecuada.
4. La exploración geológica racional a aplicar durante la prospección ha de definirse sobre la base de una red de perforación operativa (mínima), complementada con mediciones geofísicas en el espacio inter-red, hasta la conformación de un tamaño óptimo de la red.
Esta red operativa se argumentará de acuerdo a los siguientes pasos: simulación geoestadística en una red compatible a la longitud de muestreo; promediación estadística según ventanas móviles igual a la unidad de selección minera; estimación de la densidad de la red racional acorde al error de la categoría en cuestión del recurso mineral con cambio de soporte; realización de perforaciones por una red operativa con paso igual a N veces la densidad de la red racional obtenida por el parámetro más variable para su

adecuación a la factibilidad económica (siendo N un valor real). El espacio inter-red se estimará a través de mediciones geofísicas.

5. En el área patrón de estudio (bloques O53, O54, O55, P53, P54 y P55 y el O48) del yacimiento Punta Gorda, el modelado geomatemático logrado se caracteriza por:
 - a) Los semivariogramas experimentales calculados en el plano de la mineralización presentan una alta variabilidad, muestran estructuras definidas y similares en todas las direcciones, considerándose el comportamiento de las variables como isotrópico.
 - b) Los semivariogramas verticales calculados presentan continuidad espacial según esta dirección, lo que induce a la existencia de continuidad a pequeña escala en los contenidos de Fe, Ni y Co estudiados.
 - c) El uso de la varianza de krigeaje para la definición de redes racionales de exploración es inadecuado, no se adapta a las condiciones de alta variabilidad presentes en los parámetros estudiados, no es posible asignar un error permisible por la empresa del 10% al coeficiente de error porcentual que incluye a la varianza de krigeaje.
 - d) La simulación geoestadística desarrollada permitió: reproducir el comportamiento de las variables a través de sus características de dispersión, proponer posibles valores reales, simular el proceso de exploración puntual y con cambio de soporte, definir una secuencia metodológica para la definición de redes racionales de exploración y proponer una modificación al método de áreas de influencia.
 - e) Los resultados de redes racionales obtenidos a partir de una de las simulaciones para las variables níquel y potencia, representativas de las mismas, al ser realizaciones con iguales característica de variabilidad y correlación espacial que los datos originales, permiten asegurar que serán los resultados que se obtendrían si se contara con los valores reales.
 - f) Para la caracterización de la potencia mineral es imposible obtener una red racional utilizando valores puntuales en el proceso de estimación, sólo es posible obtener una red con espaciamiento ligeramente superior al tamaño de los bloques de estimación haciendo cambio de soporte a partir de los datos simulados. Sin embargo, para la determinación de los contenidos de níquel es posible obtener redes del orden de la actual. En los bloques estudiados O53, O54, O55, P53, P54 y P55 la red racional para la determinación de la potencia mineral es de 8.24 m utilizando cambio de soporte, y para el níquel es de 26.29 m utilizando valores puntuales y 36.85 m haciendo cambio de soporte.

6. La determinación de la masa volumétrica por métodos de la Geoestadística Multivariada de integración de información arroja resultados satisfactorios para el completamiento de la información de este parámetro y su aplicación al cálculo de reservas.
7. La metodología propuesta para la utilización de los métodos geoestadísticos sirve como guía útil para el desarrollo de aplicaciones de esta herramienta en los yacimientos lateríticos.
8. Haciendo uso conjunto de las técnicas de estimación y simulación geoestadística, se puede contribuir a una mejor caracterización de sus recursos ante las complejidades geológicas de estos yacimientos.
9. Partiendo de la similitud en las condiciones de formación de los yacimientos lateríticos, la metodología propuesta puede ser aplicada en depósitos similares.

Recomendaciones

1. Se recomienda la aplicación de la metodología propuesta para obtener una caracterización más precisa de los parámetros geólogo - industriales en los yacimientos lateríticos ferroniquelíferos cubanos.
2. Obtener redes racionales de exploración a partir de la secuencia metodológica propuesta frente a cada prospección geológica sobre la base de un detallado análisis de variabilidad en el depósito en cuestión.
3. Puntualizar con un estudio especial el complejo de métodos geofísicos más eficientes para caracterizar la potencia, dada la alta variabilidad de este parámetro en los yacimientos lateríticos y la disparidad de criterios existentes al respecto.
4. Realizar estimados de la masa volumétrica en función de su variabilidad espacial y su relación con los contenidos de Fe, Ni y Co en otras zonas y bloques de los yacimientos lateríticos cubanos.
5. Continuar profundizando en el uso de la simulación geoestadística para la caracterización de los parámetros geólogo - industriales y precisar el método definitivo para el cálculo de los recursos (reservas) minerales.
6. Estudiar comparativamente las bondades de los métodos de cálculo del recurso mineral con geoestadística y con métodos geométricos con el objetivo de obtener un mayor margen de informatividad.

Referencias Bibliográficas.

- Acosta, J. y Dussac, O., 1999**, Sondeo eléctrico vertical de polarización inducida. Informe, EGMO.
- Abasov, M.T. Djafarov, I.S., y Askerov, G.I., 1990**, Computer Based System for Exploration, Optimization, and Reserve Estimation at the Bakhar Field, South Apsheron, Azerbaijan, SSR, Computers & Geosciences, Vol. 16, No. 2, P. 245-249
- Adamovich A. y Chejovich V., 1962**, Principales características de la geología y minerales útiles de la región norte de la provincia de oriente. Revista Tecnológica.
- Aleogin, V., Fenenko, G., Almager, A., Kravtsova, T., Sanders, E., 1977**, Informe sobre los resultados de los trabajos de exploración geológica detallada y orientativa realizados en el yacimientos Punta Gorda en los años 1973 – 1976, con el cálculo de reservas de menas ferroniquelíferas en los sectores Punta Gorda y Yagrumaje, según su estado el 1ro de Enero de 1977, Oficina Nacional de Recursos Minerales.
- Almeida, A.S., y Journel, A.G., 1994**, Joint Simulation of Multiple Variables with a Markov-Type. Coregionalization Model, Mathematical Geology, Vol. 26, No. 5, p. 565-588.
- Annels, A.E., 1991**, Mineral Deposit Evaluation, Practical Approach, Chapman & Hall, 431p.
- Arik, A., 1990**, Effects of Search Parameters on Kriged Reserve Estimates, International Journal of Mining and Geological Engineering, Vol. 8, No.12, p.305-318.
- Ariosa Iznaga, J. D., 1977**, Curso de Yacimientos Minerales Metálicos, Tipo Genético. Editorial Pueblo y Educación.
- Ariosa Iznaga, J. D., Lavaut Copa, W. y Bergues Garrido P. S., 2002**, Aproximación a un modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-Co en el macizo Ofiolítico Mayari - Baracoa de Cuba Oriental, Revista Minería y Geología (en prensa)
- Ariosa Iznaga, J. D., 1988**, Estudio de variabilidad de los parámetros geólogo industriales en los flancos del Yacimientos Punta Gorda, Provincia Holguín, Revista Minería y Geología, Vol. 6, No. 3.
- Armstrong, M., 1994**, “Bon Sens et Géostatistique”, Bulletin de Liaison des Anciens Stagiaires du Centre d’Etudes Supérieures des Matières Premières CESMAT, No.40 Novembre 1994, 8 p.
- Armstrong, M., y Roth, C., 1997**, Notas de clases del curso Geoestadística Lineal, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Curso: 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Nacional Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia.
- Armstrong, M., y Carignan, J., 1997**, “Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.”, École de Mines de París, 112 p., “Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier.”, École de Mines de París, 112 p.

- ASCE Task, 1990**, Committed on Geostatistics Techniques in Geohydrology of the Ground Water Hydrology Committee of the ASCE Hydraulics Division, , Review of Geostatistics in Geohydrology II: Applications, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.116, No. 5, p.633-658.
- Bacchi, B., y Kottegoda, N.T., 1995**, Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns of Rainfall, Journal of Hydrology 165, Elsevier Science B.V., p.311-348.
- Carr, J.R., 1990**, UVKRIG: A Fortran-77 Program for Universal Kriging, Computers & Geosciences, Vol.16, No.2, p. 211-236.
- Carr, J.R., 1994**, Order Relation Correction Experiments for Probability Kriging, Mathematical Geology, Vol. 26, No. 5, p. 605-621.
- Carr, J.R., 1995**, Numerical Analysis for the Geological Sciences, Prentice Hall Inc, 592 p.
- Carr, J.R., y Mao, N., 1993**, A General Form of Probability Kriging for Estimation of the Indicator and Uniform Transforms, Mathematical Geology, Vol. 25, No. 4, p. 425-437.
- Carr, J.R., y Myers, D.E., 1990**, Efficiency of Different Equation Solvers in CoKriging, Computers & Geosciences, Vol. 16, No. 5, p. 705-716.
- Carrasco-Castelli, P., y Jara-Salame, E., 1998**, Information Impact in Mining Decisions Case Study Radomiro Tomic, Journees de Geostatistique, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, Fontainebleau, France, 25 et 26 Mai 1998, 14 p.
- Chauvet, P., 1994**, "Aide-Memoire de Géostatistique Minière", École des Mines de Paris, 210p.
- Chica-Olmo, M., 1987**, Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 387 p.
- Chica-Olmo, M., 2002**, Comunicación personal por correo electrónico, Universidad de Granada, España.
- Christakos, G., y Raghunath, V.R., 1996**, Dynamic Stochastic Estimation of Physical Variables, Mathematical Geology, Vol. 28, No. 3, p. 34-365.
- Christensen, R., 1990**, The Equivalence of Prediction from Universal Kriging and Intrinsic Random Function Kriging, Mathematical Geology, Vol. 22, No. 6, p. 655-664.
- Christensen, R., 1993**, Quadratic Covariance Estimation and Equivalence of Predictions, Mathematical Geology, Vol. 25, No. 5, p.541-558.
- Clark, I., 2002**, Normal Distribution, Lista de discusión Ai-Geostats.
- Cobiella R. J, Rodríguez J, Campos M., 1984**, Posición de Cuba Oriental en la Geología del Caribe. Revista Minería y Geología, Vol. 2, pp. 65-74.

- Cressie, N., y Grondona, M.O., 1992**, A Comparison of Variogram Estimation with Covariogram Estimation, *The Art of Statistical Sciences*, Chapter 15, p.191-208.
- Cuador-Gil, J.Q., 1997**, GeoRes, Una Aplicación Geoestadística para el Cálculo de Reservas. Tesis en opción al título de Master en Informática Aplicada. ISPJAE, Ciudad de la Habana.
- Cuador-Gil, J. Q. y Quintero, A., 1999**, Análisis estructural: punto de partida de todo estudio geoestadístico. *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 3, pp. 16-22.
- Cuador-Gil, J.Q., Quintero, A., y Estévez, E., 2000**, La simulación condicional en Geoestadística. *Revista Minería y Geología*, Vol. XVII, No.1, pp 47-50.
- Cuador-Gil, J. Q. y Quintero, A., 2001**, Simulación condicional de variables regionalizadas y su aplicación al comportamiento de la porosidad efectiva en un yacimiento fracturado – poroso, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, ISSN: 1405-3322, Tomo LIV, pp 19-27.
- Curran, P.J. y Atkinson, P.M., 1998**, Geostatistics and Remote Sensing, *Progress in Physical Geography*, 22, 1, p. 61-78.
- D'Agostino, V., y Zelenka, A., 1992**, Supplementing Solar Radiation Network Data by Co-kriging with Satellite Images, *International Journal of Climatology*, Vol. 12, p.749-761.
- David, M., 1977**, *Geostatistical Ore Reserve Estimation*, Elsevier, Amsterdam, 364 p.
- de Fouquet, C, 1996**, Quelques Rappels Sur les Méthodes Géostatistiques, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, Fontainebleau, France, 4 p.
- Deutsch, C.V., 1994**, Kriging With String of Data, *Mathematical Geology*, Vol. 26, No.5, p.623-638.
- Deutsch, C.V., 2002**, Comunicación personal por correo electrónico., PhD, Universidad de Stanford.
- Deutsch, C.V., y Journel, A.G., 1998**, “GSLIB: Geostatistical Software Library and User’s Guide”, Second Edition, Oxford University Press, 369p.
- Díaz Rodríguez, E, 2001**, Conferencias: Búsqueda, Exploración y Evaluación Geólogo Económica de Yacimientos Minerales, Universidad de Pinar del Río
- Dubrule, O., 1994**, Estimating or Choosing A Geostatistical Model, R. Dimitrakopoulos (de.), *Geostatistics for the Next Century*, p. 3-14.
- Echaabi, J., Trochu, F., y Gauvim, R., 1995**, A General Strength Theory for Composite Materials Based on Dual Kriging Interpolation, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.14, p.211-232.
- Estévez Cruz, E. y Cuador-Gil, J.Q., 2002**, Yacimiento Oro Castellanos: evaluación y comparación de técnicas de estimación espacial, *Revista Minería y Geología*, Vol. XVIII, Nos. 1-4.

- Francké, J.C., y Parkinson, G.J., 1999**, The new Role of Geophysics in Nickel Laterites Exploration and Development.
- Frykman, P., y Rogon, T.A., 1993**, Anisotropy in Pore Networks Analysed with 2-D Autocorrelation (Variomaps), Computers & Geosciences, Vol. 19, No. 7, p. 887-930.
- Genton, M.G., 1998a**, Highly Robust Variograms Estimation, Mathematical Geology, Vol. 30, No. 2, p.
- Genton, M.G., 1998b**, Variograms Fitting by Generalized Least Squares Using an Explicit Formula for the Covariance Structure, Mathematica Geology, Vol. 30., No. 4. p. 323-345.
- Gotway, C.A., 1991**, Fitting Semivariogram Models by Weigmted Least Squares, Short Note, Computers & Geosciences, Vol. 17, No. 1, p.171-172.
- Gutiérrez M. A y Beyra M. L., 1993**, Introducción al Análisis Variográfico de Yacimientos de Corteza de Intemperismo [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Haas, T.C., 1992**, Redesigning Continental-Scale Monitoring Networks, Atmospheric Environment, Vol. 26A, No. 18, p.3323-3333.
- Hernández, R., Cuador-Gil, J.Q, González, A., Romero, E. y Ramírez, R. 1999**, Artículo: “Estudio del Comportamiento de la Continuidad Espacial del Acuífero Cársico Costero de la Península de Guanahacabibes por Métodos Geoestadísticos”. Revista Minería y Geología, Vol. XVI, No.3, pp 23-26.
- Hernández, A., 1999**, Tarea No.2 del tema de lateritas, geofísica de superficie, sondeo eléctrico vertical de polarización inducida, Informe, EGMO.
- Homand-Etienne, F., Belen, T., Sabbadini, S., Shtuka, A., y Royer, J.J., 1995**, Analysis of the evolution of Rock Joints Morphology with 2-D autocorrelation (Variomaps), Application of Statistics and Probability, Lemaire, Favre and Mébarki (eds.), Balkema Rotterdam, p. 1229-1236.
- Host, G., Omre, H., y Switzer, P., 1995**, Spatial Interpolation Error for Monitoring Data, Journal of the American Statistical Association, Vol. 90, No. 431, p. 853-861.
- Ilidio L. D., 1999**, Análisis Variográfico del Yacimiento Camarioca Norte [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Isaaks, E. H y Srivastava, R.M., 1989**, Applied Geostatistics, New York Oxford, Oxford University Press, 561p.
- Isaaks & Co., 1999**, SAGE2001, A Spatial and Geostatistical Environment for Variography, San Mateo, California, <http://www.isaaks.com>, 67 p.
- Iturralde V.M., 1996**, Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba. Contribución Especial No. 1. IGCP Project W364. Miami. USA. 265 pp

- Jones, R.H., y Vecchia, A.V., 1993**, Fitting Continuous ARMA Models to Unequally Spaced Spatial Data, *Journal of The American Statistical Association*, Vol. 88, No. 423, p. 947-954.
- Jordan R. M., 2000**, Análisis Variográfico del Grupo VII del Yacimiento Martí [Trabajo de Diploma]. ISMM, Moa, Holguín.
- Journal, A. G. y Huijbregts, C. J., 1978**, *Mining Geostatistics*, Academic Press, New York, 600 p.
- Kiyono, J., y Suzuki, M., 1996**, Conditional Simulation of Stochastic Waves by Using Kalman Filter and Kriging Techniques, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 23-28, 8 p.
- Knipper A., y Cabrera R., 1974**, Tectónica y Geología Histórica de la Zona de Articulación entre el mio y eugeosinclinal de Cuba y el Cinturón hiperbasítico de Cuba. Contribución a la Geología de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. Pp 15-77.
- Krajewski, S. A. y Gibbs, B.L., 1993**, *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 93 p.
- Lajaunie, C., 1997**, Iterative Cross Validation, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, France, 8p.
- Lamorey, G., y Jacobsom, E., 1995**, Estimation of Semivariogram Parameters and Evaluation of the Effects of Data Sparsity, *Mathematical Geology*, Vol.27, No.3, p.327-358.
- Lantuéjoul, Ch., 1994**, Cours de Selectivité, Centre de Geostatistiqué, Ecole des Mines de París, 72 p.
- Lantuéjoul, Ch., 1997**, Iterative Algorithms for Conditional Simulation, E.Y.Baafi and N.A. Schofield (eds) *Geostatistics Wollongong'96*, Volume 1, p 27-40.
- Lantuéjoul, Ch., 1998**, Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Lavaut Copa, W., 1983**, Bases Metodológicas para el Cálculo Mecanizado de las Reservas Geológicas en los Minerales de la Corteza de Intemperismo según el método de Areas de Influencia, MIBAS.
- Lavaut Copa, W., 1987**, Control litológico mineralógico de la mineralización en la corteza de intemperismo de ultramáficas en el Campo Mineral de los yacimientos Punta Gorda, Las Camariocas y Piloto, Tesis Doctoral.
- Lavaut Copa, W., 1998**, Tendencias geológicas del intemperismo de las rocas ultramáficas en Cuba Oriental. *Minería y Geología* No. 15, pág. 9-16.

- Lavaut Copa, W., 2000**, Sobre el Estudio Preliminar de las Redes de Perforación y Muestreo para el Cálculo del Mineral Laterítico. E.G.M. Santiago de Cuba. 2 000.
- Legrá, A., 1994**, Consideraciones sobre el cálculo de volúmenes geólogo mineros por métodos clásicos, *Revista Minería y Geología*, Vol. XI, No. 2.
- Legrá, A., 1999**, Metodología para el pronóstico, planificación y control de la minería en yacimientos lateríticos, Tesis en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas, ISMM, Moa, Holguín.
- Legrá, A., Silva, O., y Belele O, 1999a**, Modelación de una superficie topográfica a partir de su relación entre Kriging y la interpolación lineal en R^n , *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 1.
- Legrá, A., Polanco, R, y Miranda, J. 1999b**, Propuesta para el establecimiento de la masa volumétrica en los yacimientos lateríticos de Cuba, *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 2.
- Legrá, A., y Guardiola R, 1999**, Contribución a la práctica del análisis variográfico y de la estimación por Kriging, *Revista Minería y Geología*, Vol. XVI, No. 2.
- Lepin, O. V., y Ariosa, J. D., 1986**, Búsqueda, Exploración y Evaluación Geólogo Económica de Yacimientos Minerales Sólidos, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, Primera Parte, 348 p, Segunda Parte, 191 p
- Lima Costa M., 1997**, Laterization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Explor. Mining Geol.*, vol 6, No.,1, pp 79-104,
- Lynx Mining Systems, 1998**, microLYNX98, MicroLYNX Reference Manual.
- Madani, H., 1998**, Geostatistical Ore Reserves Estimation of Mehdiarad Barite Mine, Iran, *Journées de Géostatistique, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, Fontainebleau, France, 25 et 26 Mai 1998*, 7p.
- Maisonneuve, F., 1998**, Essai de Géostatistique Lineaire, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de París, 21 p.
- Matheron, G., 1970**, “La Théorie des Variables Regionalisées et ses Applications” *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, Fascicule 5, Ecole des Mines de Paris*, 212 p.
- Matheron, G., y Kleingeld, W.J., 1987**, “The Evolution of Geostatistics”, APCOM 87. *Proceedings of the Twentieth International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries, Volume 3. Geostatistics. Johannesburg, SAIMM*, pp. 9-12.
- Mondelo, F., y Acosta, J., 1998**, Exploración detallada Camarioca Este. Informe, EGMO.
- Myers, D. E., 1991a**, Pseudo-Cross Variograms, Positive-Definiteness, and Cokriging, *Mathematical Geology*, Vol. 23, No.6, p.805-816.

- Myers, D.E., 1991b**, On Variogram Estimation, The Frontiers of Statistical Scientific Theory Industrial Applications (Volume II of the Proceedings of ICOSCO-I, The First International Conference on Statistical Computing).
- Myers, D.E., 1991c**, Interpolation and Estimation with Spatially Located Data, Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 11, Elsevier Science Publishers B.V., p.209-228.
- Myers, D.E., 1991d**, Multidimensional Multivariable Smoothing, Spatial Statistics Imaging, p. 275-285.
- Myers, D.E., 1992**, Kriging, Cokriging, Radial Basic Functions and The Role of Positive Definiteness, Computers Mathematical Application, Vol. 24, No.12, p.139-148.
- ONRM, 1999**, Clasificación de los recursos y reservas de minerales útiles sólidos, Ministerio de la Industria Básica, Oficina Nacional de Recursos Minerales, Dirección de Documentación, Ciudad Habana.
- ONU, 1996**, Marco Internacional de las Naciones Unidas Para la Clasificación de Reservas/Recursos, Combustibles Sólidos y Sustancias Minerales, Versión Definitiva. Establecida y Presentada por el Equipo Especial de las Naciones Unidad. p. 77-88.
- Pan, G., y Arik, A., 1993**, Restricted Kriging for Mixture of Grade Models, Mathematical Geology, Vol. 25, No. 6, p 713-736.
- Pannatier, Y., 1993**, Ms-Windows Program for exploratory variography and variogram modelling in 2D, International Workshop on Statistics of Spatial Processes-Theory and Applications, Bari, Italy 27-30 September 1993.
- Pardo Iguzquiza, 2002**, Comunicación personal por correo electrónico, PhD, Universidad de Granada.
- Pawlowsky, V., Olea, R.A., y Davis, J.C., 1994**, Additive Logratio Estimation of Regionalized Compositional Data: and Application to Calculation of Oil Reserves, Geostatistics for the Next Century, p.371-382.
- Pawlowsky, V., Olea, R.A., y Davis, J.C., 1995**, Estimation of Regionalized Composition: A Comparison of Three Methods, Mathematical Geology, Vol.27, No. 1, p.105-127.
- Peric, M., 1981**, Exploration of Burundi Nickeliferous Lateritic by Electrical Methods, Geophysical Prospecting, 29, pp 274-287.
- Pitard, F. F., 1994**, Exploration of the Nugget Effect, R. Dimitrakopolous (de.) Geostatistics for the Next Century, p.124-136.
- Proenza F. J., y Fernández, M. L, 1994**, Calculo de errores de evaluación de reservas minerales a través del análisis variográfico. Potencialidad de su utilización en los yacimientos ferroniquelíferos de Cuba oriental, Revista Minería y Gelogía, Vol. XI, No. 3. Pág. 27-30.

- Proenza F., J., 1997**, “Mineralización de Cromita en la faja ofiolítica Mayarí - Baracoa (Cuba). El ejemplo del yacimiento Merceditas”. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, España,.
- Queen, L.D., y Parkinson, G.J., 1998**, The Integration of Ground Penetrating Radar in Resource Delimitation for Nickel Laterites in Papua New Guinea.
- Quintas C.F., 1989**, Análisis Estratigráfico y Paleogeografía del Cretácico Superior y del Paleógeno de la Provincia Guantánamo y Areas Cercanas. [Tesis Doctoral], ISMM, Moa, Holguín.
- Quintero Silverio, A., Cuador Gil, J. Q., y Estévez Cruz, E., 2000**, Simulación no Condicional, Método de las Bandas Rotantes en 3D. Revista Minería y Geología, Vol. XVII, No. 1, pp 51-54.
- Quintero Silverio, A. y Cuador Gil, J. Q., 2000**, Análisis Estructural de la Porosidad Efectiva en el Horizonte Tobas Fina del Yacimiento Pina, Ciego de Avila. Revista Minería y Geología. Vol. XVII, Nos. 3-4, pp 19-22.
- Quintero Silverio, A., 2001**, Empleo de los métodos geoestadísticos y probabilísticos en el cálculo de reservas de petróleo en campos fracturado - porosos. (caso de estudio: campo petrolífero de Pina), Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UPR, Pinar del Río.
- Renard, D., 1998**, Notas de clases del curso Geoestadística No Estacionaria, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Curso: 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Rivoirard, J, y Guiblin, P., 1997**, Global Estimation Variance in Presence of Conditioning Parameters, E.Y.Baafi and N.A. Schofields (eds) Geostatistics Wollongong’96, Volume 1, p 246-257.
- Rivoirard, J., 1998**, Notas de clases del curso Simulación, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Cursos: 1995-96 y 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Rodríguez I. A., 1998**, Estudio Morfotectónico de Moa y Areas Adyacentes para la evaluación de riesgos de Génesis tectónica. [Tesis Doctoral]. I.S.M.M, Moa, Holguín.
- Roth, C., 1998**, Notas de clases del curso Geoestadística No Lineal, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG “Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística”, Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Sahin, A. Y Hassan, H.M., 1998**, Enhancement of Permeability Variograms Using Outcrop Data, The Arabian Journal for Sciences and Engineering, Vol. 23, No. 1C, p. 137-144.

- Schaug, J., Iversen, T., y Pedersem, U., 1993**, Comparison of Measurements and Model Results for Airborne Sulphur and Nitrogen Components with Kriging, *Atmospheric Environment*, Vol.27A, No. 6, p.831-844.
- Surfer® Version 7**, User Manual: Copyright © 1999. Golden Software, Inc.
- Vera Sardinas L. O., 2001**, Procedimiento para la determinación de las redes racionales de exploración de los yacimientos lateríticos de níquel y cobalto en la región de Moa, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM, Moa, Holguín.
- Vera Yeste A., 1979**, Introducción a los yacimientos de níquel cubanos, Ciudad de la Habana: ORBE.
- Wackernagel, H., 1994**, Cokriging versus Kriging in Regionalized Multivariate Data Analysis, *Geoderma*, 62, p- 83-92.
- Wackernagel, H., 1995**, "Multivariate Geostatistic, an Introduction with applications.", Berlin: Springer, 256 p.
- Wackernagel, H., 1998**, Notas de clases del curso Geoestadística Multivariada, en el Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-98, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de Paris, Fontainebleau, Francia.
- Wallace, M.K., y Hawkins, D.M., 1994**, Applications of Geostatistics in Plant Nematology, Supplement to Journal of Nematology 26 (45), p.626-634.
- Walpole, R.E. y Myers, R. H., 1996**, Probabilidad y Estadística, Cuarta edición, Ed. Mc Graw – Hill, México, 218 p.
- Webster, A. L., 1996**, Estadística aplicada a la Empresa y a la Economía. IRWIN, segunda edición. Madrid.
- Weerts, H.J.T. y Bierkens, M.F.P., 1993**, Geostatistical Analysis of Over Bank Deposits of Anamising and Meandering Fluvial Systems; Rhine-Meuse Delta, The Netherlands, *Sedimentary Geology*, 85, Elsevier Sciences Publishers B.V., p. 221-232.
- Xie, T., y Myers, D.E., 1995a**, Fitting Matrix-Valued Variogram Models by Simultaneous Diagonalization (Part I: Theory), *Mathematical Geology*, Vol. 27, No. 7, p. 867-875.
- Xie, T., y Myers, D.E., 1995b**, Fitting Matrix-Valued Variogram Models by Simultaneous Diagonalization (Part II: Application), *Mathematical Geology*, Vol. 27, No. 7, p. 877-888.
- Zhang, R., Myers, D. E., y Warrick, A. W., 1992**, Estimation of the Spatial Distribution of Soil Chemical Using Pseudo Cross-Variograms, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 56, No. 5, p.1444-1452.
- Zhang, X.F., Van Eijkeren, J.C.H., y Heemink, A.W., 1995**, On the Weighted Least Squares Method for Fitting a Semivariogram Model, Short Note, *Computers & Geosciences*, Vol. 21, No. 4, p. 605,608.

Zimmerman, D.L., 1993, Another Look at Anisotropy in Geostatistics, *Mathematical Geology*, Vol. 25, No. 4, p.453-470.

Zimmerman, D.L., y Zimmerman, M.B., 1991, A Comparison of Spatial Semivariograms Estimators and Corresponding Ordinary Kriging Predictors, *Technometrics*, Vol.33, No.1, p.77-91.