



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA MALLA DE MUESTREO DE
CORTO PLAZO DE LATERITAS NIQUELÍFERAS**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

JUAN DANIEL ANGULO ARGOTE

PROFESOR GUÍA

XAVIER EMERY

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ALEJANDRO CÁCERES SAAVEDRA

NADIA MERY GUERRERO

SEBASTIÁN HURTADO LAGOS

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN

Las lateritas niquelíferas son una fuente generadora de la materia prima del acero inoxidable, el níquel. Dicho elemento se encuentra presente en diferentes tipos de rocas que son formadas por procesos externos que alteran, meteorizan y por último transforman la roca madre del depósito.

La presencia de diferentes tipos de rocas, desde el punto de vista físico, químico, mecánico y, por último, de su contenido en mineralización en porcentajes (%) de níquel, hierro, magnesio, sílice, alúmina, entre otros, sugiere que cada tipo de roca debe estudiarse en forma propia. Cada perfil de meteorización o dominio geológico, conformado por diferentes tipos de rocas, tiene un comportamiento geoespacial diferente debido al proceso geológico de formación y enriquecimiento del depósito.

Surge entonces la pregunta de cómo diseñar una metodología para muestrear el perfil de meteorización para la optimización de la malla de muestreo a corto plazo, partiendo del muestreo realizado en exploración, para generar el respectivo modelo de recurso.

La metodología que se propone para determinar la malla de muestreo a corto plazo en lateritas niquelíferas, es la siguiente: análisis exploratorio y variográfico de datos espaciales, seguido de la construcción de múltiples escenarios mediante simulación Gaussiana secuencial y, a partir de los escenarios obtenidos, categorización de los recursos en cada dominio geológico usando gráficos tonelaje-ley sobre una ley de corte vs coeficiente de variación condicional (CCV). Lo anterior se aplica a varias mallas de muestreo tentativas para cada dominio geológico y permite estudiar y analizar la relación CBNT (relación costo/beneficio, número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio, tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta) para determinar la malla óptima de corto plazo en cada dominio.

Se ilustra la propuesta con un caso de estudio de una zona particular de una laterita niquelífera subdividida en tres dominios geológicos que cubren todo el perfil de meteorización.

ABSTRACT

The nickeliferous laterites are a source of the raw material of stainless steel, nickel. This element is present in different rock types that are formed by external processes that alter, weather and finally transform the bedrock of the deposit.

The presence of different rock types, from the physical, chemical, mechanical point of view and, finally, from their mineralization content in percentages (%) of nickel, iron, magnesium, silica, alumina, among others, suggests that each rock type must be studied separately. Each profile of weathering or geological domain, conformed by different rock types, has a different geospatial behavior, due to the geological process of formation and deposit enrichment.

The question arises of how to design a methodology to sample the weathering profile for the optimization of the sampling mesh in the short term, starting from the sampling done in exploration, to generate the respective resource model.

The methodology proposed to determine the short-term sampling mesh in nickeliferous laterites is the following: exploratory and variogram analyses of spatial data, followed by the construction of multiple scenarios using sequential Gaussian simulation and, with the scenarios obtained, classification of the resources in each geological domain using the tonnage of ore above cut-off vs conditional coefficient of variation (CCV) curves. The previous steps are applied to several tentative sampling meshes in each geological domain and allows studying and analyzing the relationships between costs, benefit, number of samples taken-laboratory results, time in drilling each domain, to determine the optimal short-term mesh for each domain.

The proposal is illustrated through a case study of a specific zone of a nickeliferous laterite divided into three geological domains that cover the entire weathering profile.

AGRADECIMIENTOS

Los agradecimientos siempre giran en torno a aquellas personas, lugares que de una u otra manera aportaron para alcanzar esta meta, la cual realmente comienza desde el 2008 cuando inicie mis estudios en geoestadística con el Diploma de Postítulo en Evaluación Geoestadística de Yacimientos de la Universidad de Chile, y ahora con el ingrediente del contexto minero de nivel extraordinario en conocimientos y experiencias, combinación perfecta para entender el impacto que genera cada variable que son cíclicas en el negocio minero, a su vez no estacionarias.

Primero quiero agradecer a Dios, el eje por el que giramos y estamos, a mi esposa llave, amiga confidente, que sin su apoyo principal no fuera posible este logro, a mis hijos David, Julieta y Juan Jacobo mis grandes tesoros. Mis padres, hermanos, sobrinos de ellos llevo su esencia es imborrable.

Un gran amigo que se convirtió en un hermano Carlos Andrés Villazón, su apoyo en Santiago fue increíble, no tengo palabras por tan valiosa amistad.

El Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile y todos los docentes, administrativos de quienes me llevo un recuerdo y aprendizaje eterno.

La Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) por el apoyo del proyecto CONICYT PIA Anillo ACT 1407.

Y no podría faltar ese gran ser humano que Dios puso en mi camino para enamorarme de la geoestadística, su sabiduría siempre la recuerdo y la llevo cada momento cuando tengo que analizar un fenómeno regionalizado, Xavier Emery gracias por tu apoyo en esta tarea que nunca termina porque siempre existe la incertidumbre en cada pasaje de variabilidad en nuestra vida.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción	1
1. Motivación del trabajo	2
2. Objetivos.....	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. Hipótesis.....	4
4. Alcance del estudio	4
5. Estructura de la tesis	5
6. Innovación	5
Capítulo 2. Antecedentes	6
1. El níquel: origen y propiedades	6
2. Estado del arte sobre optimización de mallas de muestreo	9
Capítulo 3. Caso de estudio: lateritas niquelíferas	11
1. Génesis del depósito	11
2. Ambientes geológicos	11
3. Lateritas Niquelíferas, caso Colombia	12
4. Ubicación del proyecto.....	13
5. Yacimiento	13
Capítulo 4. Metodología	15
Capítulo 5. Estudio exploratorio de datos (EDA)	16
1. Caso 1: Dominio Geológico 1 (DG1), base de datos (398 datos)	17
1.1. Despliegue de atributos (plantas y perfiles)	17
1.2. Desagrupamiento	19
1.3. Distribución de Leyes.....	20

1.4.	Comportamiento Direccional	22
1.5.	Análisis Bivariable	23
2.	Caso 2: Dominio Geológico 2 (DG2), base de datos (826 datos)	25
2.1.	Despliegue de atributos (plantas y perfiles)	25
2.2.	Desagrupamiento	27
2.3.	Distribución de Leyes	28
2.4.	Comportamiento Direccional	30
2.5.	Análisis Bivariable	32
3.	Caso 3: Dominio Geológico 3 (DG3), base de datos (197datos)	33
3.1.	Despliegue de atributos (plantas y perfiles)	34
3.2.	Desagrupamiento	36
3.3.	Distribución de Leyes	36
3.4.	Comportamiento Direccional	39
3.5.	Análisis Bivariable	40

Capítulo 6. Modelamiento Geoestadístico, Categorización de Recursos y Definición de Mallas Óptimas 42

1.	Variogramas experimentales y teóricos	42
1.1.	Caso 1: base de datos (398 datos), elemento níquel	42
1.2.	Caso 2: base de datos (826 datos), elemento níquel	43
1.3.	Caso 3: base de datos (197 datos), elemento níquel	44
2.	Validaciones Cruzadas	46
2.1.	Caso 1, DG1: elemento níquel	47
2.2.	Caso 2, DG2: elemento níquel	48
2.3.	Caso 3, DG3: elemento níquel	49
3.	Simulaciones	50
3.1.	Simulación secuencial Gaussiana	50
3.2.	Estrategias (mallas de muestreo) para cada dominio geológico	51
4.	Cálculo del coeficiente de variación condicional (CCV) para cada dominio geológico	52
5.	Categorización de Recursos Geológicos	61
5.1.	Código JORC	61
5.2.	El coeficiente de variación condicional como criterio de categorización	62

5.3. El gráfico tonelaje ley sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional)	63
6. Resultados	69
Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones	71
7.1 Conclusiones	71
7.2 Recomendaciones	72
Bibliografía	73
Anexos	

Capítulo 1. Introducción

En la práctica del muestreo espacial del suelo, el esquema de muestreo es un factor que influye en la eficiencia y los costos de un estudio. El muestreo intensivo es costoso, pero da una imagen clara de la variabilidad espacial de una variable regionalizada. El muestreo escaso, sin embargo, es barato pero puede no ser representativo de las características espaciales de dicha variable (Van Groenigen et al., 1999).

En la actualidad existen estudios de optimización de mallas de perforación, principalmente para exploración en la minería. En el caso de lateritas níquelíferas, el ingrediente geológico (perfiles de meteorización que presentan) hace pensar en diferentes mallas de muestreo en cada perfil de meteorización, para evaluar la incertidumbre en el corto plazo. Dentro de las herramientas geoestadísticas más usadas para definir mallas de muestreo, se tiene el alcance del variograma, la varianza de kriging, varianza de simulación, entre otras. Históricamente, la varianza de estimación de kriging ordinario se utilizó para determinar la exactitud de diferentes mallas de perforación (David, 1988; Journel and Huijbregts, 1978).

Interesa optimizar actividades que están relacionadas tales como: mallas de perforación para exploración-muestreo, voladura, carguío, acarreo y trituración en la operación minera de lateritas níquelíferas, donde cada una presenta situaciones para mejorar, pero el día a día de la operación no permite encontrar soluciones inmediatas. Para el caso de las mallas de muestreo en exploración de laterita níquelífera, se presentan sectores que geológicamente tienen tipos de roca diferentes, conocidos como perfiles de meteorización equivalentes a los dominios geológicos. Con todo esto se propone la construcción de una metodología que permita evaluar distintas estrategias (mallas de muestreo) con el fin de encontrar la malla óptima de muestreo a corto plazo para cada dominio geológico definido (DG) en la operación minera (producción) a partir de la malla de exploración utilizando técnicas geoestadísticas.

Para conocer parte de esta metodología de optimizar a partir de la malla de exploración a mallas de muestreo de corto plazo en la operación minera sobre estos depósitos. Más adelante se describe cómo es el proceso de formación geológica de estos depósitos.

El níquel es un elemento metálico que puede presentarse en distintas formas en la naturaleza: en depósitos de sulfuro, debido a la elevada afinidad que existe entre este elemento y el azufre, en lavas komatíticas y lateritas níquelíferas, siendo esta última donde se centra el presente estudio. Las lateritas níquelíferas básicamente son producto de alteración y meteorización de rocas ígneas ultra básicas,

principalmente peridotitas, donde se generan una serie de perfiles de meteorización (rocas y suelos residuales) con ciertos valores o leyes de concentración.

Las lateritas níquelíferas presentan una serie de dominios geológicos, donde cada dominio tiene su comportamiento geoestadístico relacionado con su variabilidad y heterogeneidad debido al tipo de roca o suelo asociado. El presente trabajo propone evaluar una serie de situaciones o estrategias que permitan obtener la mejor técnica o combinaciones geoestadísticas en una zona, dominio geológico total (DGT) donde se tiene todo el perfil de meteorización, de la malla de exploración geológica pseudo regular promedio de 25x25x1 metros (base de datos con 1421 datos), la cual a su vez se divide desde la parte inferior del perfil en DG1 (base de datos con 398 datos), DG2 (base de datos con 826 datos) y la parte superior del perfil DG3 (base de datos con 197 datos). En cada DG (dominio geológico) se proponen estrategias de mallas para determinar la malla de muestreo óptima (costo/beneficio) de corto plazo en la operación minera, que al final van a alimentar el modelo control de ley (MCL).

El estudio parte con el análisis exploratorio de datos (EDA) donde se evalúan las distintas variables (objetivo principal analizar el comportamiento del elemento níquel) que se obtienen del respectivo muestreo-análisis químicos, hasta proponer distintas estrategias para encontrar la más acorde y así obtener la malla de muestreo a corto plazo para la operación minera, con el ingrediente relación costo-beneficio-incertidumbre.

Para finalizar, lo que se pretende es construir una metodología que sirva como soporte guía para hacer optimización de mallas de muestreo a corto plazo, en cada dominio geológico definido (DG1, DG2 y DG3) en la operación minera de lateritas níquelíferas a partir de las mallas de exploración, basado en herramientas-técnicas geoestadísticas.

1. Motivación del trabajo

Descifrar los depósitos geológicos es un desafío desde el punto de vista de continuidad espacial-dominios geológicos vs mallas de muestreo. Cuantas muestras son las necesarias para evaluar dicho depósito y conocer de la forma más precisa y con la menor incertidumbre el contenido de sus leyes y tonelajes, en los presentes dominios geológicos definidos de una laterita níquelífera con un perfil de meteorización único en el mundo, donde la variabilidad vertical es mayor que la horizontal.

Por ende se pretende establecer una metodología que permita optimizar la malla de muestreo de corto plazo a partir de la malla de exploración usada para construir el modelo de recursos. La zona de estudio cubre todo el perfil de meteorización típico

del depósito, la cual se divide en tres dominios geológicos: DG1 (dominio geológico 1, la base del depósito, compuesto por la roca madre (peridotita) principalmente y peridotita saprolitizada); el DG2 (dominio geológico 2, parte intermedia del perfil; compuesto por saprolitos, sílice principalmente) y finalmente la parte superficial, materiales (rocas-suelos) con el mayor contenido de hierro del depósito (DG3) dominio geológico 3; lateritas, canga, sedimento, saprolito negro y taquilita.

El objetivo principal es encontrar la malla óptima de corto plazo para cada dominio geológico descrito anteriormente, usando una metodología basada en estudios geoestadísticos. En la actualidad se utiliza una sola malla de muestreo de corto plazo (5mx5mx7m) en todo el depósito para evaluar el modelo de control de ley (MCL).

Finalmente se busca crear una metodología para optimizar la malla de muestreo de corto plazo de lateritas níquelíferas usando técnicas geoestadísticas. Dicha metodología debe ser útil para otras variables regionalizadas que quieran optimizar la malla de muestreo de corto plazo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Establecer y determinar una metodología para optimizar la malla de muestreo de corto plazo de lateritas níquelíferas, a partir de la malla de exploración, usando técnicas geoestadísticas. Se proponen diferentes estrategias (mallas de muestreo), con el fin de encontrar la relación CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta) para determinar la malla óptima de corto plazo para los dominios DG1, DG2 y DG3, estableciendo umbrales en la categorización de los recursos en medidos, indicados e inferidos, como criterio usando el código JORC.

2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Realizar el análisis exploratorio de datos (EDA) en cada una de las variables presentes (níquel, hierro, sílice, magnesio, alúmina) para los tres dominios geológicos (DG1, DG2 y DG3), con el fin de tener un contexto general del comportamiento de cada variable regionalizada de las lateritas níquelíferas.
- ✓ Establecer y proponer diferentes escenarios o “estrategias” de mallas de muestreo de corto plazo, basados en la relación costo beneficio usando técnicas de simulación geoestadística.

- ✓ Analizar la relación muestreo con la incertidumbre de las leyes y tonelajes para el caso de los valores de níquel y qué tanto afectan la categorización de los recursos, usando las curvas tonelaje ley sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional).
- ✓ Determinar una metodología de trabajo o secuencia para una posterior aplicación a otras variables regionalizadas.

3. Hipótesis

Existen criterios para hacer formulaciones de hipótesis de trabajo como son: pertinencia, plausibilidad, verificabilidad y simplicidad. Dentro de la hipótesis de trabajo que se propone, es encontrar la malla de muestreo óptima de corto plazo en la operación minera de lateritas niquelíferas para cada dominio establecido, partiendo de la malla de exploración, la cual es pseudo regular. En la actualidad la malla de muestreo de corto plazo es de 5mx5mx7m para todo el depósito, la cual es usada en la construcción del modelo control de ley (MCL).

Se busca evaluar distintas estrategias que permitan encontrar al final una metodología clara y práctica para la optimización de las mallas de muestreo de corto plazo partiendo de la malla de exploración en lateritas niquelíferas, para los dominios geológicos; DG1, DG2 y DG3 del atributo níquel.

En la actualidad la malla de muestreo de corto plazo es única para todo el depósito, tanto zonas con baja, mediana y alta variabilidad, lo cual no es lógico, como es de conocer que las lateritas niquelíferas presentan diferentes perfiles de meteorización, lo equivalente a dominios geológicos, que presentan comportamientos diferentes desde el punto de vista de variabilidad espacial de los atributos, en nuestro caso de interés el níquel.

4. Alcance del estudio

Dentro del marco conceptual que se pretende establecer en la optimización de mallas de muestreo de corto plazo de lateritas niquelíferas a partir de la malla de exploración, se busca proponer diferentes estrategias, que al final permitan ver cuáles son sus impactos desde el punto de vista económico-incertidumbre, para armar una metodología clara, la cual se pueda extrapolar a cualquier variable regionalizada. A continuación se mencionan las actividades a desarrollar para trazar los alcances esperados.

1. Análisis exploratorio de datos (EDA); distribución de leyes, comportamiento espacial direccional, herramientas bi y multivariadas (Deutsch and Journel, 1998).

2. Realizar variografía para el elemento níquel: variogramas experimentales-teóricos y validación cruzada para los DG1, DG2 y DG3
3. Probar diferentes estrategias (mallas de muestreo) en base a las cuales construir varios escenarios de la distribución espacial de níquel por simulación geoestadística. Al obtener la media y la varianza condicional para cada bloque de interés gracias a los escenarios construidos, se determina el CCV (coeficiente de variación condicional) de cada bloque.
4. Al obtener el CCV de cada bloque determinado en cada estrategia de malla en el respectivo dominio geológico a evaluar, se analiza las gráficas; tonelaje sobre una ley de corte en cada dominio geológico vs CCV.
5. Finalmente se busca definir cuál es el costo de cada malla y cuánto beneficio genera (al mejorar las estimaciones de recursos y reducir la incertidumbre). Con esto se define los costos y beneficios de cuánto dinero se gana si se obtiene menos incertidumbre y sus impactos en la categorización de los recursos en medidos, indicados e inferidos.

5. Estructura de la tesis

Ya definidos los temas a presentarse, los objetivos y alcances de este trabajo, se hará una breve descripción de los aspectos principales abarcados en cada uno de los capítulos.

En el Capítulo 2 y 3 se presentan los antecedentes, estado del arte y estudio geoestadístico.

En el Capítulo 4 se presenta la información con respecto al caso de estudio, metodología de tesis, programación de las actividades y demás.

6. Innovación

En cuanto a la innovación de esta tesis con respecto a la metodología a desarrollar, se analizan los casos existentes en el uso de técnicas geoestadísticas en otro tipo de minería (mineral) o variable regionalizada, todo esto para aplicarlo al muestreo de corto plazo de lateritas níquelíferas con el principal objetivo de optimizar este proceso y ser buscar la máxima productividad, uno de los pilares de la minería del futuro, en este caso para lo referente a muestreo.

Capítulo 2. Antecedentes

El diseño del muestreo es un problema de larga data que, con limitaciones de tiempo y presupuesto, puede ocasionar errores de medición y de predicción esperados en los atributos considerados (Cochran 1977, De Gruijter et al. 2006, Gilabert 2007; Mandallaz 2007).

Cualquier operación minera se basa en la relación costo-beneficio-productividad. Para el caso de las mallas de muestreo de corto plazo, donde existen factores como costo-productividad-incertidumbre de las leyes-tonelaje que juegan un rol muy importante en el cumplimiento del mineral para un proceso dado, se deben tomar todas las medidas necesarias para no pecar en exceder el número de barrenos o perforaciones o falta de alguna de ellas para evaluar el atributo de interés. A continuación se hace una breve reseña del níquel como atributo de interés, el cual es el objetivo del presente estudio de las lateritas niquelíferas.

1. El níquel: origen y propiedades

El níquel es considerado el quinto elemento más común refiriéndose al globo terráqueo en su totalidad, es decir, corteza, núcleo y manto y el número 22 entre los elementos de la corteza terrestre con el 0.008%. Es metálico magnético, de aspecto blanco plateado y usado principalmente para la producción de acero inoxidable y en aleaciones. Se encuentra en combinación con otros elementos y en minerales como la pirrotina, millerita, pentlandita, niquelita, y garnierita, siendo estos dos últimos los más comúnmente explotados. Puede ser encontrado en los meteoritos junto con el hierro como níquel metálico.

Las menas de níquel contienen generalmente impurezas, sobre todo de cobre. Las menas que son sulfuros, como la pentlandita y la pirrotina niquelífera, se suelen fundir en altos hornos y se envían en forma de matas de sulfuro de cobre y níquel a las refinerías, en donde se extrae el níquel mediante procesos diversos. En el proceso electrolítico, el níquel se deposita en forma de metal puro, una vez que el cobre ha sido extraído por deposición a un voltaje distinto y con un electrolito diferente. El proceso de MOND, consiste en hacer pasar monóxido de carbono sobre el mineral molido y fundido y recoger el carbonilo de níquel generado, que más tarde se descompone liberando el níquel metálico.

El níquel es un elemento químico de número atómico 28, peso atómico 58,7 y símbolo Ni, situado en el grupo 10 de la tabla periódica de los elementos - elemento de transición - y clasificado como metal ferroso por pertenecer a la tríada del hierro: hierro, níquel y cobalto. Es un metal duro, de aspecto blanco plateado, maleable y dúctil, que puede presentar un intenso brillo. Tiene propiedades magnéticas por debajo de 345°C. Aparece bajo cinco formas isotópicas diferentes y es muy activo

químicamente cuando se trata de níquel metálico. Es soluble en ácido nítrico diluido, y se convierte en pasivo (no reactivo) en ácido nítrico concentrado. Es resistente a varios químicos reductores y no reacciona con los álcalis ácidos. Tiene un punto de fusión de 1.453°C , un punto de ebullición de 2.730°C , y su densidad es de 8908 kg/m^3 , tiene una alta temperatura de Curie y buenas propiedades magnetoresistivas.

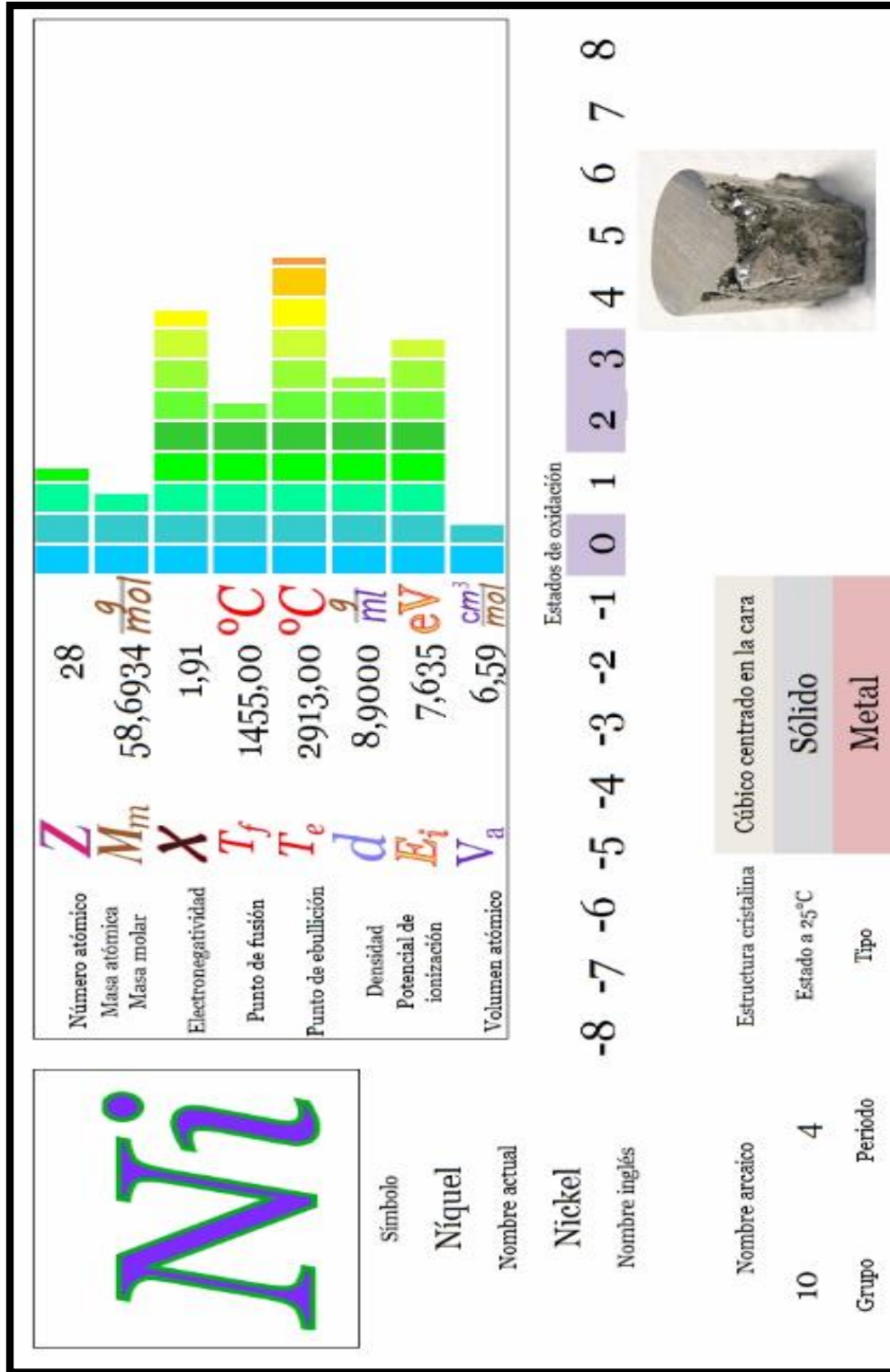


Tabla 1. Propiedades del níquel

Fuente: <http://cienciasdejoseleg.blogspot.com.co/2012/04/propiedades-periodicas-del-niquel.html>

2. Estado del arte sobre optimización de mallas de muestreo

En el caso de estudio considerado en esta tesis, la malla de perforación que es usada en la evaluación de recursos suele tener un patrón pseudo-regular de 25x25x1 metro. El patrón espaciado debe optimizarse para maximizar los beneficios de la minería, costo-tiempo de la perforación y el valor de la información adicional aumentando la densidad de perforación, y también para reducir el riesgo en toneladas de mineral minado y las leyes a un nivel aceptable en la categorización de los recursos en cada estrategia a usar (malla de muestreo).

El modelo de bloque estimado basado en la información de perforación recolectada durante la etapa de exploración no es apropiado para la planificación de minas a corto y mediano plazo. Por lo tanto se requiere información adicional previa a la extracción para diversos propósitos. En la mayoría de las situaciones, la reducción de la incertidumbre general sobre la estimación es el objetivo principal de la perforación adicional y la recolección de muestras. El tema de seleccionar la ubicación óptima para perforaciones exploratorias adicionales ha sido de interés para los ingenieros de minas y geoestadísticos en la segunda mitad del siglo pasado, pero no es sencillo optimizar las perforaciones adicionales, porque muchos estudios se basan en el espacio 2D y no consideran la extensión 3D de las perforaciones y el modelo de bloque (Soltani, 2013).

En este contexto, la geoestadística proporciona un conjunto de herramientas y métodos para modelar la distribución espacial de variables regionalizadas, lo cual ha sido ampliamente empleado para determinar el espaciado óptimo de las perforaciones. Es así como, históricamente, la varianza de kriging ordinario o kriging universal ha sido utilizada para determinar la exactitud de los diferentes espaciados de las perforaciones (David, 1988; Journel and Huijbregts, 1978; Brus and Heuvelink, 2007). Una vez que la evaluación de perforación ha sido colectada para producir un variograma razonable, se puede diseñar varias mallas de perforación usando la varianza de kriging, ya que sólo depende de la ubicación de los datos y no de la magnitud de los datos mismos.

Los métodos de simulación condicional pueden determinar el espaciado de las mallas de perforación en áreas que muestran un efecto proporcional, donde la varianza se relaciona con la media local (caso de heteroscedasticidad, donde los valores locales de media y varianza fluctúan), en lugar de homocedasticidad (media y varianza constantes), como se supone en el uso de la varianza de kriging. A diferencia del kriging, la simulación condicional tiene en cuenta la variabilidad local, de modo que las áreas con valores más altos pueden ser modeladas con mayores varianzas entre diferentes simulaciones (Boyle, 2009; Dimitrakopoulos et al., 2010).

La localización de perforaciones adicionales basadas en la información obtenida de la perforación inicial es un paso muy difícil para tomar decisiones en el proceso de exploraciones detalladas. Las ubicaciones apropiadas para perforaciones adicionales son aquéllas en las que la información recopilada desde la perforación, tiene más valor en comparación con la de otros lugares (Saeed Soltani-Mohammadi, 2013).

Encontrar la solución para un problema de optimización en la minería, no es algo nuevo, porque tal problema como planificar, mezclar y localizar se han resuelto con perforaciones adicionales utilizando métodos globales de optimización como el SA (recocido simulado) y otros métodos de búsqueda heurísticos. Las razones para su alto uso son: (1) no tienen que incorporar suposiciones de problemas; y (2) encuentran rápidamente una solución global casi óptima (Saeed Soltani-Mohammadi, 2013).

Capítulo 3. Caso de estudio: lateritas niquelíferas

1. Génesis del depósito

La génesis de los depósitos niquelíferos puede ser explicada mediante diversos procesos naturales (Energética, Unidad de Planeación Minero, 2009):

1. Depósitos de Cu-Ni originados mediante un proceso denominado licuación, producto de la diferenciación magmática. Es una forma de segregación dada la inmiscibilidad de los componentes del magma. Así, en una mezcla de magmas sulfúricos con magmas silicatados, ellos mismos tenderán a segregarse mediante la separación de gotas de azufre (S), las cuales posteriormente coalescen para formar glóbulos más densos que el magma, acumulándose en la base de la intrusión o fluido de lava. El sulfuro de hierro es el principal constituyente de estas gotas, las cuales a su vez se asocian a rocas básicas y ultrabásicas, ya que el sulfuro y el hierro son más abundantes en dichas rocas que en las rocas ácidas o intermedias. Los elementos calcófilos tales como Ni, Cu y algunos metales del grupo del platino, también tienden a formar parte de estas gotas de azufre.

La acumulación de gotas de sulfuro de Fe-Ni-Cu en una fracción silicatada puede producir depósitos masivos de sulfuros. Estos depósitos se encuentran cubiertos por una zona de silicatos secundarios rodeados por una red de sulfuros. Esta zona, a su vez, está cubierta por una débil mineralización, la cual tiene un alto grado de recubrimiento de peridotita, gabro o komatita, dependiendo de la naturaleza de la fracción de silicato asociado.

2. Mediante algunos procesos metamórficos se han podido originar depósitos diseminados de Ni en diques de rocas ultramáficas.
3. Al formarse algunos depósitos residuales se originan las lateritas niquelíferas. Los depósitos residuales se forman por la acción de un clima tropical intenso sobre rocas como la peridotita y serpentinita que poseen cantidades trazas de Ni, alrededor de 0,25%. Durante la laterización de dichas rocas, el níquel temporalmente se va en solución, pero, en general, es rápidamente reprecipitado junto con los minerales de óxido de hierro en la laterita, garnierita u otros filosilicatos niquelíferos.

2. Ambientes geológicos

Dentro de los ambientes más comunes donde se pueden encontrar depósitos de níquel se encuentran:

- ✓ Depósitos de sulfuro de níquel, debido a la gran afinidad que existe entre este elemento y el azufre.
- ✓ Lavas fluídas komatíticas.
- ✓ Lateritas níquelíferas (en este modelo conceptual geológico se encuentra la base de datos a estudiar y analizar para la optimización de la malla de muestreo para corto plazo).

3. Lateritas Níquelíferas, caso Colombia

Los depósitos de lateritas níquelíferas contienen Ni en asociación con el cobalto (Co), en óxidos formados en la superficie de los depósitos. Aunque las leyes de Ni encontradas son menores del 2% de níquel y más comúnmente iguales o menores del 1% de níquel, los depósitos pueden ser extensos, con más de 100 millones/ton. Este tipo de depósitos proporciona en el mundo una parte significativa de la producción de Ni, pero se requiere de un gran capital para cubrir los gastos del complejo proceso de tratamiento de las lateritas.

Muchos de estos depósitos se forman a partir de la alteración superficial de peridotitas, durante un proceso activo, bajo determinadas condiciones climáticas y topográficas, que se denomina laterización. Los cambios bruscos de temperatura y la circulación subterránea de las aguas de infiltración, alteran gradual y progresivamente a la roca, predominando la acción geoquímica de disolución o el ataque mecánico de la erosión. Las aguas se infiltran por las fisuras o diaclasas y ponen rápidamente en solución a los silicatos de hierro y magnesio anhidros. Durante el proceso, la peridotita adquiere un mayor grado de porosidad y permeabilidad, facilitando la penetración y circulación de las aguas de infiltración y el ataque continuo a la peridotita fresca por reacciones geoquímicas, también se produce la eliminación de los productos en solución durante algún tiempo después de períodos de lluvias intensas.

En la mayoría de los casos la masa laterítica, muestra que la peridotita alterada presenta texturas progresivamente más terrosas hacia la superficie, a la vez que se produce el enriquecimiento en níquel; luego se observa un empobrecimiento en níquel y magnesio, y un enriquecimiento en hierro y cobalto. El límite que separa las zonas enriquecidas en níquel de las enriquecidas en hierro generalmente es pronunciado y se manifiesta en un cambio de color, que se convierte en marrón oscuro al pasar de la peridotita terrosa mineralizada a la laterita. El espesor de la laterita "in situ" representa el residuo insoluble de la masa de peridotita infrayacente de la cual teóricamente se ha liberado una cantidad de níquel, que puede concentrarse debajo de la laterita o en sus cercanías. En contraste, las lateritas que han sufrido transporte no proporcionan indicación alguna de la roca madre ni de las

eventuales concentraciones niquelíferas. Las aguas superficiales que se infiltran, probablemente ácidas, atraviesan la laterita porosa y se mantienen durante algún tiempo en la porción inferior plástica de esta zona, poniendo a los minerales que se encuentran en la peridotita alterada en soluciones, que pueden precipitarse al descender, constituyendo entonces las concentraciones explotables de Níquel, que también pueden ser arrastrados en solución. A continuación, en la Figura 1 se presenta un esquema del perfil del suelo del complejo laterítico.

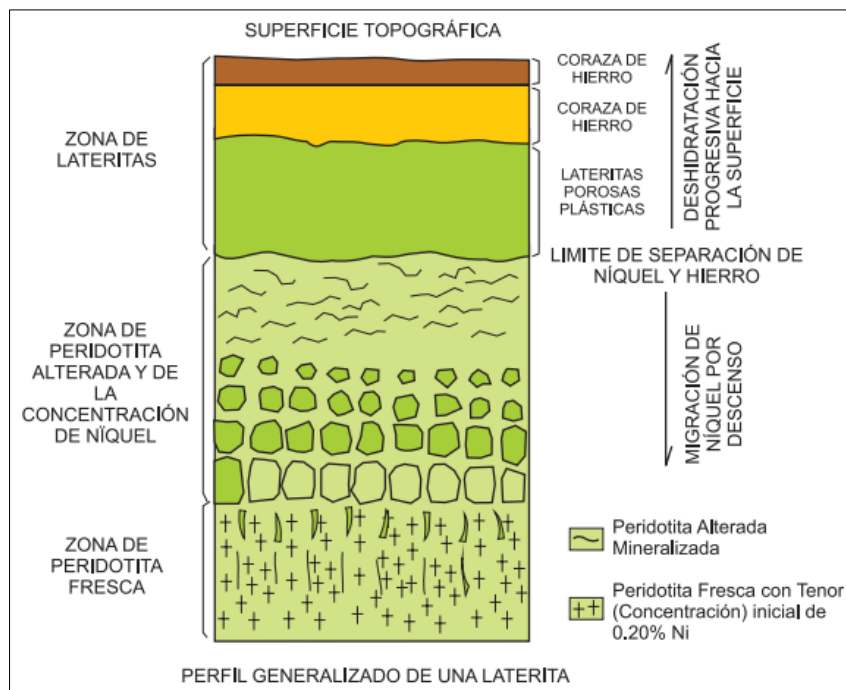


Figura 1. Superficie topográfica. Fuente: Balance Minero Nacional Parcial 2007 para 3 minerales. UPME, diciembre de 2007.

4. Ubicación del proyecto

El trabajo se desarrolla en una base de datos de exploración real (DGT; dominio geológico total), la cual es subdividida en tres dominios geológicos (DG1, DG2 y DG3) en un depósito de laterita niquelífera ubicado en Colombia, en el municipio de Montelíbano, Córdoba (Matoso, 2008), ver figura 2.

5. Yacimiento

Los datos son tomados de una zona particular de una laterita niquelífera (DGT; 1421 datos), la cual es subdividida en dominios geológicos; DG1, DG2 y DG3 respectivamente.

- DG1 (398 datos distribuidos en pozos verticales); base del depósito, zona compuesta principalmente por la roca madre; peridotita y peridotita saprolitizada.
- DG 2 (826 datos distribuidos en pozos verticales); zona intermedia del perfil de meteorización (de principal interés por el mayor enriquecimiento de níquel), compuesta por saprolito verde de alto-bajo magnesio y sílice principalmente.
- DG 3 (197 datos distribuidos en pozos verticales); zona superior del perfil de meteorización (con el mayor enriquecimiento de hierro y alúmina), compuesta por taquilita, saprolito negro, laterita alto-bajo hierro, canga y sedimento.



Figura 2. Ubicación Mina Cerro Matoso (Colombia), imagen tomada de Google Earth.

Capítulo 4. Metodología

Dentro de la propuesta de trabajo que se busca consolidar es construir una metodología clara, práctica y sencilla en la optimización de la malla de muestreo de la operación de lateritas níquelíferas a partir de la malla de exploración. A continuación, se hace un breve resumen de la metodología.

1. Se define una zona que tenga todo el perfil de meteorización general, denominado dominio geológico total (DGT). Se divide en tres dominios geológicos de la parte inferior a la superior; DG1, DG2 y DG3 como eje principal de estudio el atributo níquel.
2. Se revisan los respectivos datos (DG1, DG2 y DG3) haciendo una validación de la base de datos aplicando estudio de datos espaciales (ESDA)
3. Al obtener los respectivos datos validados en cada dominio geológico (DG1, DG2 y DG3), se proponen unas estrategias de trabajo, las cuales serán explicadas en el capítulo 6.
4. Se transforman los datos a una distribución normal de media cero y varianza uno (anamorfosis).
5. Se realiza un variograma con los datos transformados.
6. Al tener el variograma transformado, se construye 100 realizaciones (simulación gaussiana secuencial para el elemento níquel) en una malla de 1x1x1 metro, que se considerará la “realidad” del yacimiento.
7. Se procede a obtener los datos para cada estrategia (malla), muestreando la simulación exhaustiva. Por ejemplo, se probarán mallas de 5x5x7 metros, 6x6x7 metros, entre otras.
8. Para cada estrategia de malla (por ejemplo, malla de 5x5x7 metros) y dominio geológico (DG1), nuevamente se simula el elemento níquel (esta vez, con 100 realizaciones) y se rebloquea cada realización a soporte de bloques de 6x6x7m.
9. Al final para cada estrategia (malla de muestreo) con su respectivo dominio geológico, se mide el coeficiente de variación condicional (CCV) obtenido de la simulación gaussiana secuencial de cada bloque.
10. Finalmente se hace una categorización de los recursos para cada estrategia, tomando el código JORC de la malla a estudiar en cada dominio geológico, determinando el número de bloques que cumplan una ley de corte y ley media. Con todo esto se definen los bloques que son medidos, indicados, inferidos y con esto se comparan la relación CBNT (costo/beneficio/número de muestras tomadas-resultados laboratorio/tiempo en perforar cada dominio) para determinar la malla óptima de corto plazo para los dominios DG1, DG2 y DG3, todo esto se explica en detalle en el capítulo 6.

Capítulo 5. Estudio exploratorio de datos (EDA)

El análisis geoestadístico utiliza, en primera instancia, los métodos exploratorios que permiten analizar la distribución y la homogeneidad de los datos en el espacio, y buscar las observaciones “atípicas”. Dentro de los respectivos análisis a realizar es la validación de la base de datos para una división del conjunto de datos en varios grupos cuyo estudio se realizará separadamente, y se juzgará la pertinencia de una hipótesis de estacionaridad para representar la regionalización (Emery, 2000).

Cuando los datos son numerosos, su descripción mediante histogramas es útil para detectar los valores aberrantes o sospechosos. Hay que destacar que un dato sospechoso no es forzosamente falso y nunca debe ser eliminado sin razón. Podría muy bien reflejar el comportamiento real de la regionalización; eliminarlo impediría prever la ocurrencia de tales valores singulares en zonas no muestreadas.

El presente trabajo se basa en analizar, estudiar y validar los dominios geológicos establecidos denominados; DG1, DG2 y DG3, a las cuales se estudian los elementos: níquel (Ni), hierro (Fe), magnesio (MgO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), y tipo de roca (Rock Type). A continuación se describe la metodología de trabajo:

1. Del dominio geológico total (DGT) se divide en tres dominios geológicos; DG1, DG2 y DG3, de la parte inferior hacia la parte superior del perfil de meteorización.
2. Validaciones de las bases de datos aplicando estudio de datos espaciales (ESDA) que comprende herramientas univariadas, herramientas bivariadas, herramientas multivariadas, y herramientas espaciales.

En la figura 3 se presenta el área de la mina con las perforaciones de exploración. En color rojo se observa el dominio geológico total (DGT), el cual es dividido en DG1, DG2 y DG3 para realizar el estudio.



Figura 3. Ubicación del dominio geológico total (color rojo) en el área de la mina, perforaciones en color verde (exploración). Fuente: base de datos propia tomado del software Geovia Surpac 6.6.2.

1. Caso 1: Dominio Geológico 1 (DG1), base de datos (398 datos)

La presente base de datos cuenta con 398 datos, es tomada del plan de perforaciones de exploración del dominio geológico total (DGT) para construir el modelo de recursos. Se trata de una malla pseudo regular de 25x25x1 metro. El área de trabajo (coordenadas) se indica en la Tabla 2.

A continuación, se presenta la metodología usada para el análisis del estudio exploratorio de datos (EDA).

Coordenadas	Mínimo(m)	Máximo (m)
Este	945	1100
Norte	2000	2220
Cota	30.81	83.69

Tabla. 2 .Coordenadas base de datos Caso 1. Fuente: propia generada con el software gslib.

1.1. Despliegue de atributos (plantas y perfiles)

A continuación se presentan plantas y perfiles de la base de datos del caso 1, donde se aprecia la malla de muestreo promedio 25x25x1 metro.

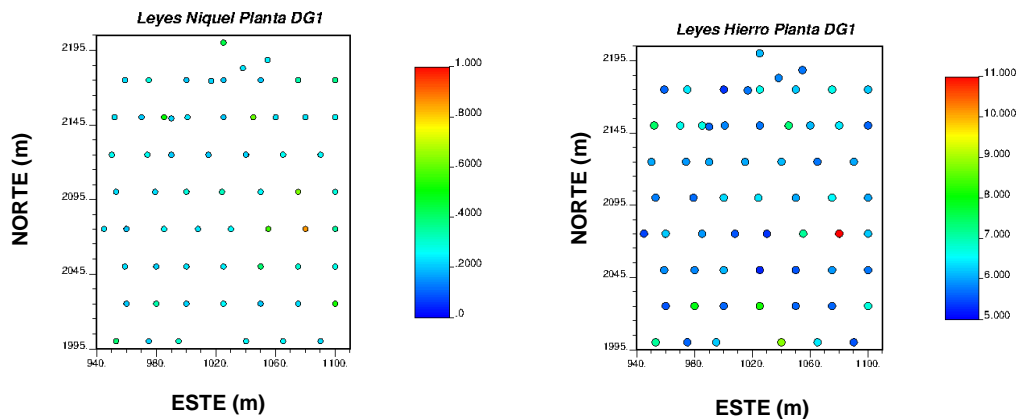


Figura 4. Mapa planta (XY) leyes de níquel, (izquierda) y hierro (derecha) DG1, usando el software gslib.

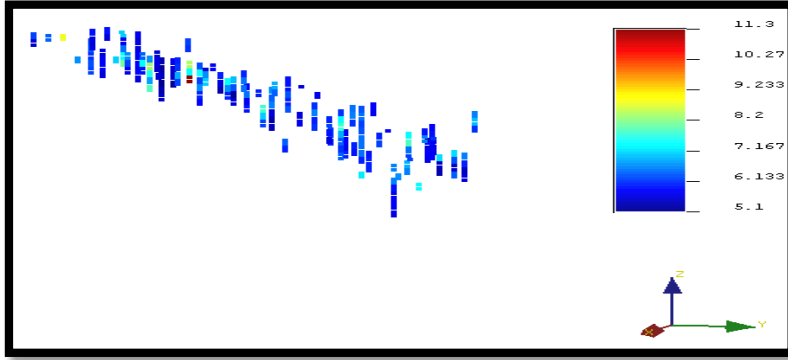


Figura 5. Perfil leyes de hierro (DG1), usando el software SGeMS.

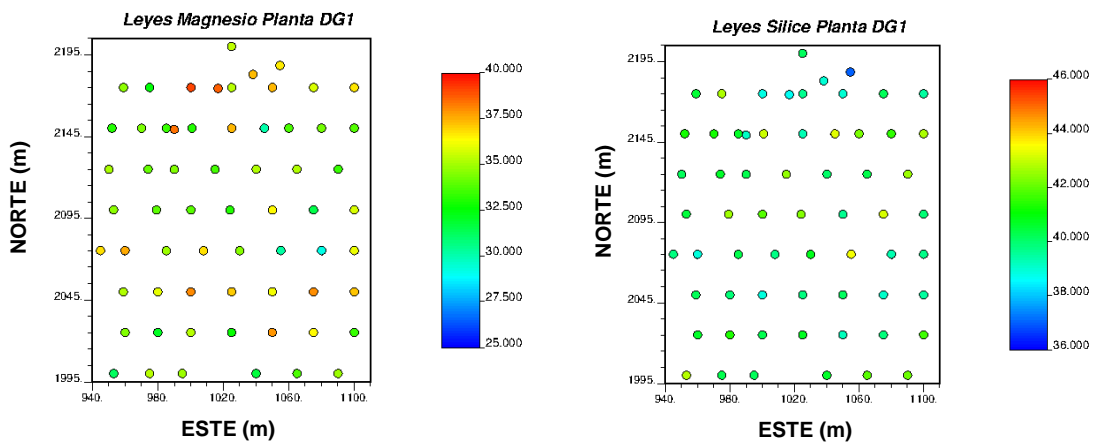


Figura 6. Mapa planta (XY) leyes de magnesio, (izquierda) y sílice (derecha) DG1, usando el software gslib.

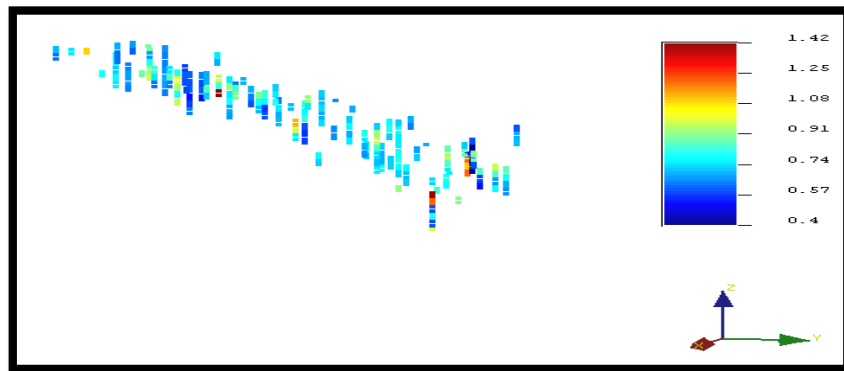


Figura 7. Perfil leyes de alúmina DG1, usando el software SGeMS.

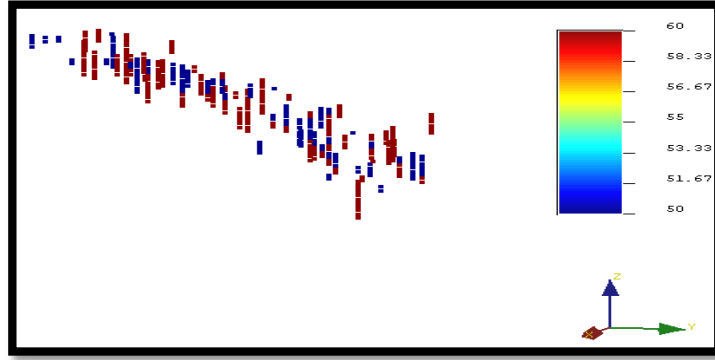


Figura 8. Perfil de meteorización tipo de roca DG1, usando el software SGeMS.

Análisis de los atributos en plantas y perfiles:

- La malla promedio del muestreo de exploración es de 25x25x1 metro
- El enriquecimiento de la zona de estudio caso 1 es el siguiente: níquel, hierro, alúmina aumentan hacia los niveles superiores y magnesio-sílice aumentan hacia los niveles inferiores. Es lógica dicha apreciación con los procesos geológicos de formación.
- Las perforaciones son verticales, longitud máxima perforada 52 metros.

1.2. Desagrupamiento

La operación de desagrupamiento consiste en ponderar los datos en función de su grado de aislamiento: mientras más aislado, más ponderación.

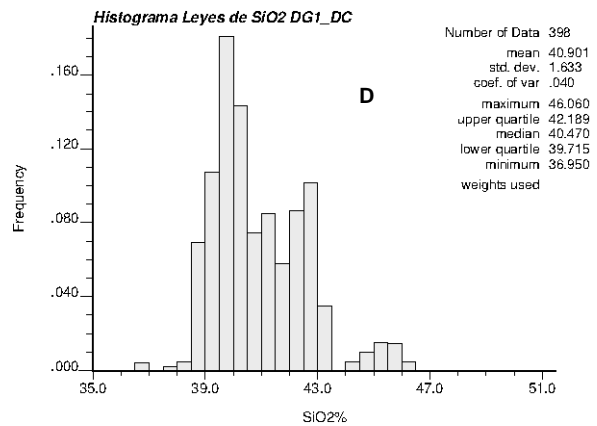
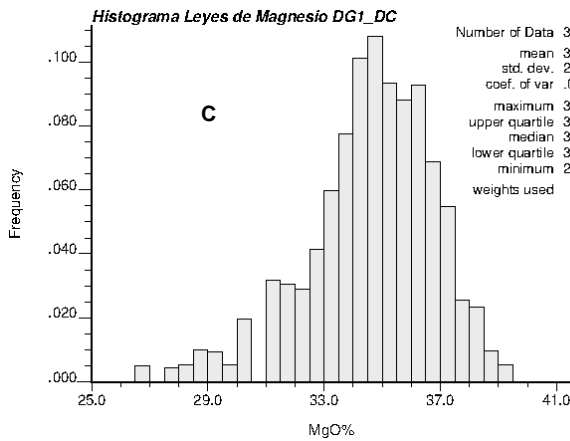
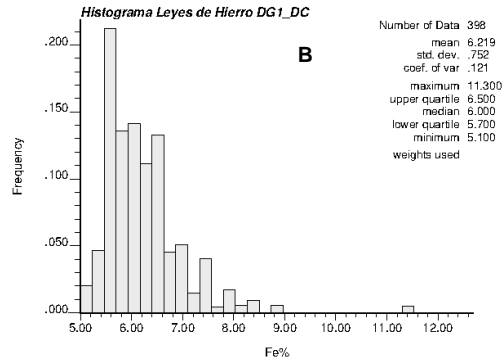
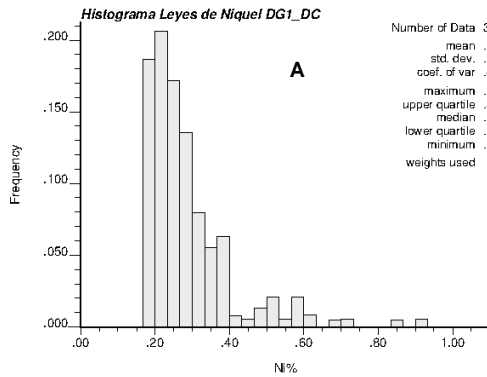
El método de las celdas es el método usado a los casos de estudios del presente trabajo, en donde el ponderador asignado a un dato es inversamente proporcional a la cantidad de datos ubicados en una celda rectangular centrada en el dato objetivo. A continuación, se presenta en la Tabla 3 las estadísticas desagrupadas y no desagrupadas para el caso 1. Las medias no desagrupadas vs las medias desagrupadas no cambian significativamente, debido al muestreo pseudo regular. Tamaño de la celda 25x25x1.

Atributo Datos	Medidas de Posición (No Desagrupada) %			Medidas de Dispersión (No Desagrupada) %		Media Desagrupada %
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coefficiente de variación	
Níquel (Ni)	0.293	0.2	0.91	0.12	0.40	0.293
Hierro (Fe)	6.230	5.1	11.3	0.76	0.12	6.219
Magnesio (MgO)	34.55	26.6	39	2.23	0.06	34.545
Sílice (SiO ₂)	40.89	36.95	46.06	1.65	0.04	40.901
Alúmina (Al ₂ O ₃)	0.751	0.4	1.42	0.15	0.20	0.750
BASE DE DATOS CASO 1						

Tabla 3. Estadísticas caso 1 (medidas de posición y dispersión), media agrupada y desagrupada.

1.3. Distribución de Leyes

A continuación, se calcularon todos los histogramas de los elementos, níquel, hierro, magnesio, sílice y alúmina con los datos desagrupados. Se aprecia cierta tendencia, distribución lognormal de solo una población de datos (elementos magnesio y alúmina), con algunas fluctuaciones estadísticas. Por otra parte, se aprecian algunos valores atípicos, por ejemplo elemento hierro con valores por encima de 11%.



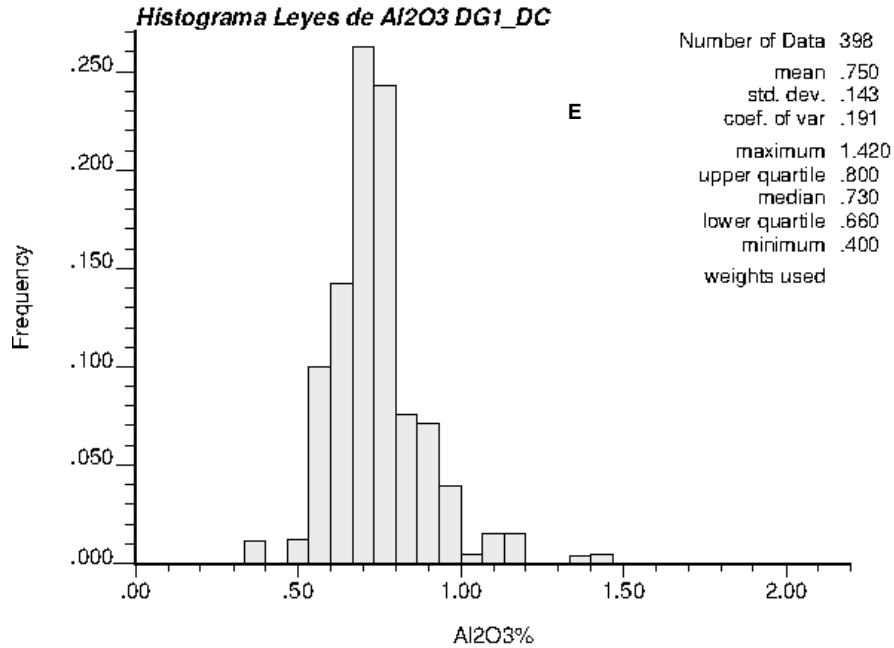
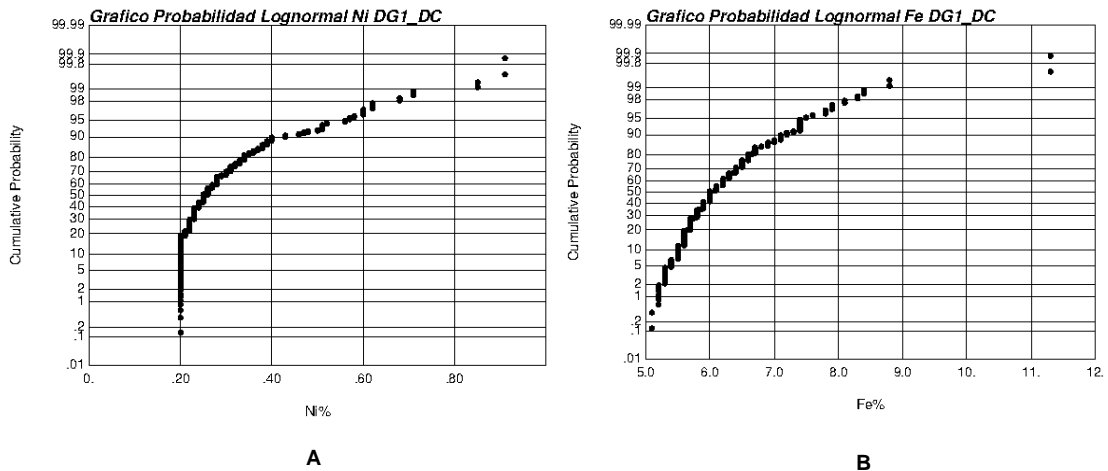


Figura 9. Distribución de leyes, histogramas desagrupados de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 1 (DG1) usando el software gslib.

A continuación, se presentan los gráficos de probabilidad lognormal para todas las variables del caso 1, ver figura 10. Es notable la presencia de una sola población de datos de tipo lognormal en casi todos los elementos estudiados. Nuevamente, se observa la existencia de valores atípicos, para los elementos níquel y hierro principalmente.



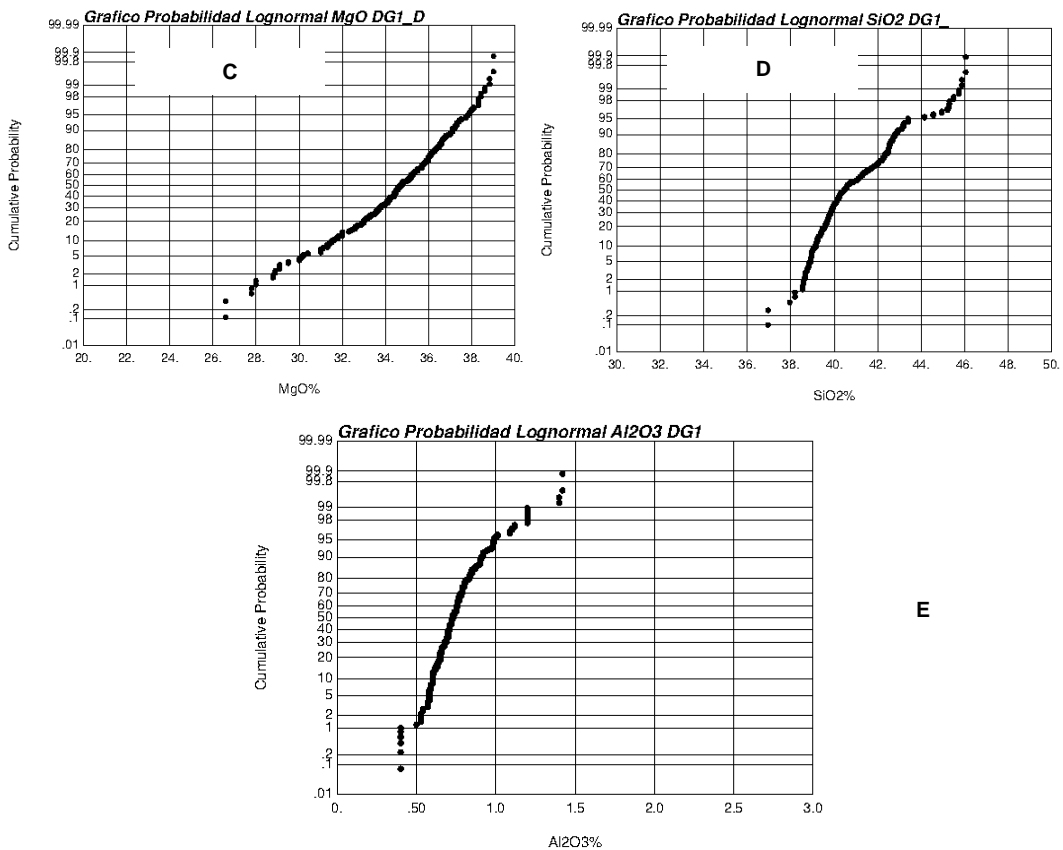


Figura 10. Distribución de leyes, gráficos de probabilidad lognormal de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 1 (DG1) usando el software gslib.

1.4. Comportamiento Direccional

Se visualiza el comportamiento de los valores a lo largo de los ejes de coordenada, vía una “nube direccional”. Esta herramienta permite detectar valores atípicos e identificar tendencias o cambios en la continuidad espacial de los valores. Para el caso 1, se analizaron todos los elementos, de los cuales el hierro y magnesio presentan ciertas tendencias y fluctuaciones de sus leyes y algunos datos atípicos “outliers”.

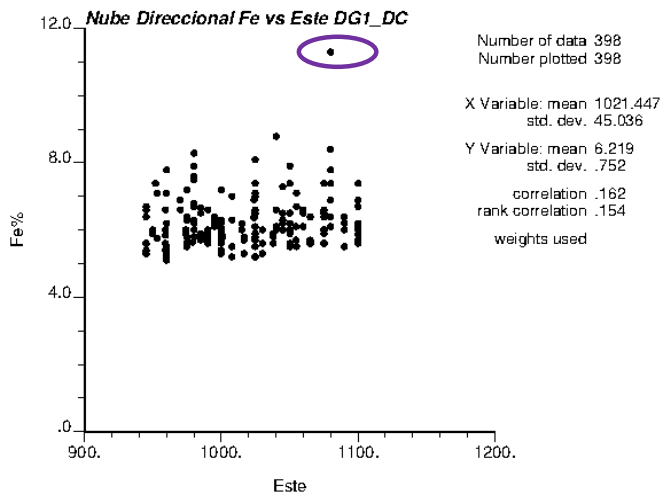


Figura 11. Nube direccional Fe vs Este, DG1 usando el software gslib. Nota: círculo de color morado se aprecia un valor atípico.

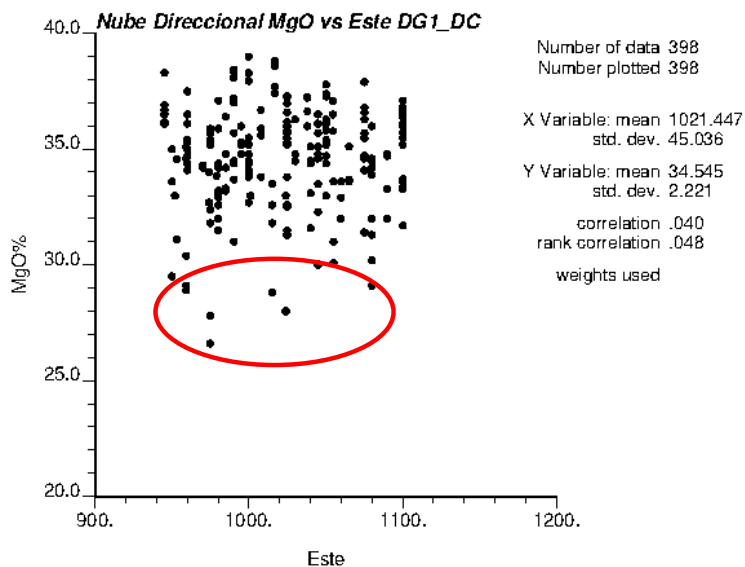


Figura 12. Nube direccional MgO vs Este, DG1 usando el software gslib. Nota: círculo de color rojo se aprecian valores atípicos.

1.5. Análisis Bivariable

A continuación (Tabla 4), se construye la matriz de correlación entre todos los elementos de la base de datos del caso 1.

MATRIZ DE CORRELACIÓN CASO 1					
Coefficiente de correlación	Níquel	Hierro	Magnesio	Sílice	Alúmina
Níquel	1	0.45	-0.26	0.08	0.21
Hierro	0.45	1	-0.47	0.07	0.73
Magnesio	-0.26	-0.47	1	-0.86	-0.37
Sílice	0.08	0.07	-0.86	1	0.12
Alúmina	0.21	0.72	-0.37	0.12	1

Tabla 4. Matriz de correlación de la base de datos del caso 1.

Basado en la Tabla 4 del caso 1, se observan varios elementos con correlación o dependencia lineal, entre los elementos que mejor presentan correlación se tiene sílice vs magnesio y hierro vs alúmina. A continuación, se observan las mejores correlaciones antes mencionadas en las Figuras 13 y 14.

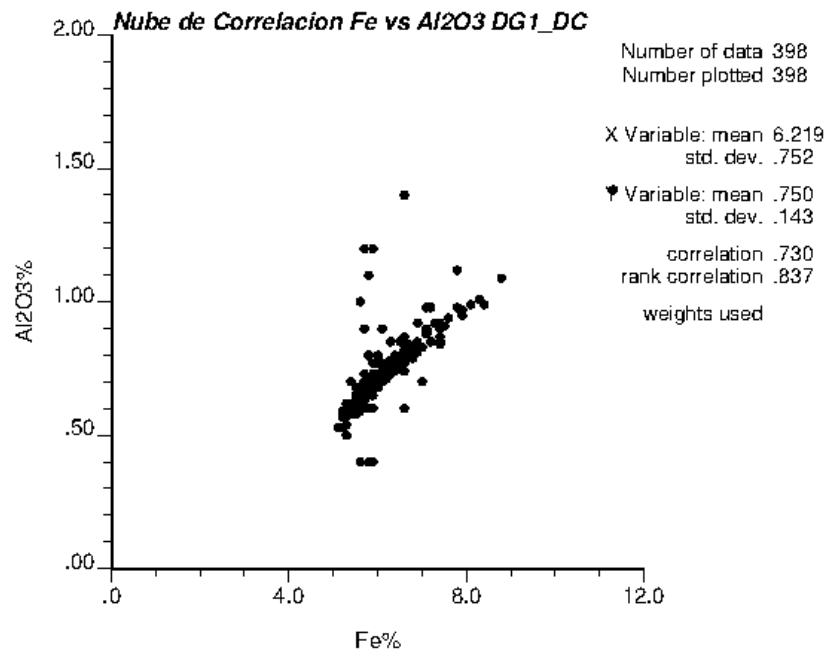


Figura 13. Nube de correlación entre hierro vs alúmina DG1, fuente: usando el software gslib.

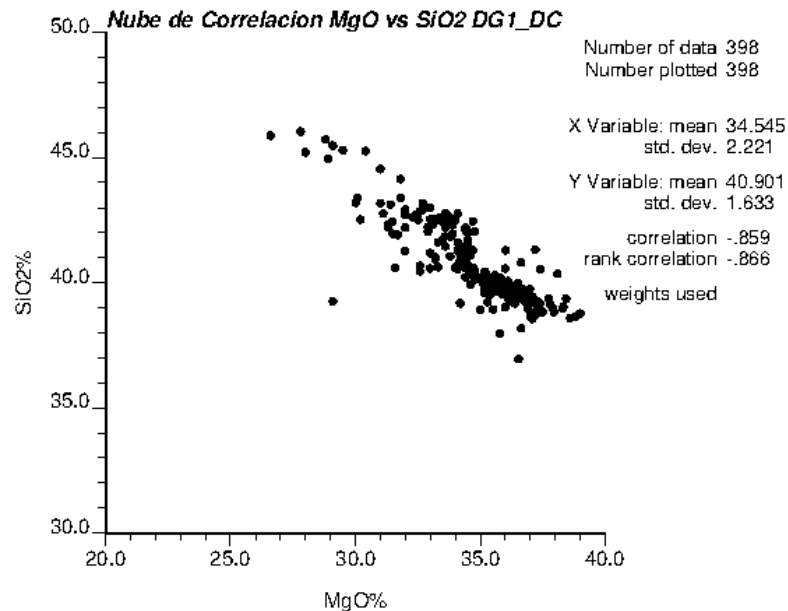


Figura 14. Nube de correlación entre MgO vs SiO2 DG1, fuente: usando el software gslib.

2. Caso 2: Dominio Geológico 2 (DG2), base de datos (826 datos)

La presente base de datos cuenta con 826 datos, es tomada del plan de perforaciones de exploración del dominio geológico total (DGT) para construir el modelo de recursos, se trata de una malla pseudo regular de 25x25x1 metro. El área de trabajo (coordenadas) se indica en la Tabla 5.

Coordenadas	Mínimo(m)	Máximo (m)
Este	945	1100
Norte	2000	2200
Cota	34.7	96.69

Tabla 5. Coordenadas base de datos caso 2, fuente: propia generada con el software gslib.

2.1. Despliegue de atributos (plantas y perfiles)

A continuación, se presentan plantas y perfiles de la base de datos del caso 2, donde se aprecia la malla de muestreo promedio 25x25x1 metro.

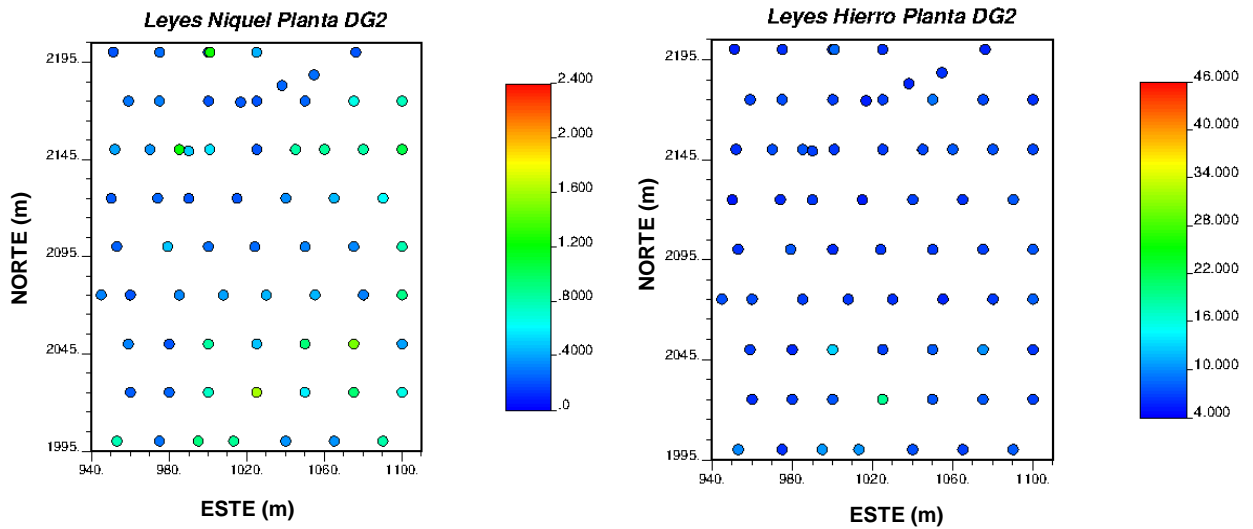


Figura 15. Mapa planta (XY) leyes de níquel, (izquierda) y hierro (derecha) DG2, usando el software gslib.

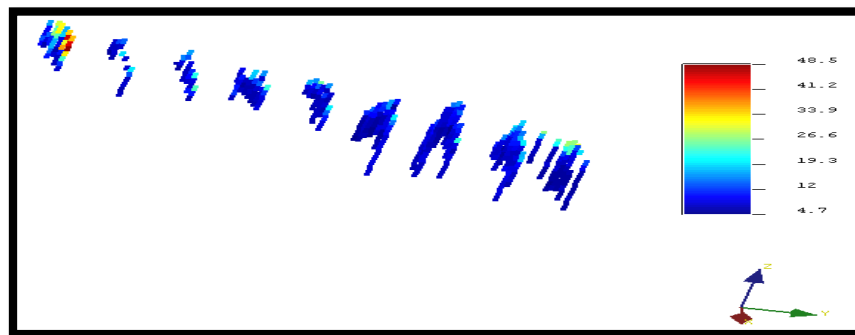


Figura 16. Perfil leyes de hierro (DG2), usando el software SGEMS.

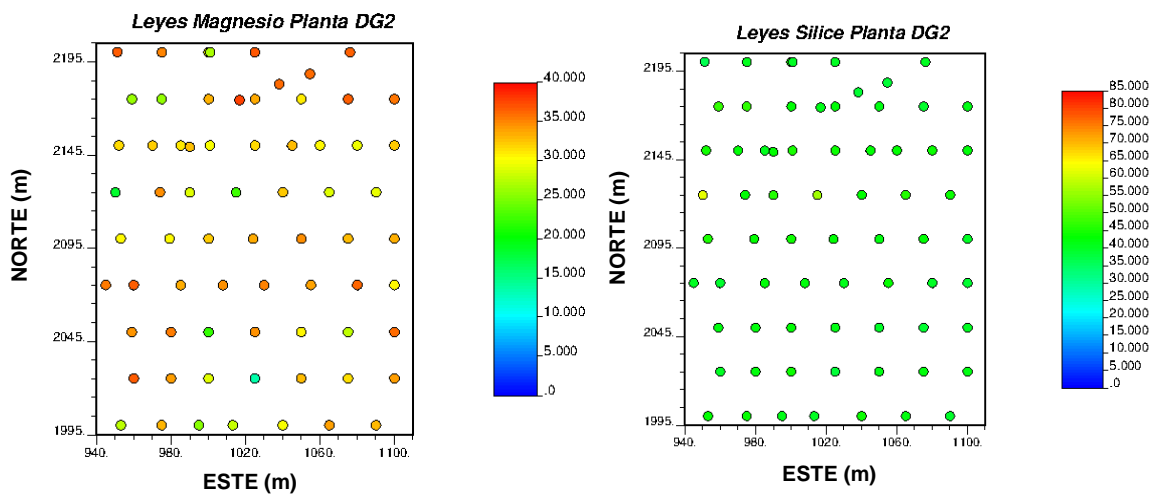


Figura 17. Mapa planta (XY) leyes de magnesio, (izquierda) y sílice (derecha) DG2, usando el software gslib.

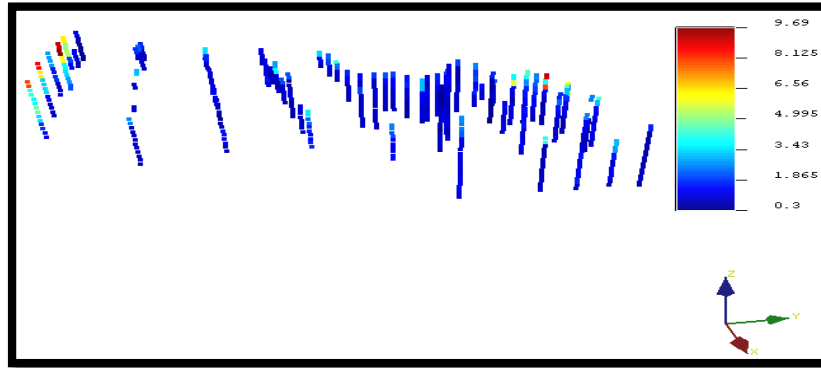


Figura 18. Perfil leyes de alúmina DG2, usando el software SGeMS.

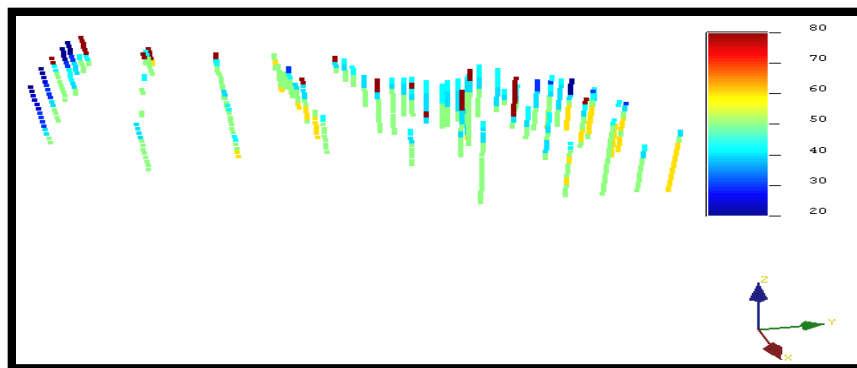


Figura 19. Perfil de meteorización tipo de roca DG2, usando el software SGeMS.

Análisis de los atributos plantas y perfiles:

- La malla promedio del muestreo de exploración es de 25x25x1 metro
- El enriquecimiento de la zona de estudio caso 2 es el siguiente: hierro, alúmina aumentan hacia los niveles superiores y magnesio aumentan hacia los niveles inferiores. Es lógica dicha apreciación con los procesos geológicos de formación.
- Las perforaciones son verticales, longitud máxima perforada 62 metros.

2.2. Desagrupamiento

A continuación, se presenta en la tabla 6 las estadísticas desagrupadas y no desagrupadas para el caso 2. Las medias no desagrupadas son muy similares a las medias desagrupadas debido al muestreo pseudo regular. Tamaño de la celda 25x25x1.

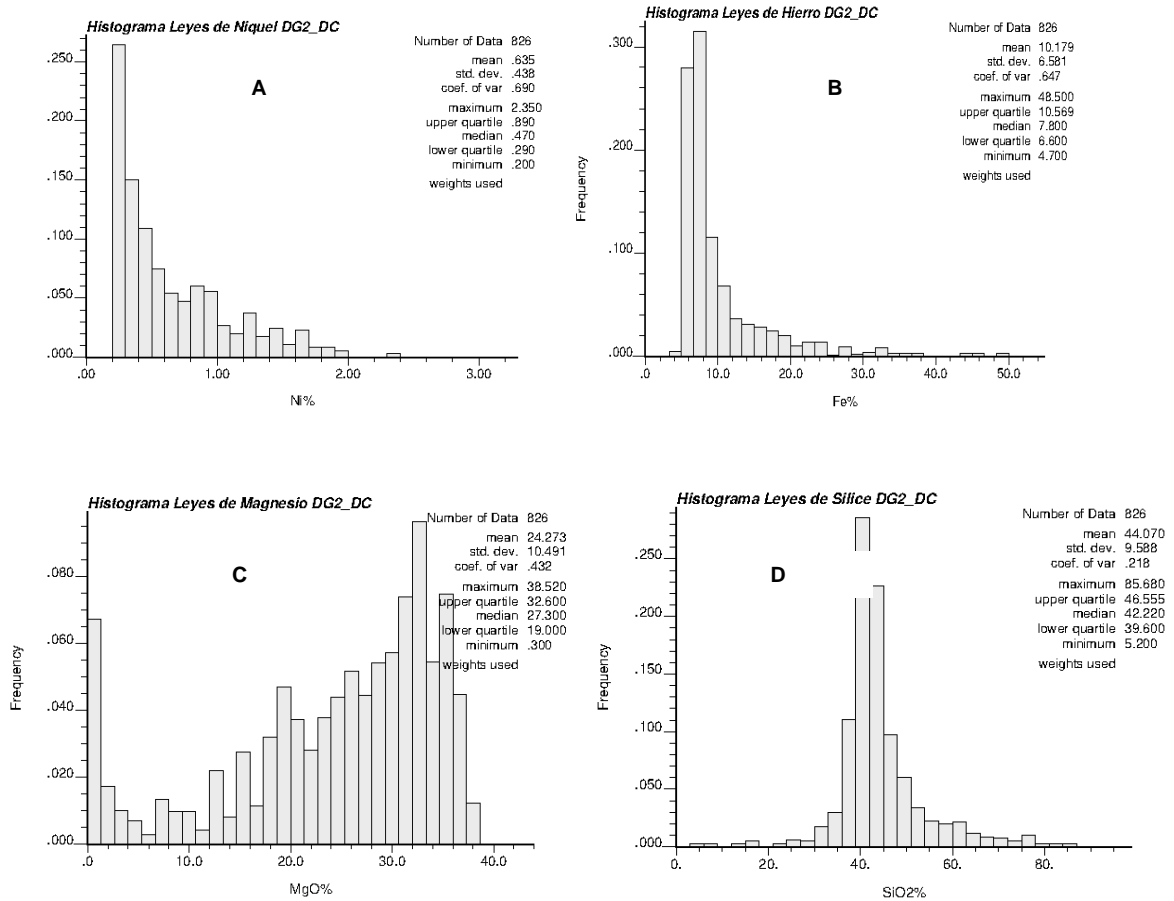
Atributo Datos	Medidas de Posición (No Desagrupada) %			Medidas de Dispersión (No Desagrupada) %		Media Desagrupada %
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de variación	
Níquel (Ni)	0.631	0.2	2.35	0.438	0.690	0.635
Hierro (Fe)	10.021	4.7	48.5	6.581	0.647	10.179
Magnesio (MgO)	24.311	0.3	38.52	10.491	0.432	24.273
Sílice (SiO ₂)	44.236	5.2	85.68	9.588	0.218	44.070
Alúmina (Al ₂ O ₃)	1.467	0.3	9.69	1.372	0.928	1.479

BASE DE DATOS CASO 2

Tabla 6. Estadísticas caso 2 (medidas de posición y dispersión), media agrupada y desagrupada.

2.3. Distribución de Leyes

A continuación, se presentan los histogramas y gráficos de probabilidad lognormal con datos desagrupados.



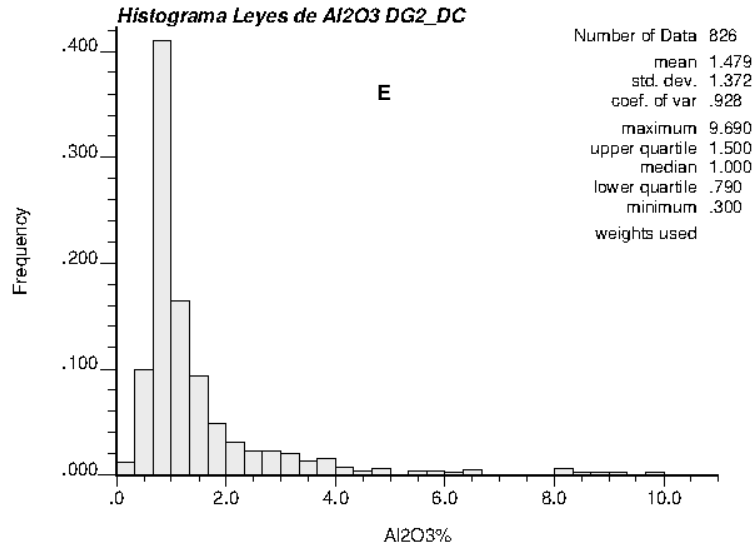
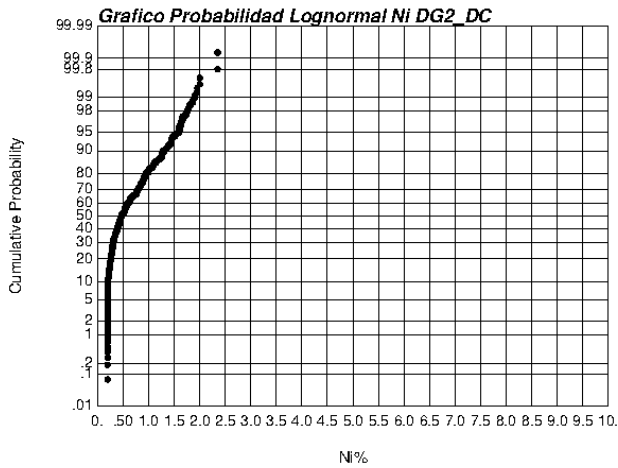
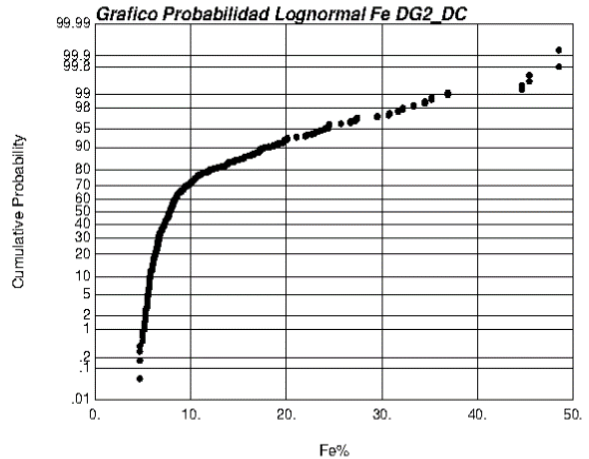


Figura 20. Distribución de leyes, histogramas desagrupados de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 2 (DG2) usando el software gslib.



A



B

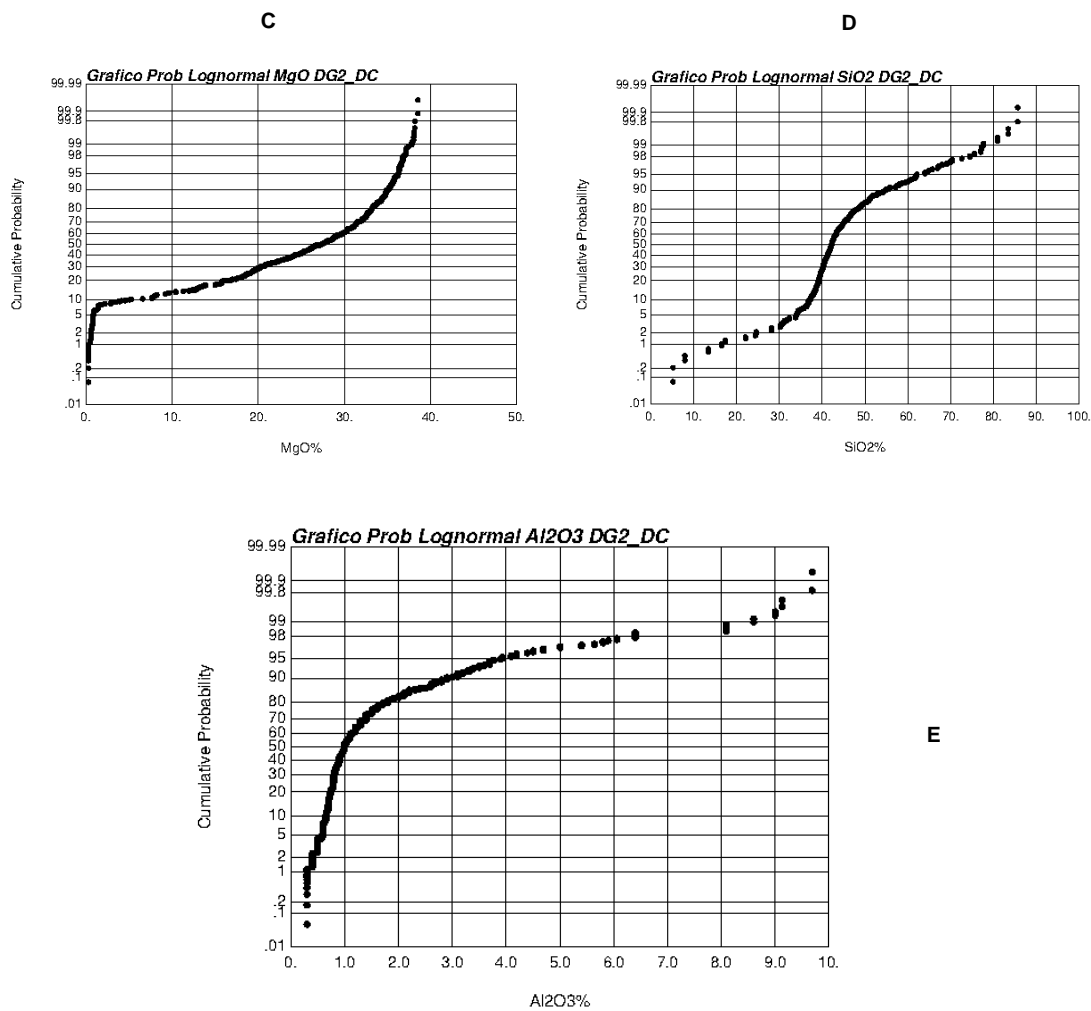


Figura 21. Distribución de leyes, gráficos de probabilidad lognormal de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 2 (DG2) usando el software gslib.

Se aprecia distribuciones que difieren de la lognormal, con algunos valores atípicos para los elementos hierro, magnesio y alúmina principalmente.

2.4. Comportamiento Direccional

Para el caso 2, se analizaron todos los elementos, de los cuales sílice y alúmina presentan ciertas tendencias y fluctuaciones de sus leyes y algunos datos atípicos “outliers”.

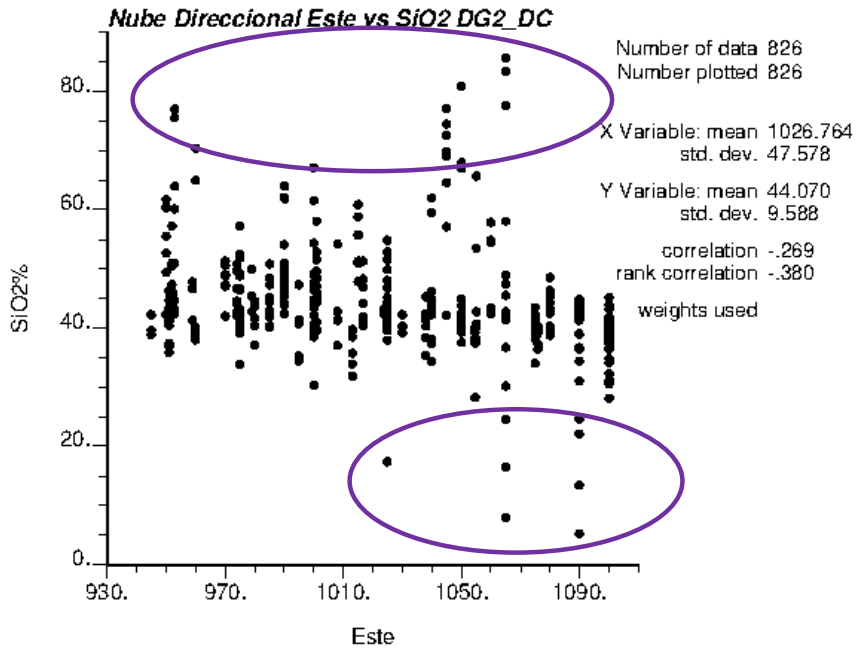


Figura 22. Nube direccional SiO₂ vs Este, DG2 usando el software gslib. Nota: círculos de color morado se aprecian valores atípicos. Nota: los tipos de roca presentes en el DG2 no es característico presentar sílice con valores mayores a 60% y menores de 25%

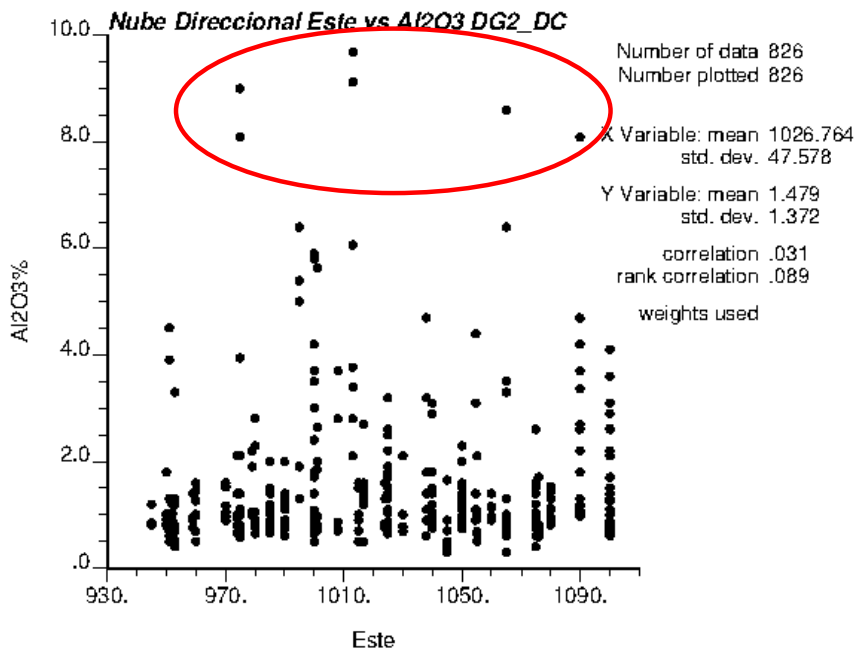


Figura 23. Nube direccional Al₂O₃ vs Este, DG2 usando el software Gslib. Nota: círculo de color rojo se aprecian valores atípicos. Nota: los tipos de roca presentes en el DG2 no es característico presentar alúmina con valores mayores a 8%

2.5. Análisis Bivariable

A continuación, se construye la matriz de correlación entre todos los elementos de la base de datos del caso 2, tabla 7.

MATRIZ DE CORRELACIÓN CASO 2					
Coefficiente de correlación	Níquel	Hierro	Magnesio	Sílice	Alúmina
Níquel	1	0.47	-0.24	-0.32	0.35
Hierro	0.47	1	-0.68	-0.38	0.84
Magnesio	-0.24	-0.68	1	-0.39	-0.61
Sílice	-0.32	-0.38	-0.39	1	-0.32
Alúmina	0.35	0.84	-0.61	-0.32	1

Tabla 7. Matriz de correlación de la base de datos del caso 2.

Basado en la Tabla 7 del caso 2, se observa que los elementos con correlación o dependencia lineal son de mayor a menor; alúmina vs hierro y hierro vs magnesio. A continuación, se observan las mejores correlaciones antes mencionadas en las Figuras 24 y 25.

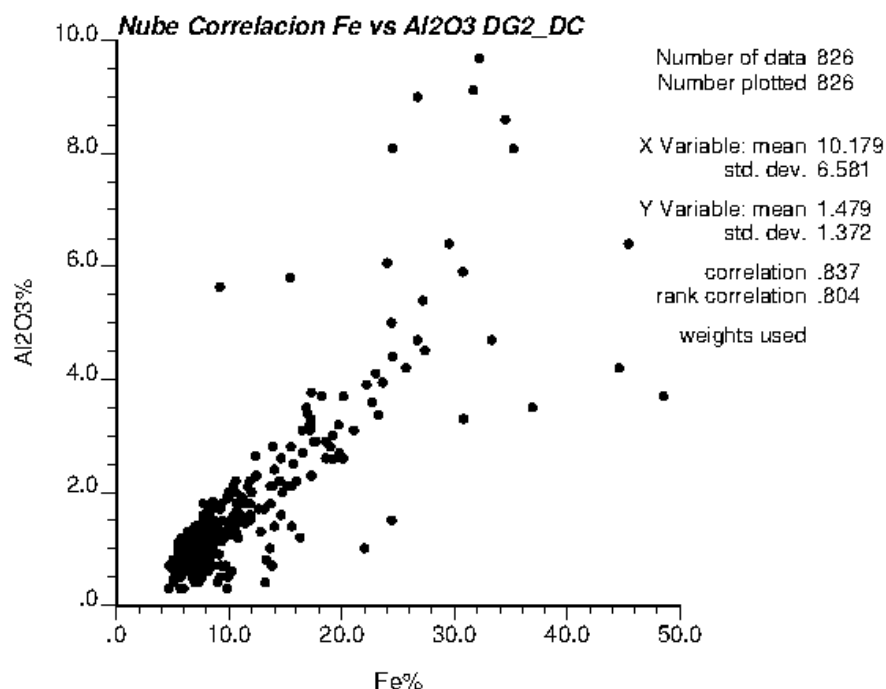


Figura 24. Nube de correlación entre hierro vs alúmina DG2, fuente: usando el software gslib.

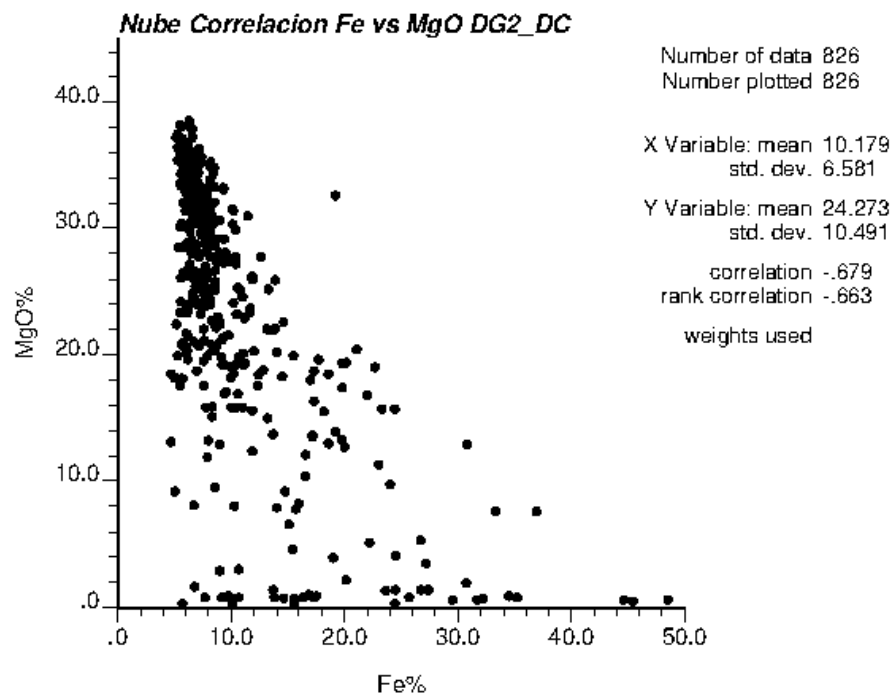


Figura 25. Nube de correlación entre MgO vs Fe DG2, fuente: usando el software gslib.

3. Caso 3: Dominio Geológico 3 (DG3), base de datos (197datos)

La base de datos cuenta con 197 datos, es tomada del plan de perforaciones de exploración del dominio geológico total (DGT) para construir el modelo de recursos, se trata de una malla pseudo regular de 25x25x1metro. El área de trabajo (coordenadas) se indica en la tabla 8.

Coordenadas	Mínimo(m)	Máximo (m)
Este	945	1100
Norte	2000	2200
Cota	53.4	95.5

Tabla. 8 .Coordenadas base de datos caso 3, fuente: propia generada con el software gslib.

3.1. Despliegue de atributos (plantas y perfiles)

A continuación, se presentan plantas y perfiles de la base de datos del caso 3, donde se aprecia la malla de muestreo promedio 25x25x1 metro.

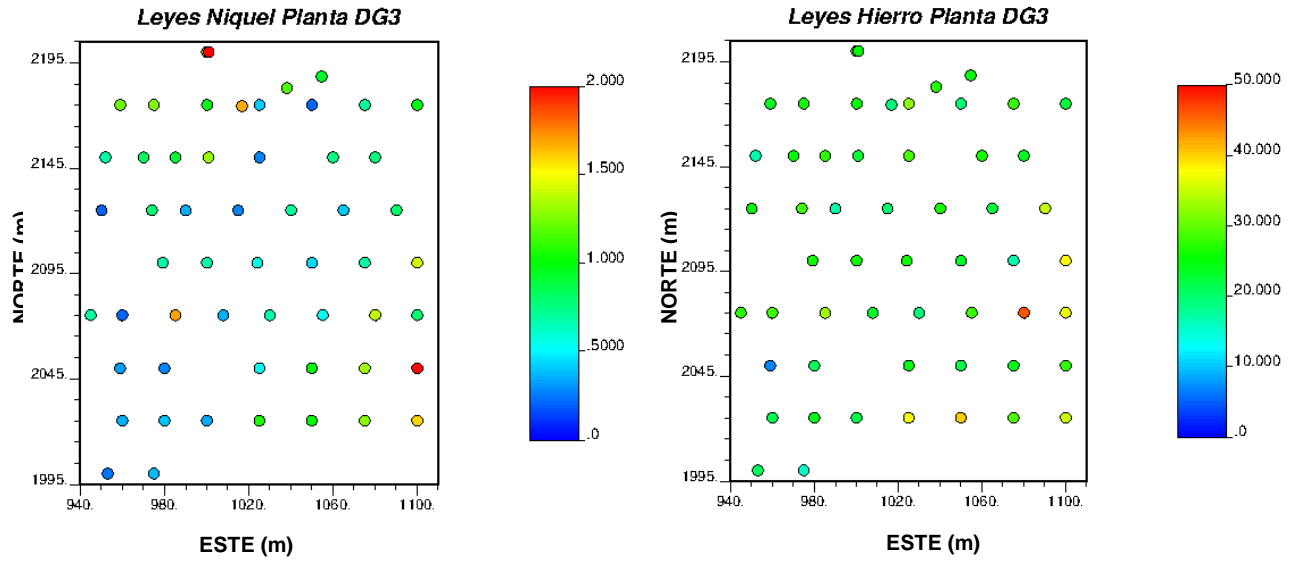


Figura 26. Mapa planta (XY) leyes de níquel, (izquierda) y hierro (derecha) DG3, usando el software gslib.

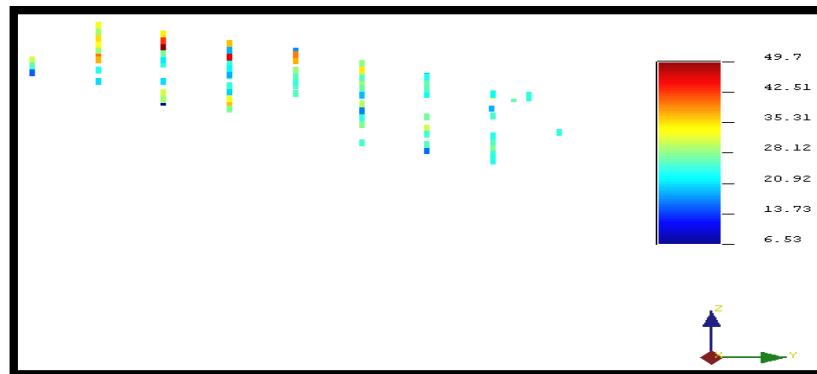


Figura 27. Perfil leyes de hierro (DG3), usando el software SGeMS.

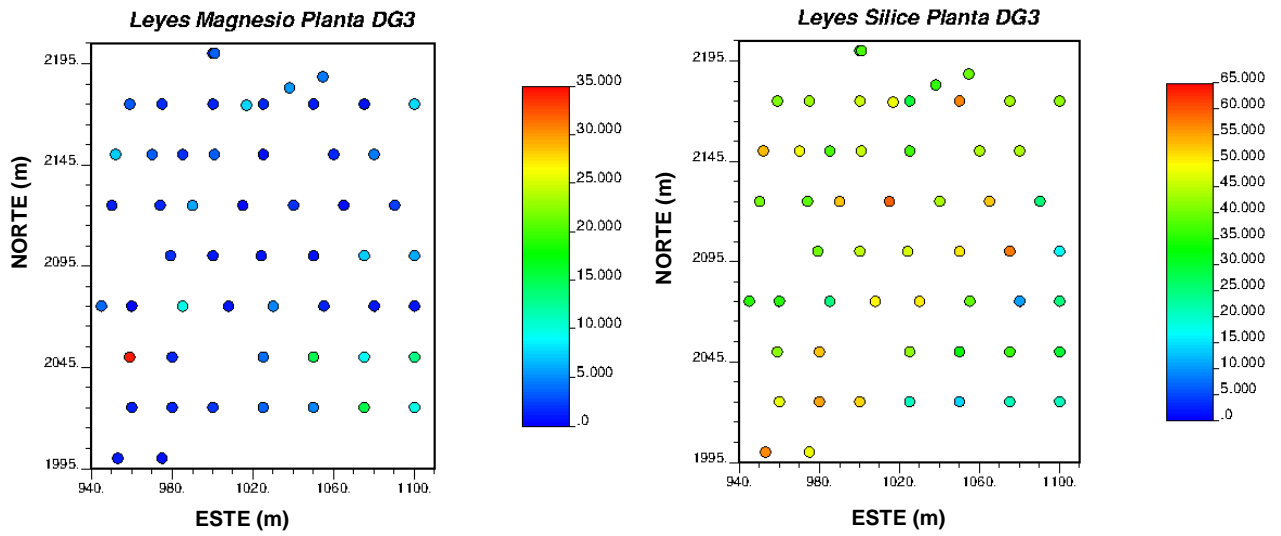


Figura 28. Mapa planta (XY) leyes de magnesio, (izquierda) y sílice (derecha) DG3, usando el software gslib.

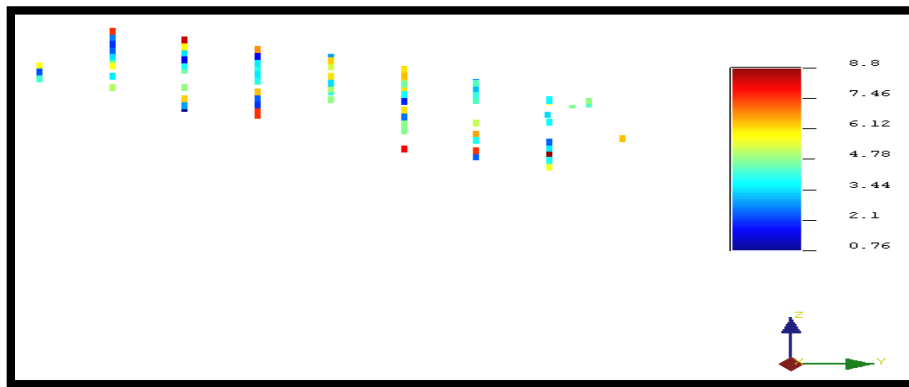


Figura 29. Perfil leyes de alúmina DG3, usando el software SGeMS.

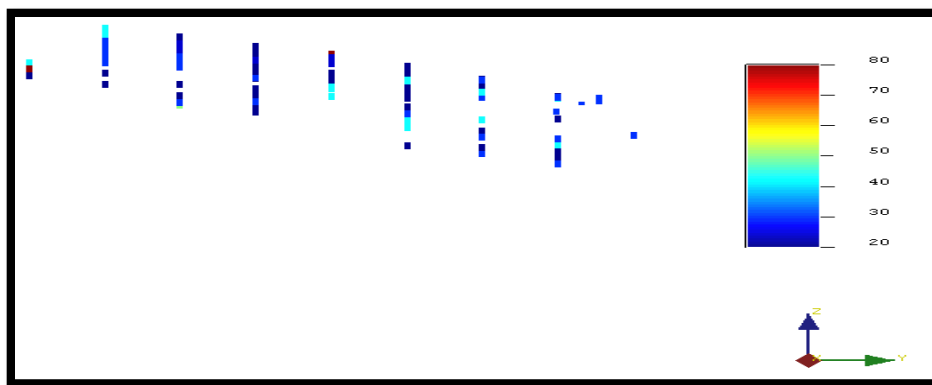


Figura 30. Perfil de meteorización tipo de roca DG3, usando el software SGeMS.

Análisis de los atributos plantas y perfiles:

- La malla promedio del muestreo de exploración es de 25x25x1 metro
- El enriquecimiento de la zona de estudio caso 3 es el siguiente: hierro, alúmina aumentan hacia los niveles superiores y magnesio disminuye hacia los niveles inferiores. Es lógica dicha apreciación con los procesos geológicos de formación.
- Las perforaciones son verticales, longitud máxima perforada 42 metros.

3.2. Desagrupamiento

Las medias no desagrupadas son muy similares a las medias desagrupadas (muestreo pseudo regular) (tabla 9). Tamaño de la celda 25x25x1.

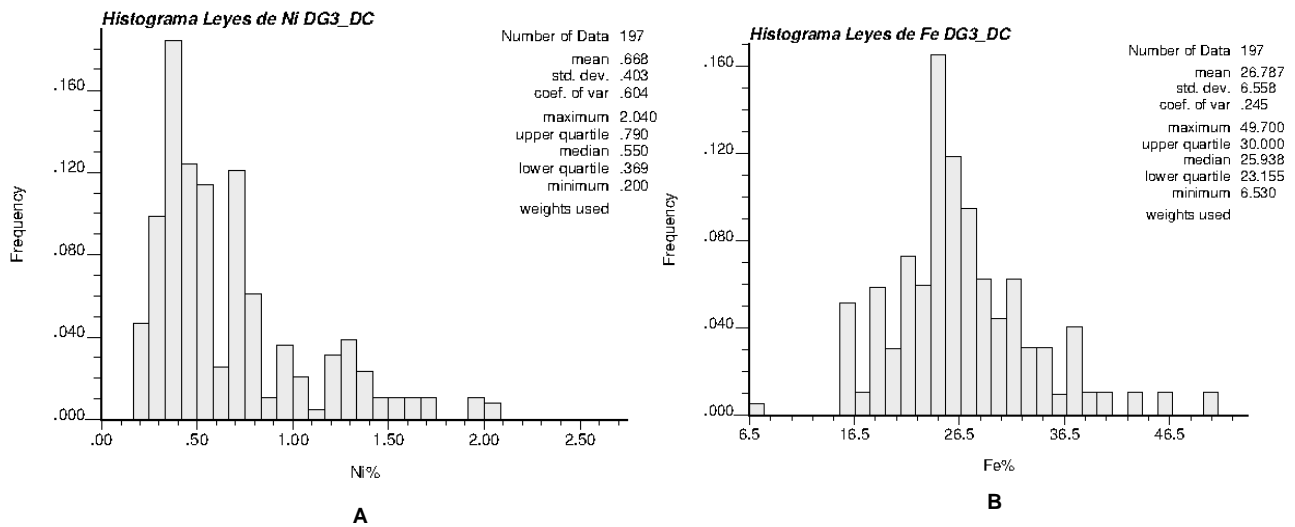
Atributo Datos	Medidas de Posición (No Desagrupada) %			Medidas de Dispersión (No Desagrupada) %		Media Desagrupada %
	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coficiente de variación	
Níquel (Ni)	0.672	0.2	2.04	0.403	0.604	0.668
Hierro (Fe)	26.762	6.53	49.7	6.558	0.245	26.787
Magnesio (MgO)	2.811	0.3	34.12	4.056	1.442	2.813
Sílice (SiO ₂)	39.672	4.1	66.85	12.498	0.315	39.657
Alúmina (Al ₂ O ₃)	4.541	0.76	8.8	1.694	0.374	4.528

BASE DE DATOS CASO 3

Tabla 9. Estadísticas caso 3 (medidas de posición y dispersión), media agrupada y desagrupada.

3.3. Distribución de Leyes

A continuación, se calcularon los histogramas y gráficos de probabilidad lognormal con datos desagrupados.



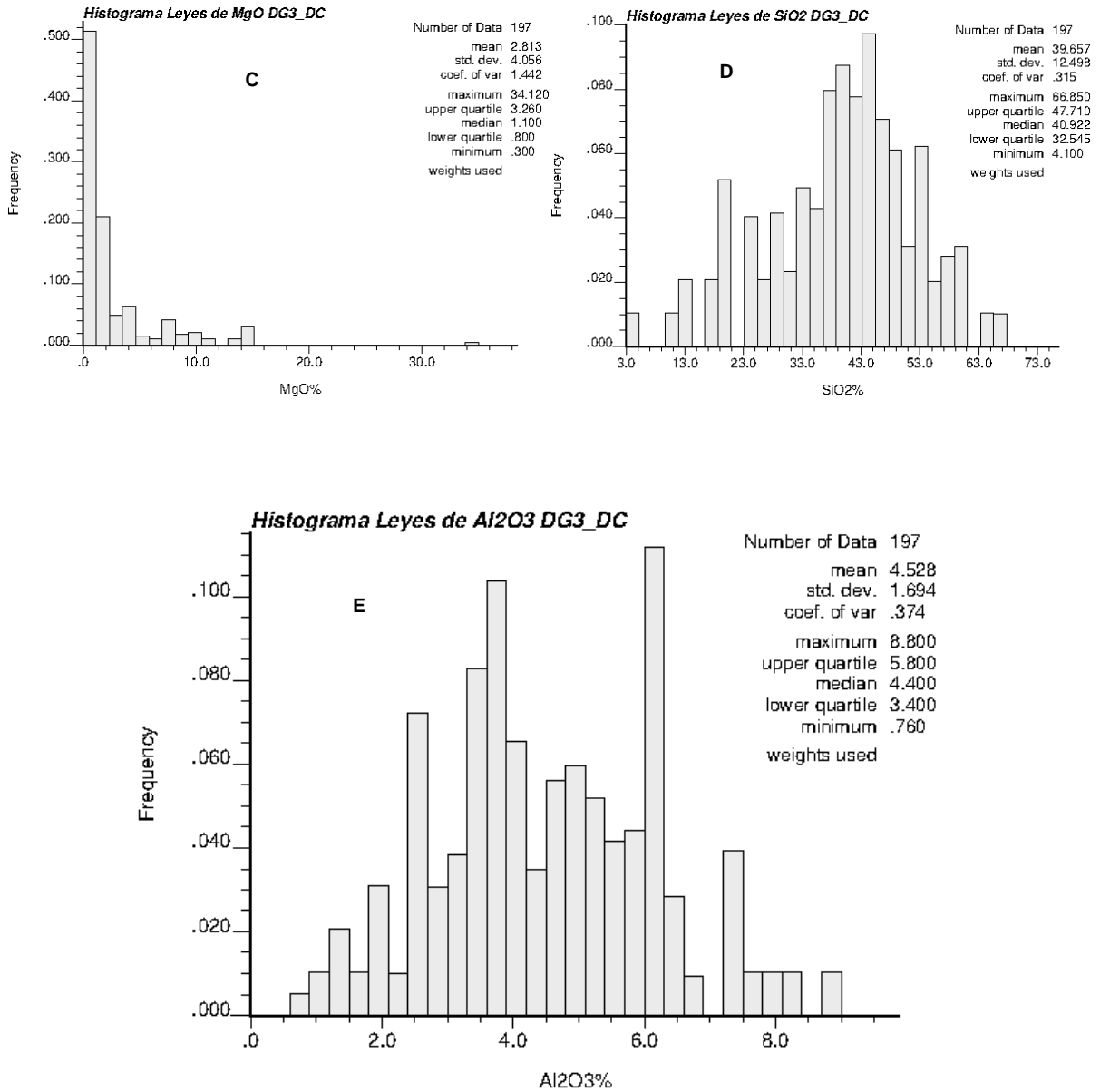
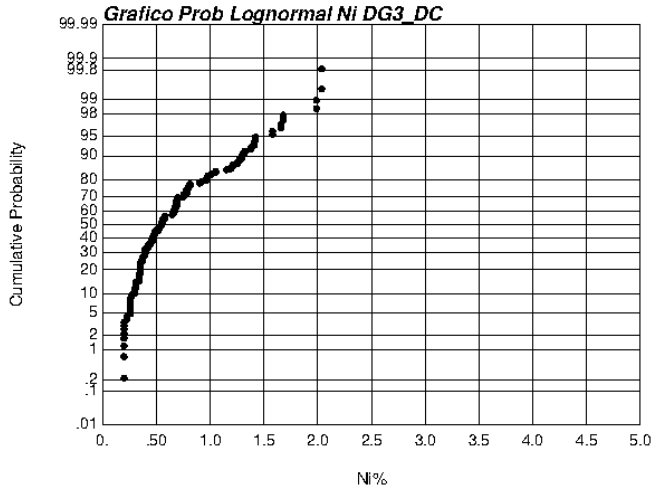
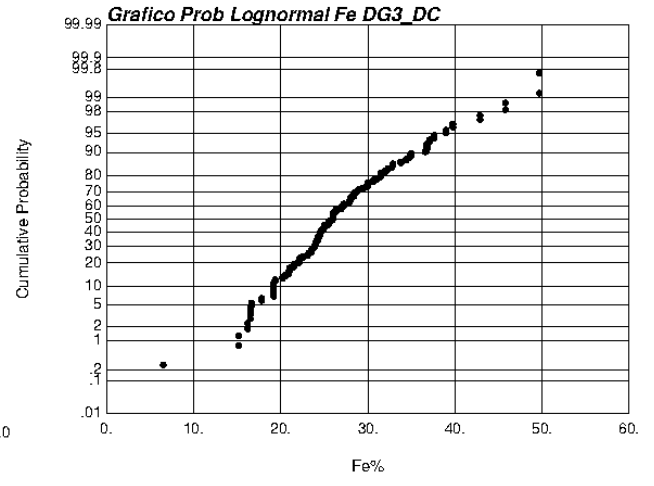


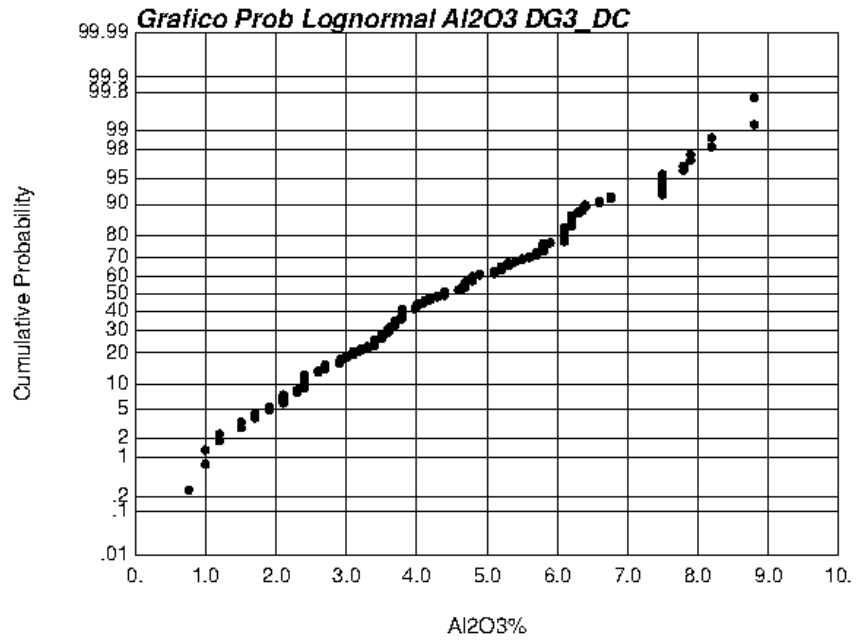
Figura 31. Distribución de leyes, histogramas desagrupados de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 3 (DG3) usando el software gslib.



A



B



C

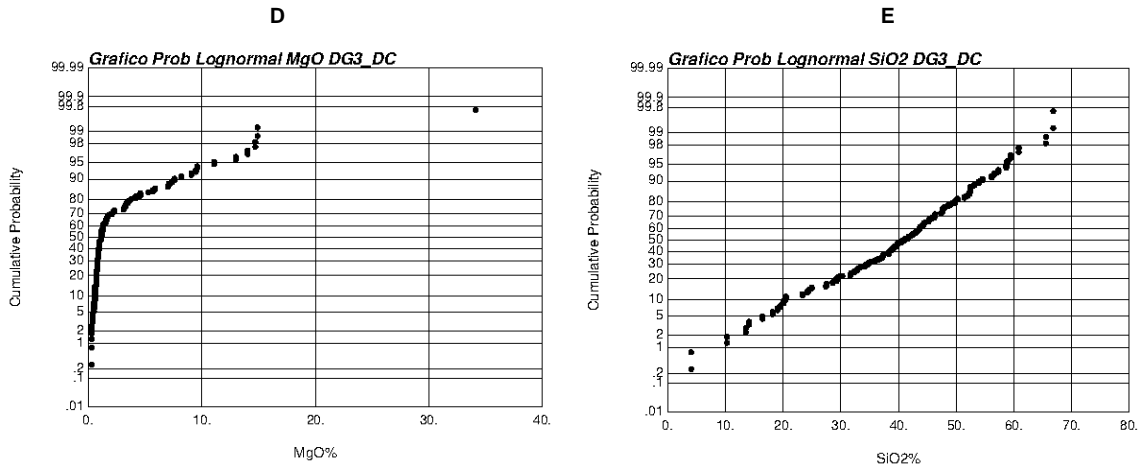


Figura 32. Distribución de leyes, gráficos de probabilidad lognormal de los elementos; níquel (A), hierro (B), magnesio (C) y sílice (D) y alúmina (E) del dominio geológico 3 (DG3) usando el software gslib.

Se aprecia cierta tendencia de solo una población lognormal de datos (los elementos hierro, alúmina y sílice), con algunas fluctuaciones estadísticas y algunos valores atípicos para los elementos magnesio y hierro principalmente. Nota: los tipos de roca presentes en el DG3 no es característico presentar valores para el caso del magnesio valores mayores a 30% y sílice mayores a 60%.

3.4. Comportamiento Direccional

Para el caso 3, se analizaron todos los elementos, de los cuales sílice y alúmina presentan ciertas tendencias y fluctuaciones de sus leyes y algunos datos atípicos "outliers".

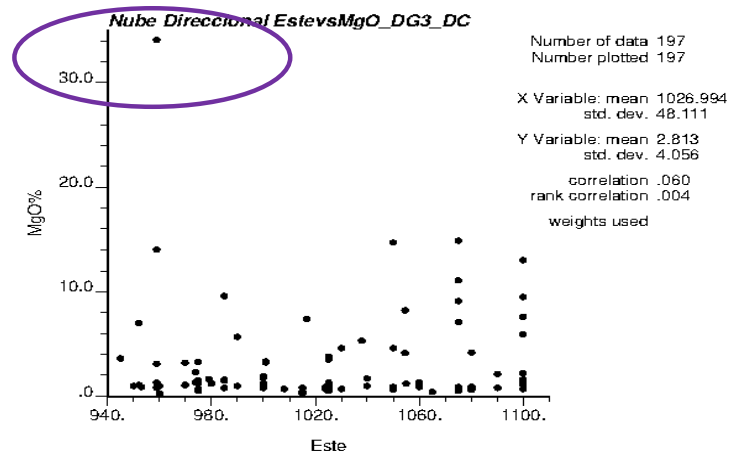


Figura 33. Nube direccional MgO vs Este, DG3 usando el software gslib. Nota: círculo de color morado se aprecia un valor atípico. Nota: Los valores atípicos se les aplico capping, basado en una media de tendencia.

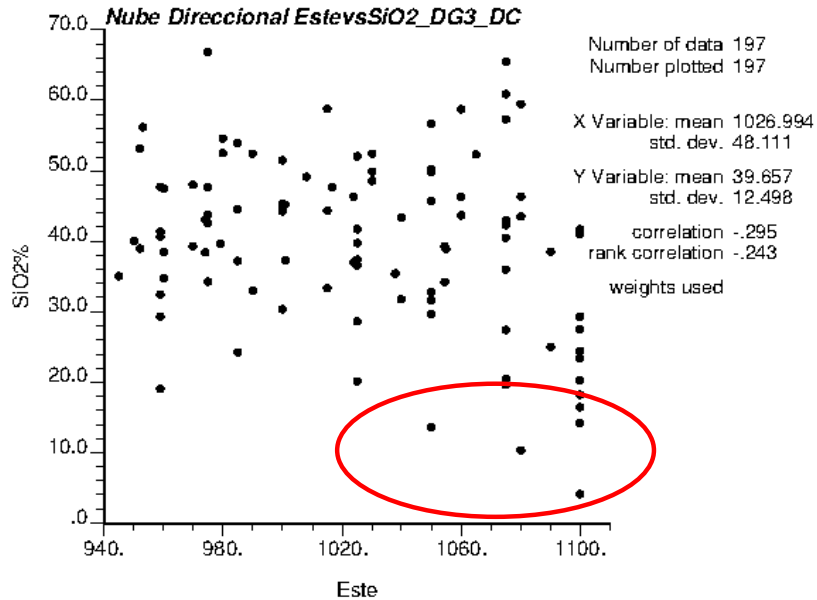


Figura 34. Nube direccional SiO₂ vs Este, DG3 usando el software gslib. Nota: círculo de color rojo se aprecian valores atípicos. Nota: Los valores atípicos se les aplico capping, basado en una media de tendencia.

3.5. Análisis Bivariable

A continuación, se construye la matriz de correlación entre todos los elementos de la base de datos del caso 3, tabla 10.

MATRIZ DE CORRELACIÓN CASO 3					
Coefficiente de correlación	Níquel	Hierro	Magnesio	Sílice	Alúmina
Níquel	1	0.29	0.49	-0.48	-0.21
Hierro	0.29	1	-0.15	-0.86	0.40
Magnesio	0.49	-0.15	1	-0.26	-0.37
Sílice	-0.48	-0.86	-0.26	1	-0.38
Alúmina	-0.21	0.40	-0.37	-0.38	1

Tabla 10. Matriz de correlación de la base de datos del caso 3.

Basado en la Tabla 10 del caso 3, se observa que los únicos elementos con correlación o dependencia lineal es el hierro vs sílice. A continuación se observa en la Figura 35.

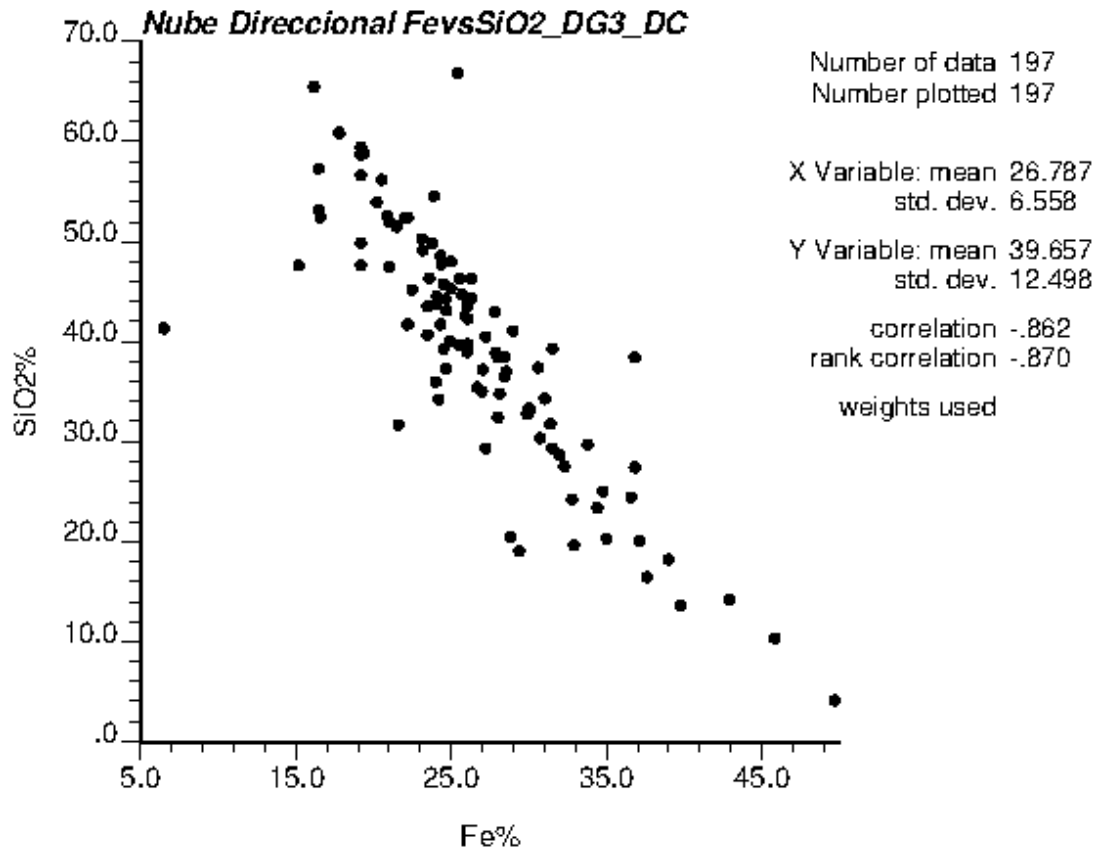


Figura 35. Nube de correlación entre hierro vs sílice DG3, fuente: usando el software gslib.

Capítulo 6. Modelamiento Geoestadístico, Categorización de Recursos y Definición de Mallas Óptimas

6.1 Variogramas experimentales y teóricos

Se construyen los respectivos variogramas experimentales y teóricos para los tres dominios geológicos (DG1, DG2 y DG3) del elemento níquel.

6.1.1 Caso 1: base de datos (398 datos), elemento níquel

El elemento de interés (níquel) se modeló en varias direcciones el variograma experimental, al final se toma el variograma omnidireccional (transformado-nscore) con los siguientes resultados, ver Figura 48.

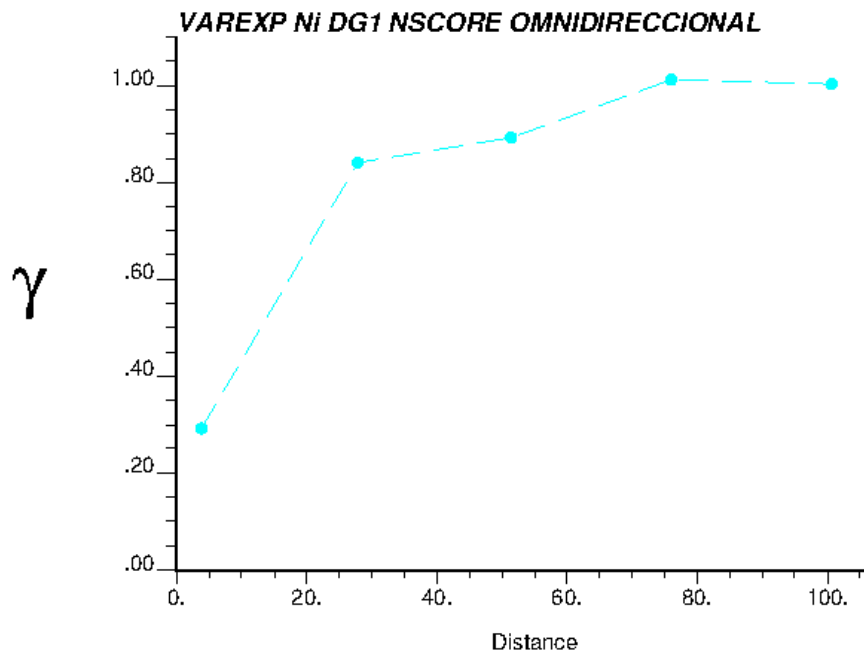


Figura 36. Variograma experimental elemento níquel, omnidireccional caso 1.

Nota: Al momento de hacer la validación cruzada, el mejor ajuste se presenta con meseta (varianza) menor a uno.

Se construye el modelo con los siguientes resultados:

- Efecto pepita: 0.2
- Alcance: 37 metros
- Número de estructuras: 1 (esférico)

Finalmente, el resultado del modelo calculado se muestra en la figura 37.

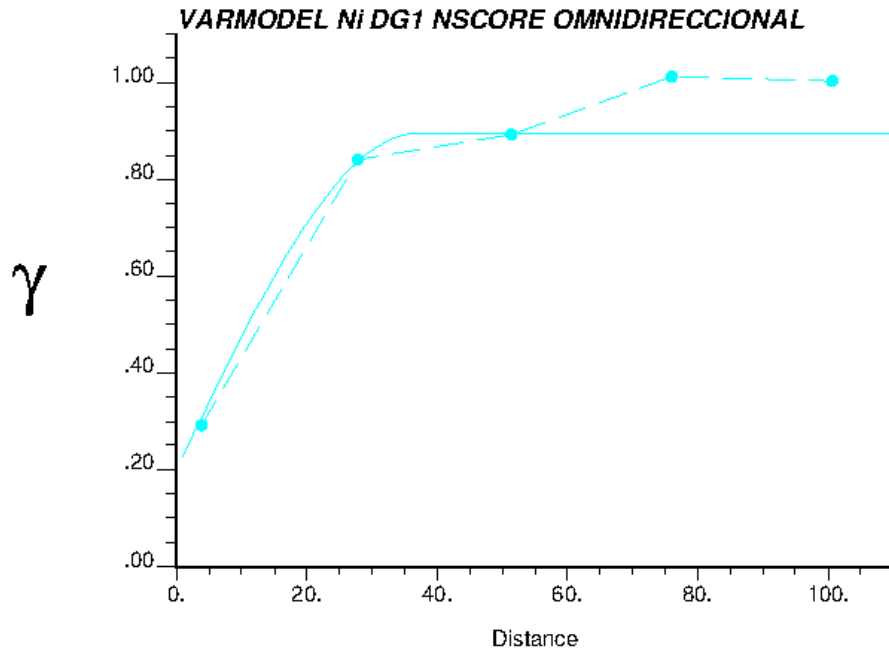


Figura 37. Modelo Variograma teórico níquel, omnidireccional, caso 1.

6.1.2 Caso 2: base de datos (826 datos), elemento níquel

Se construye un variograma experimental (trasformado-nscore) para el elemento níquel, con las siguientes direcciones: N30°E-N60°W y vertical, ver Figura 38.

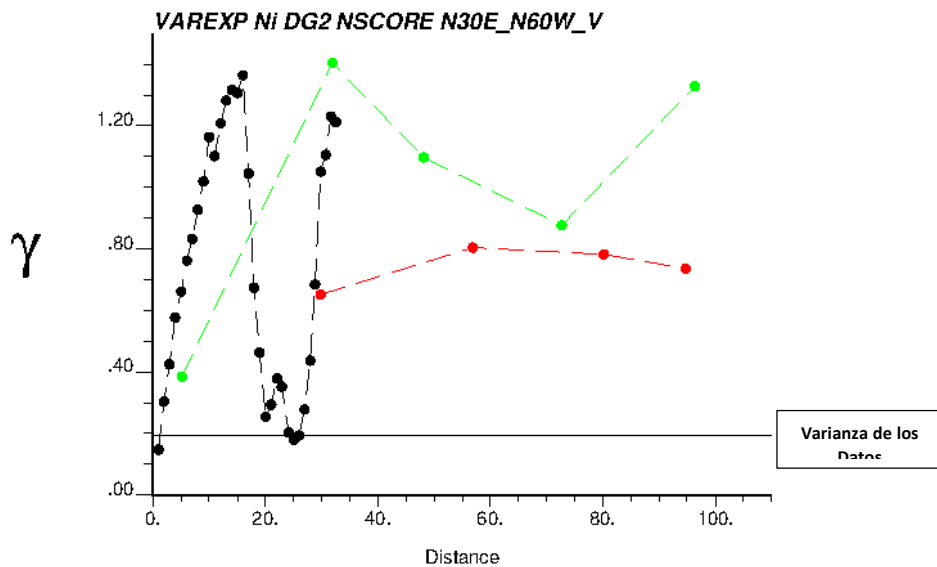


Figura 38. Variograma experimental elemento níquel, N30°E (línea color rojo), N60°W (línea color verde) y vertical (línea color negro) caso 2.

Se construye el modelo con los siguientes resultados:

- Efecto pepita: 0.1
- Alcance primera estructura: 51 metros
- Alcance segunda estructura: 21 metros
- Alcance tercera estructura: 11 metros
- Número de modelos teóricos: 3, todos esféricos

Finalmente, el resultado del modelo calculado se muestra en la Figura 39.

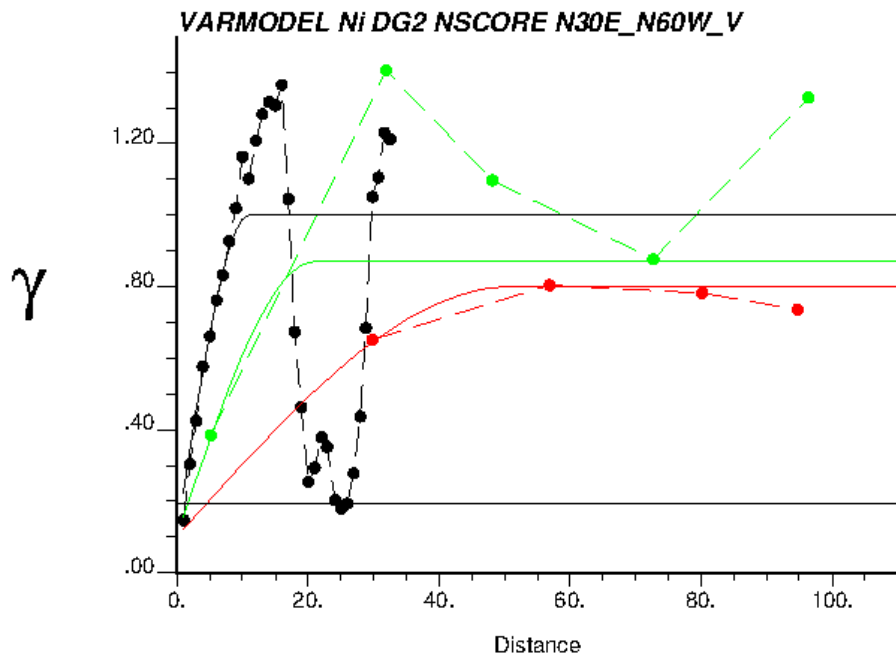


Figura 39. Modelo Variograma experimental (línea discontinua) y teórico (línea continua) níquel, N30°E (líneas color rojo), N60°W (líneas color verde) y vertical (líneas color negro) caso 2.

6.1.3 Caso 3: base de datos (197 datos), elemento níquel

El elemento de interés (níquel) se modeló en varias direcciones el variograma experimental, al final se toma el variograma omnidireccional (transformado-nscore) con los siguientes resultados, ver Figura 40.

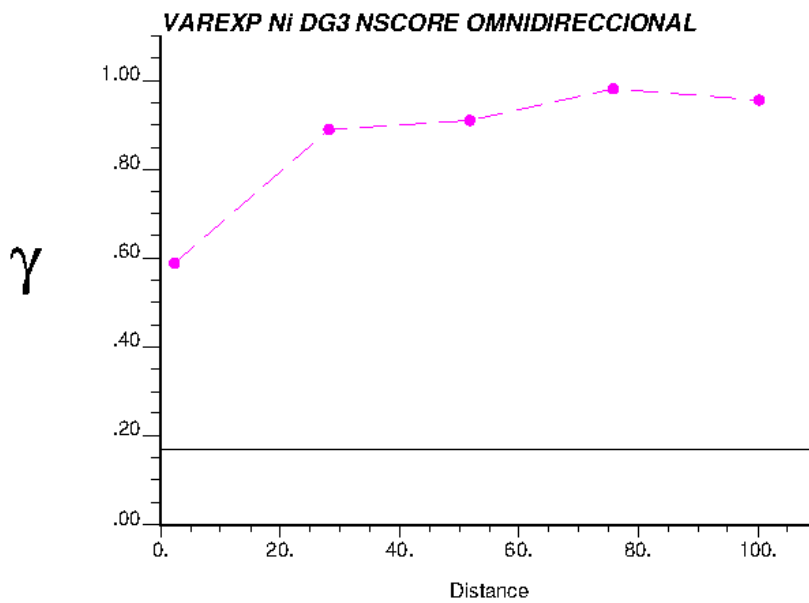


Figura 40. Variograma experimental elemento níquel, omnidireccional caso 3 (línea color fucsia).

Se construye el modelo con los siguientes resultados:

- Efecto pepita: 0.55
- Alcance: 47 metros
- Número de estructuras: 1 (esférico)

Finalmente, el resultado del modelo calculado se muestra en la Figura 41.

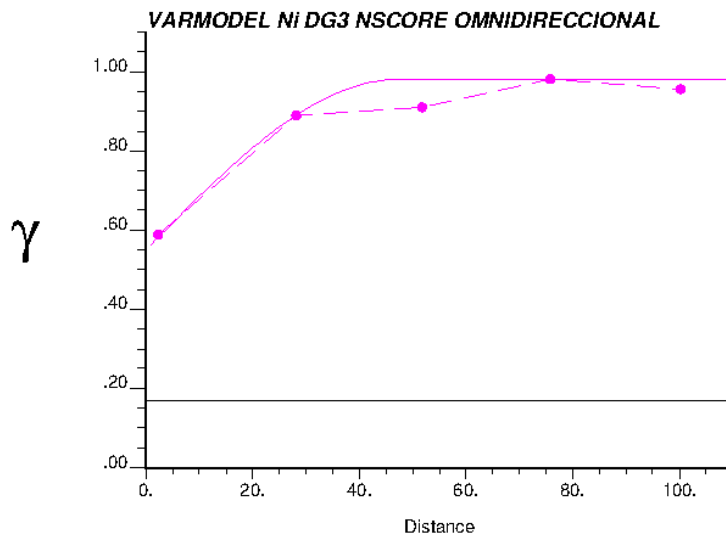


Figura 41. Modelo Variograma teórico níquel, omnidireccional, caso 3.

6.2 Validaciones Cruzadas

Existen dos técnicas para validar un variograma teórico (validación cruzada y Jack-Knife), para el caso 1, 2 y 3 respectivamente se utilizó la técnica de validación cruzada para el elemento níquel. Se analizan los principios básicos que se deben cumplir en la validación de un modelo teórico, a saber, (1) la media de los errores y los errores estandarizados deben ser cercana a cero (estimador insesgado) y (2) la varianza de los errores estandarizados debe ser cercana a 1 (el variograma cuantifica adecuadamente la incertidumbre).

Estos principios se cumplen para los casos de estudio (DG1, DG2 y DG3), como se resumen en la tabla 11.

CASOS DE ESTUDIOS	MEDIA DE LOS ERRORES	MEDIA DE LOS ERRORES ESTANDARIZADOS	VARIANZA DE LOS ERRORES ESTANDARIZADOS
CASO 1 (DG1)	0.02	0.01	1.15
CASO 2 (DG2)	0.08	0.04	0.91
CASO 3 (DG3)	0.08	0.08	1.07

Tabla 11. Resultado validación cruzada para los casos de estudios.

6.2.1 Caso 1, DG1: elemento níquel

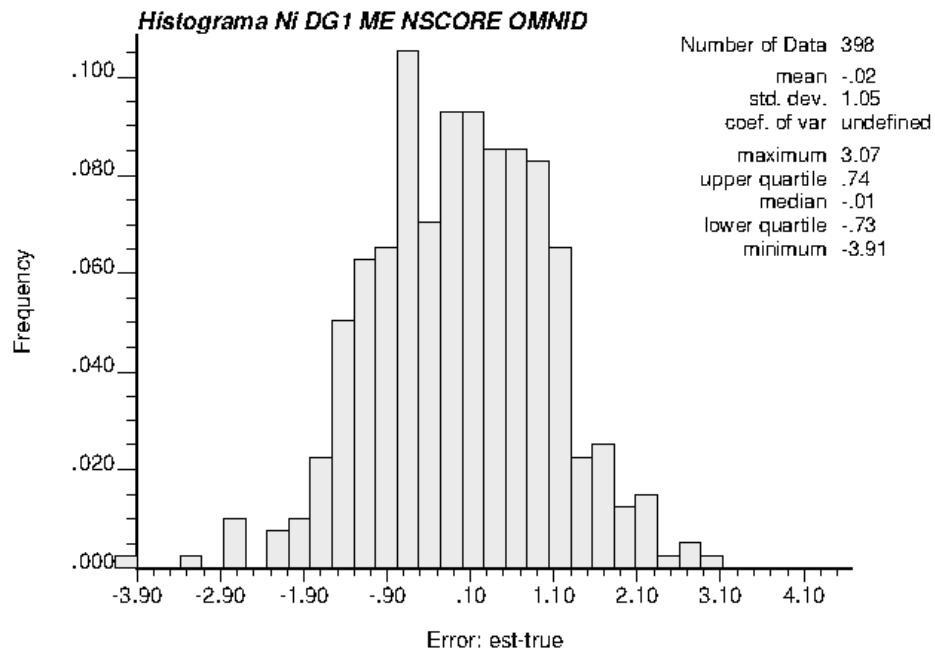


Figura 42. Histograma de los errores (media cercana a cero), caso 1 níquel.

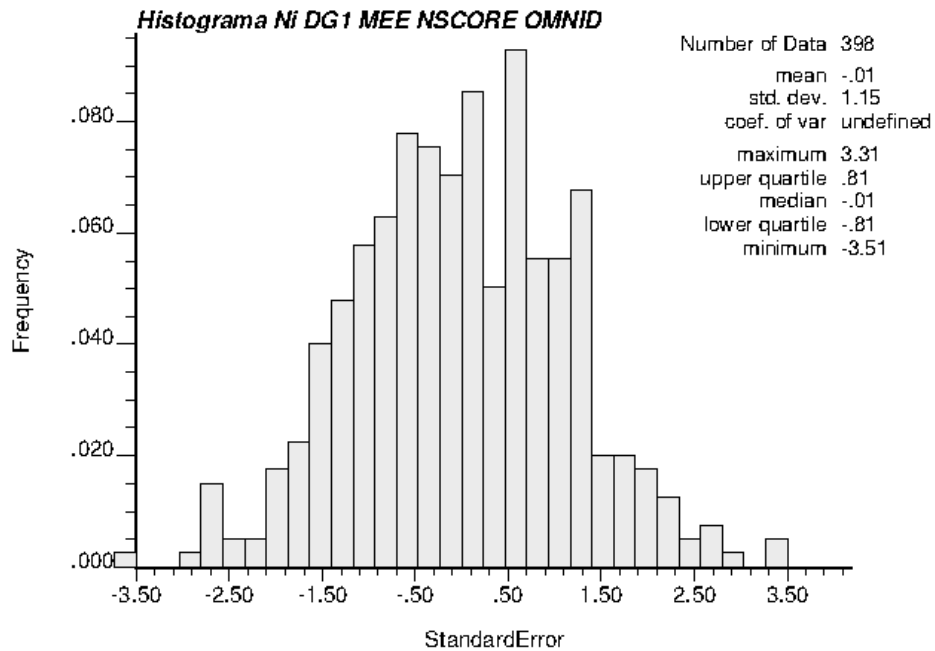


Figura 43. Histograma de los errores estandarizados (media cercana a cero y varianza cercana a 1), caso 1 níquel.

6.2.2 Caso 2, DG2: elemento níquel

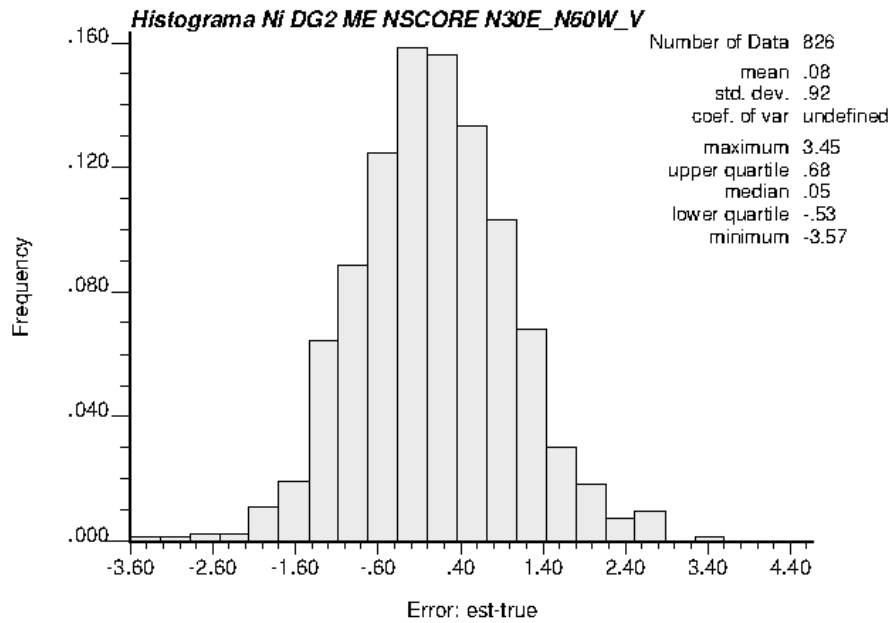


Figura 44. Histograma de los errores (media cercana a cero), caso 2 níquel.

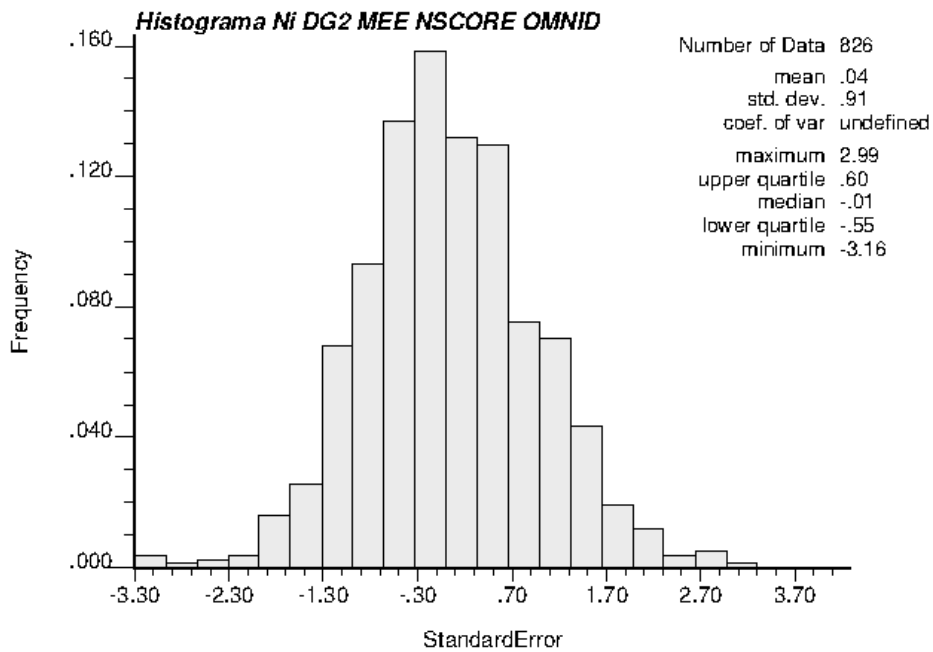


Figura 45. Histograma de los errores estandarizados (media cercana a cero y varianza cercana a 1), caso 2 níquel.

6.2.3 Caso 3, DG3: elemento níquel

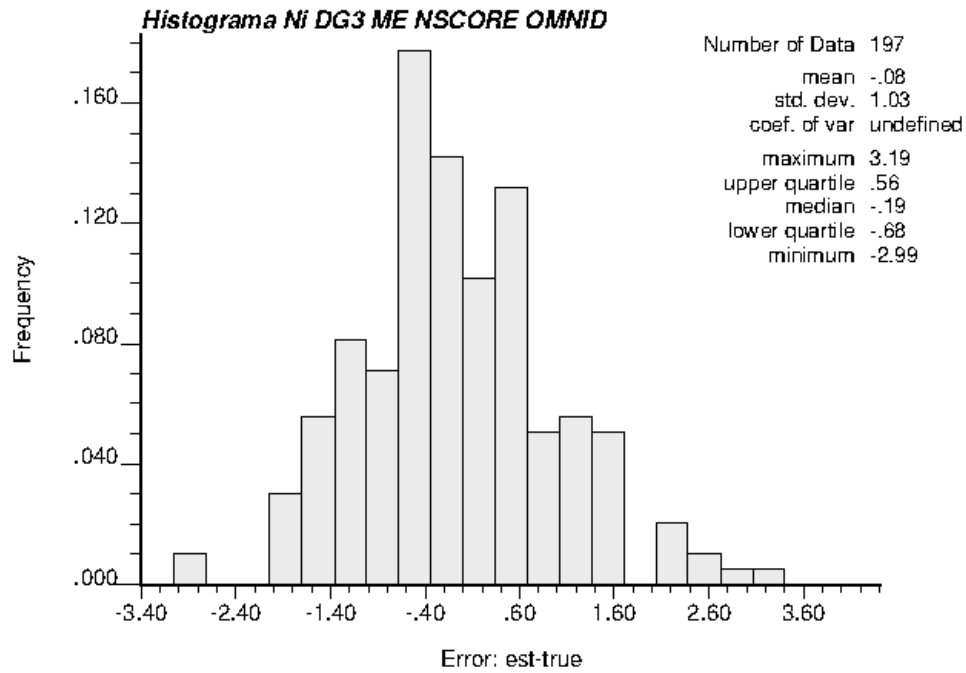


Figura 46. Histograma de los errores (media cercana a cero), caso 3 níquel.

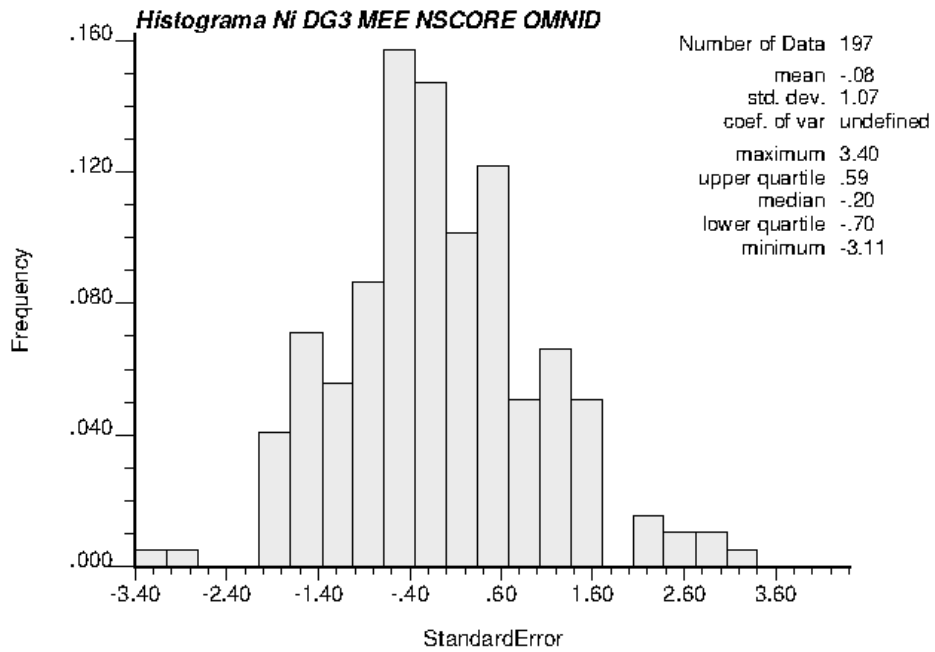


Figura 47. Histograma de los errores estandarizados (media cercana a cero y varianza cercana a 1), caso 3 níquel.

7 Simulaciones

En la caracterización de yacimientos la estimación propuesta por la geoestadística ha tenido un amplio uso a través del procedimiento del kriging. Este método, de acuerdo a las condiciones con que es obtenido, así como la amplia gama de interpoladores conocidos, muestran una imagen suave de la realidad que se estudia, sin tener en cuenta las fluctuaciones que se presentan en la práctica. Una alternativa para esta situación es simular el comportamiento de las variables analizadas.

Considerando las variables como realizaciones de funciones aleatorias, se puede construir posibles realizaciones del fenómeno con las mismas características de variabilidad y correlación espacial de los datos originales y por tanto de la realidad, características que son reveladas de la información disponible a través del cálculo de los variogramas experimentales y el ajuste de modelos teóricos. La simulación no debe ser considerada superior a la estimación, sino como una alternativa en el grado de descripción que se desee realizar. Los objetivos de estos procedimientos son diferentes, pero en muchos casos el análisis de sus resultados paralelamente puede ayudar a enriquecer la caracterización que se desarrolla en el estudio de variables regionalizadas.

7.1 Simulación secuencial gaussiana

En la simulación secuencial, un valor simulado en cada ubicación es tomado de una distribución de probabilidad, la cual es calculada a partir de los datos suministrados y de valores previamente simulados que se hallan en la vecindad. El algoritmo se inicia con la selección aleatoria de un punto y se avanza secuencialmente a través de la malla en que se ha dividido el área bajo estudio. El orden de la secuencia en la cual se recorre la malla es aleatorio. Para cada punto de la malla se buscan puntos en una región de vecindad definida por el modelo de continuidad espacial. Estos puntos pueden incluir tanto datos previamente simulados como los suministrados inicialmente. Hecho esto, una distribución de probabilidad es calculada a partir de tales puntos, a saber, una distribución normal de media igual al estimador de kriging simple y de varianza igual a la varianza de kriging simple. Una vez determinada esta función de probabilidad, el valor simulado será tomado de esta distribución a través de simulación de Monte Carlo.

En la práctica, la simulación se realiza a partir de los datos transformados y los resultados son transformados nuevamente al espacio original.

El presente trabajo, los escenarios (100 realizaciones) para cada estrategia (malla de muestreo) en cada dominio geológico estudiado, fueron construidos con el software gslib.

7.2 Estrategias (mallas de muestreo) para cada dominio geológico

En el presente trabajo se proponen dos estrategias de mallas de muestreo en los tres dominios geológicos definidos; DG1, DG2 y DG3.

Estrategia 1

En esta estrategia se determinan las mismas mallas de muestreo para cada dominio geológico. Las mallas propuestas son las siguientes:

- Malla 5x5x7m
- Malla 7x7x7m
- Malla 9x9x7m

m (metros)

Estrategia 2

En esta estrategia se determinan diferentes mallas de muestreo para cada dominio geológico.

Dominio geológico 1 (DG1)

- Malla 8x8x7m
- Malla 10x10x7m
- Malla 12x12x7m

Dominio geológico 2 (DG2)

- Malla 6x6x7m
- Malla 8x8x7m

Dominio geológico 3 (DG3)

- Malla 6x6x7m
- Malla 8x8x7m
- Malla 10x10x7m

Nota: revisando la medida de dispersión, el coeficiente de variación del atributo níquel en cada dominio geológico, arroja los siguientes resultados:

DG1: CV= 0.400

DG2: CV= 0.690

DG3: CV= 0.604

Basados en las estadísticas básicas con anticipación vemos que de menor a mayor variabilidad se tiene el DG1, DG3 y respectivamente el DG2 (zona de interés, mayor concentración de mineral).

8 Cálculo del coeficiente de variación condicional (CCV) para cada dominio geológico

En la tabla 12, se presentan los resultados de la media del CCV (coeficiente de variación condicional) con su respectiva estrategia para cada dominio geológico.

ESTRATEGIA 1		ESTRATEGIA 2	
MALLA	MEDIA CCV	MALLA	MEDIA CCV
5X5X7_DG1	0.0446	8X8X7_DG1	0.0512
7X7X7_DG1	0.0491	10x10x7_DG1	0.0559
9X9X7_DG1	0.0529	12X12X7_DG1	0.0601
5X5X7_DG2	0.0945	6X6X7_DG2	0.1000
7X7X7_DG2	0.1016	8X8X7_DG2	0.1061
9X9X7_DG2	0.1106		
5X5X7_DG3	0.0601	6X6X7_DG3	0.0622
7X7X7_DG3	0.0638	8X8X7_DG3	0.0652
9X9X7_DG3	0.0658	10x10x7_DG3	0.0679

Tabla 12. Media de CCV (coeficiente de variación condicional), malla de muestreo para cada estrategia.

Nota: La tabla 12 presenta la media del CCV obtenido de las 100 realizaciones para cada estrategia (malla de muestreo analizada) en cada dominio geológico, donde se aprecia que a medida que aumenta la malla de muestreo, proporcionalmente aumenta la media del CCV.

Interpretaciones:

- Es notable la menor variabilidad del CCV promedio en el dominio geológico 1 (DG1); zona compuesta por rocas de menor interés económico (peridotitas y peridotitas saprolitizada)
- Es notable la mayor variabilidad del CCV promedio en el dominio geológico 2 (DG2); zona compuesta por rocas de interés económico (saprolitos verdes principalmente).

A continuación, se presentan los histogramas del CCV (calculado bloque a bloque) y sus estadísticas para la estrategia 1 y 2 en cada dominio geológico. El objetivo es ver la forma de los histogramas en cada malla de muestreo propuesta, que tanto

cambian de una malla a otra, se conservan las mismas escalas en los ejes de ordenada y abscisas.

DG1, CASO1

Estrategia 1

En las Figuras 48, 49 y 50 se presentan los histogramas con las mallas de: 5x5x7m, 7x7x7m y 9x9x7m respectivamente.

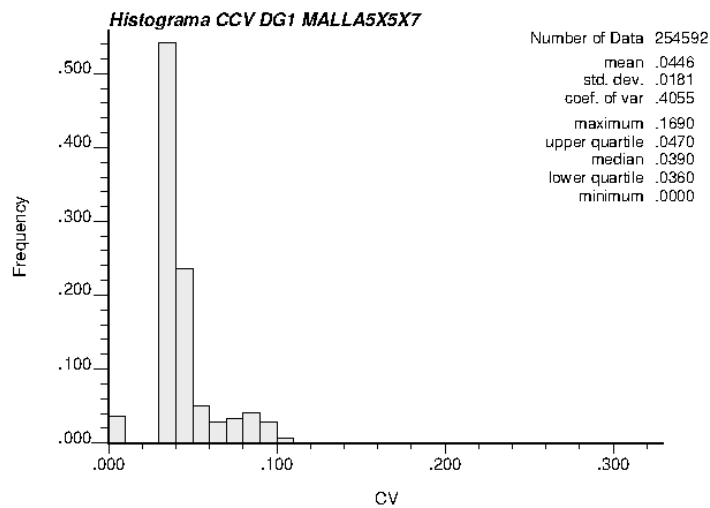


Figura 48. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG1 malla 5x5x7m

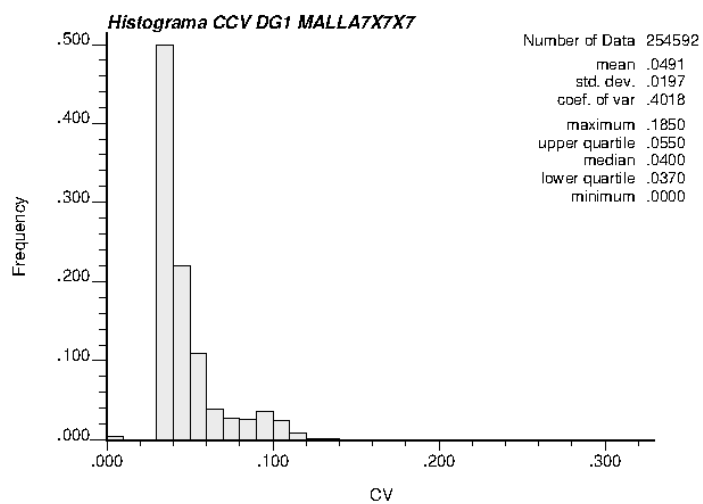


Figura 49. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG1 malla 7x7x7m

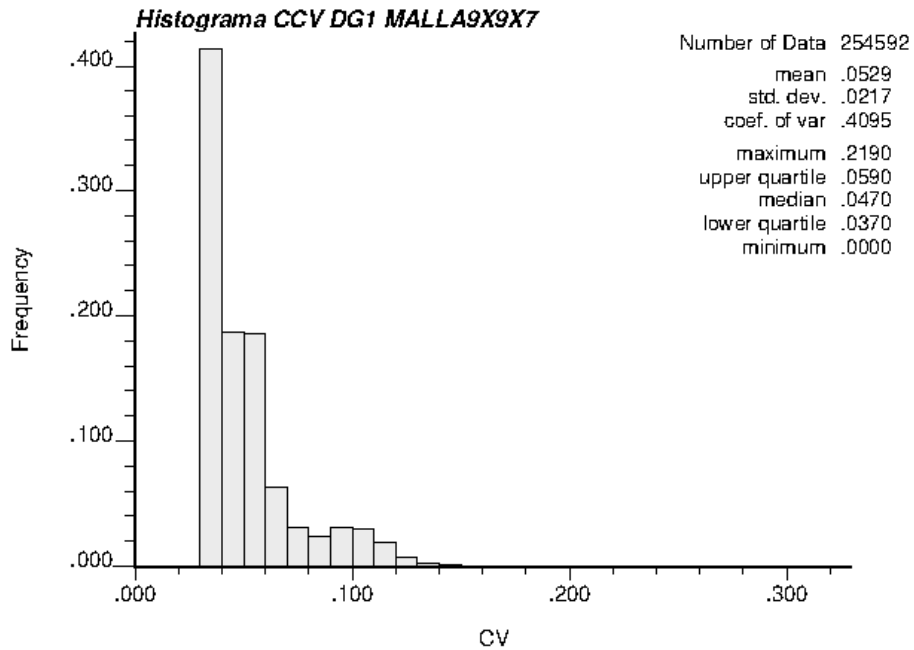


Figura 50. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG1 malla 9x9x7m

Observación: Entre la malla 5x5x7m y 7x7x7m se aprecian ciertos parecidos las formas del histograma, mientras que la malla 9x9x7m la forma del histograma es muy diferente.

Estrategia 2

En las Figuras 51, 52 y 53 se presentan los histogramas con las mallas de: 8x8x7m, 10x10x7m y 12x12x7m respectivamente.

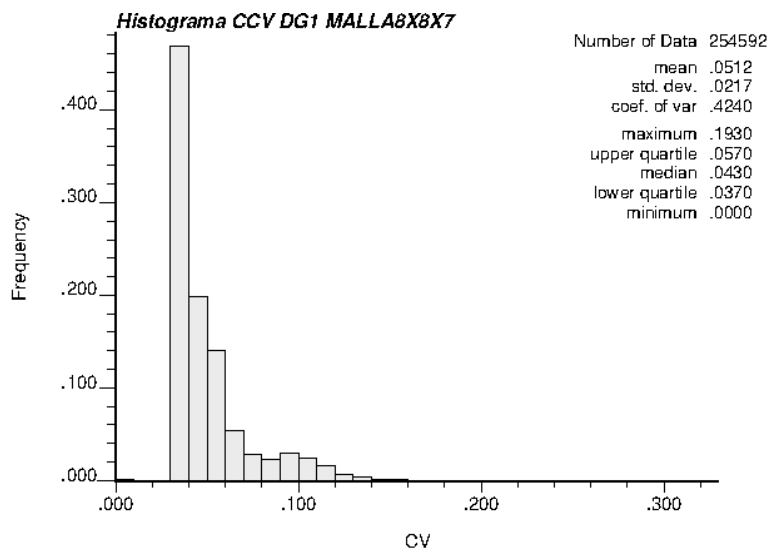


Figura 51. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG1 malla 8x8x7m

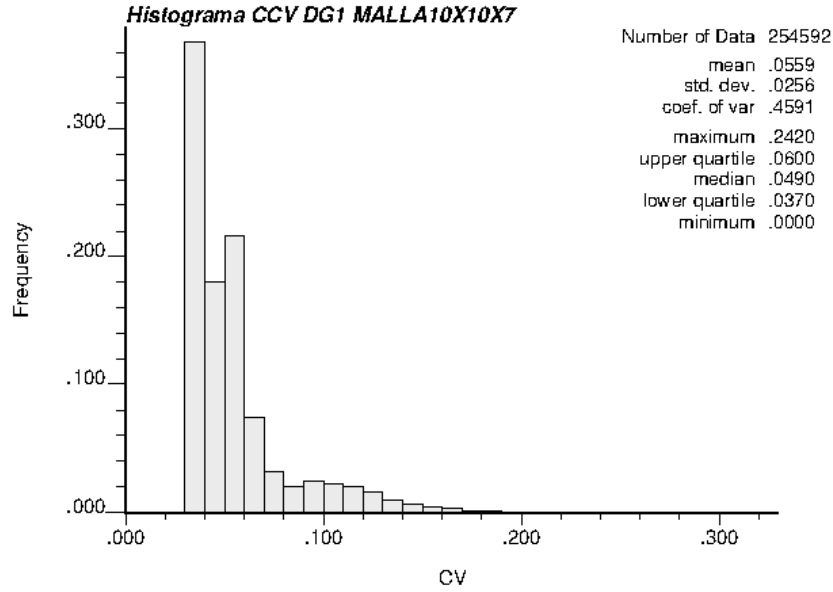


Figura 52. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG1 malla 10x10x7m

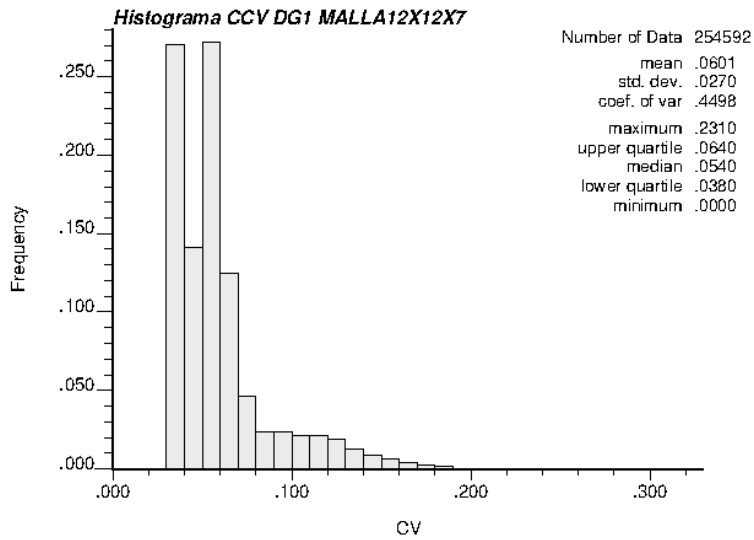


Figura 53. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG1 malla 12x12x7m

Observación: Es notorio que las formas de los histogramas son muy diferentes en cada malla de muestreo propuesta en el caso 2.

DG2, CASO 2

Estrategia 1

En las Figuras 54, 55 y 56 se presentan los histogramas con las mallas de: 5x5x7m, 7x7x7m y 9x9x7m respectivamente.

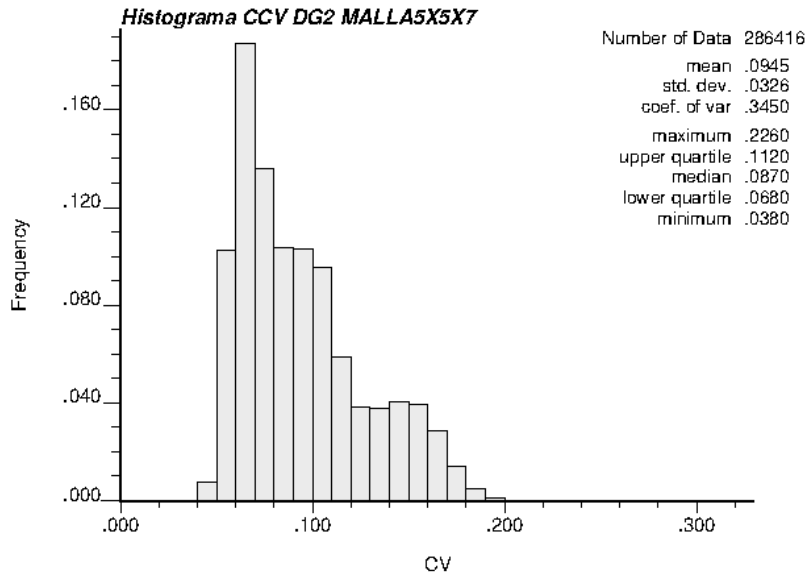


Figura 54. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG2 malla 5x5x7m

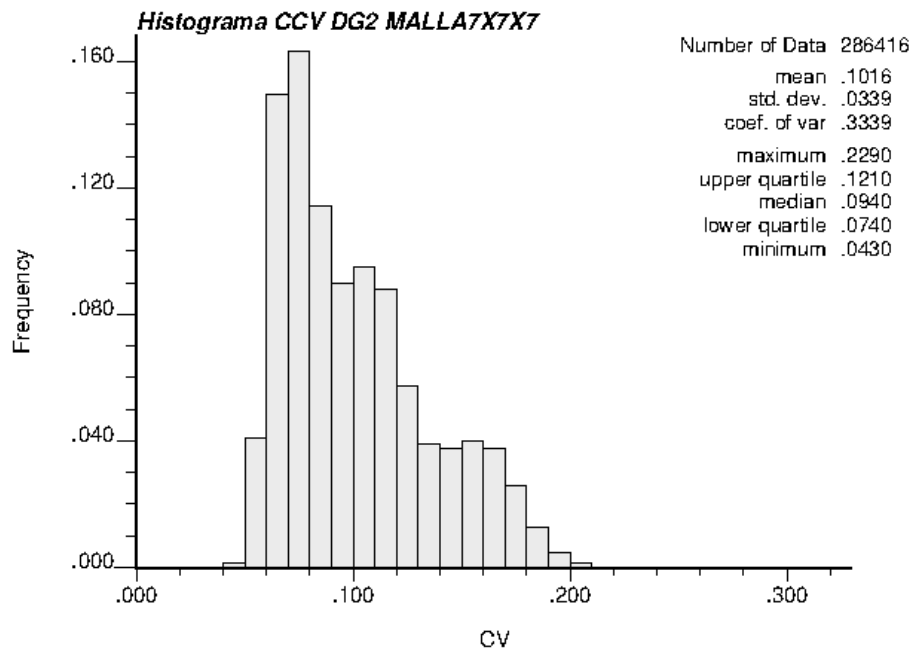


Figura 55. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG2 malla 7x7x7m

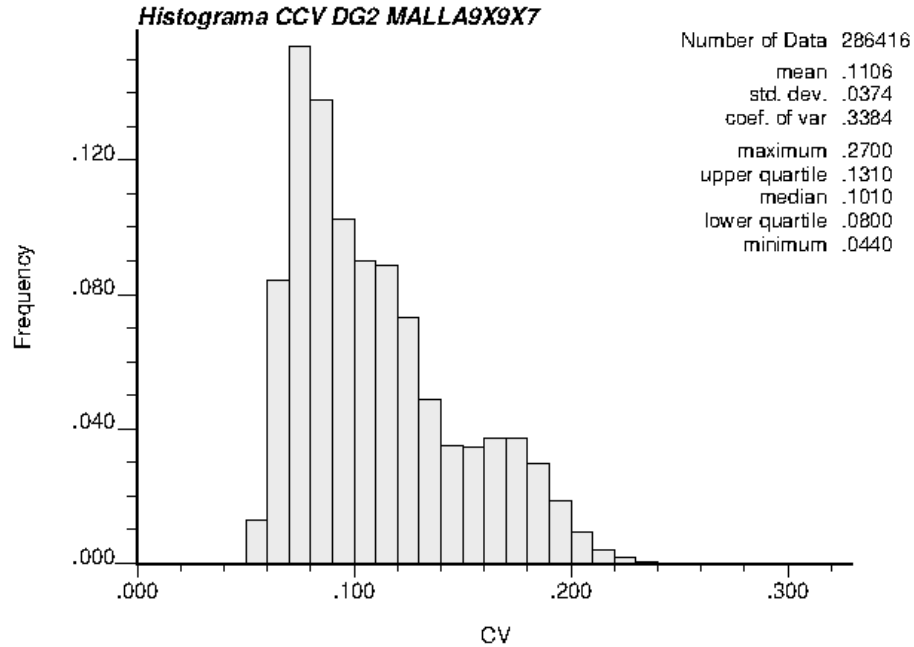


Figura 56. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG2 malla 9x9x7m

Observación: Entre las mallas 7x7x7m y 9x9x7m la forma de los histogramas son muy parecidos.

Estrategia 2

En las Figuras 57 y 58 se presentan los histogramas con las mallas de: 6x6x7m, 8x8x7m respectivamente.

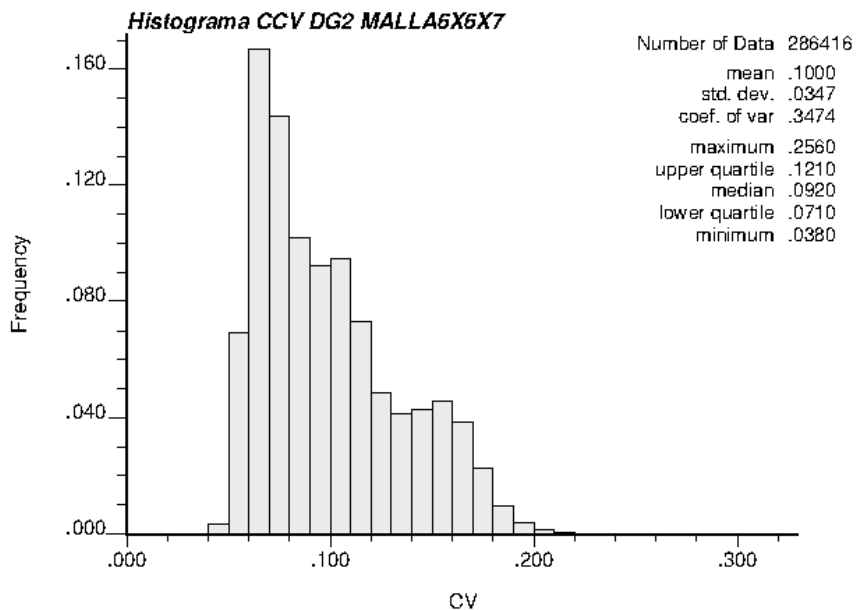


Figura 57. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG2 malla 6x6x7m

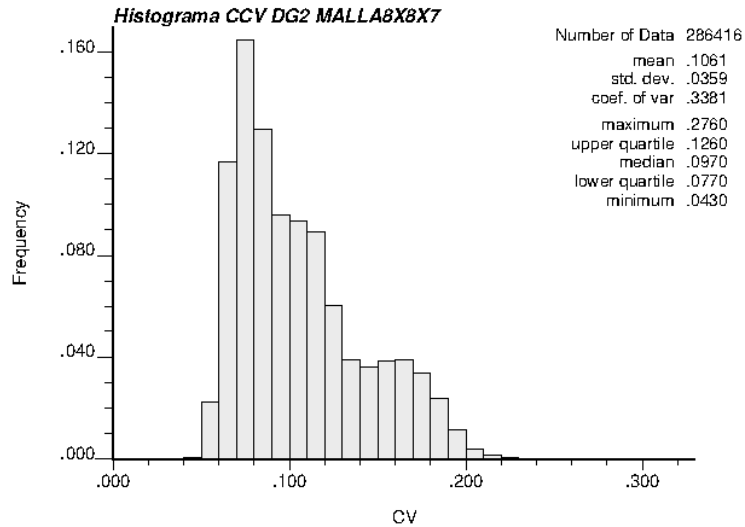


Figura 58. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG2 malla 8x8x7m

Observación: Entre las mallas 6x6x7m y 8x9x7m la forma de los histogramas son muy parecidos.

DG3, CASO 3

Estrategia 1

En las Figuras 59, 60 y 61 se presentan los histogramas con las mallas de: 5x5x7m, 7x7x7m y 9x9x7m respectivamente.

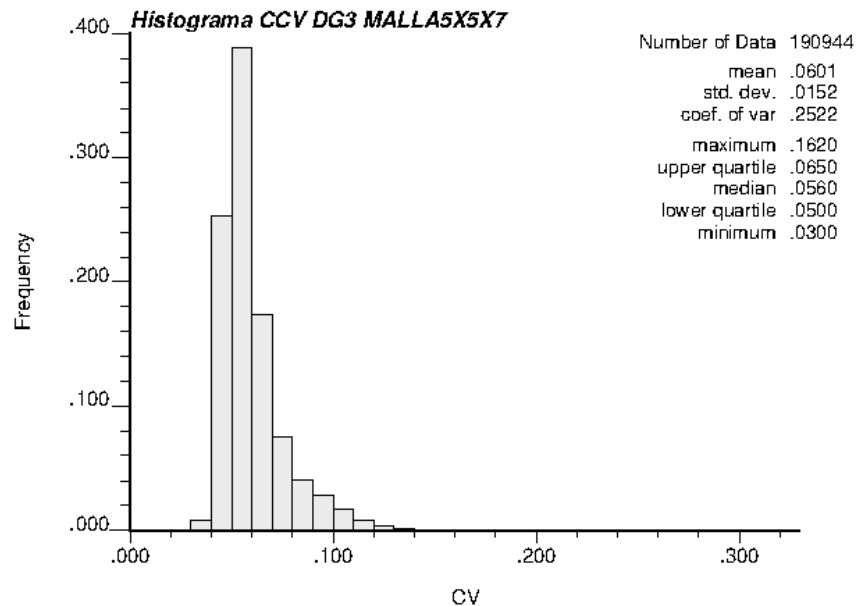


Figura 59. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG3 malla 5x5x7m

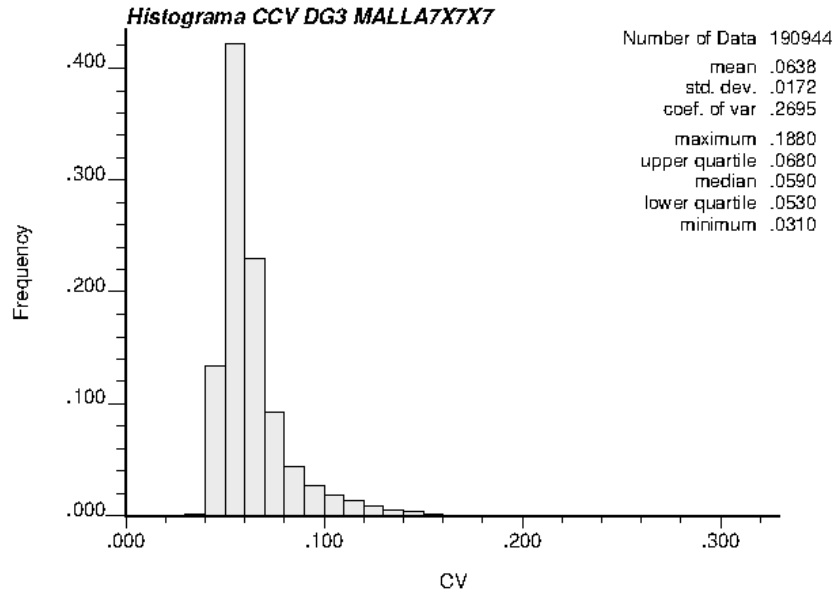


Figura 60. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG3 malla 7x7x7m

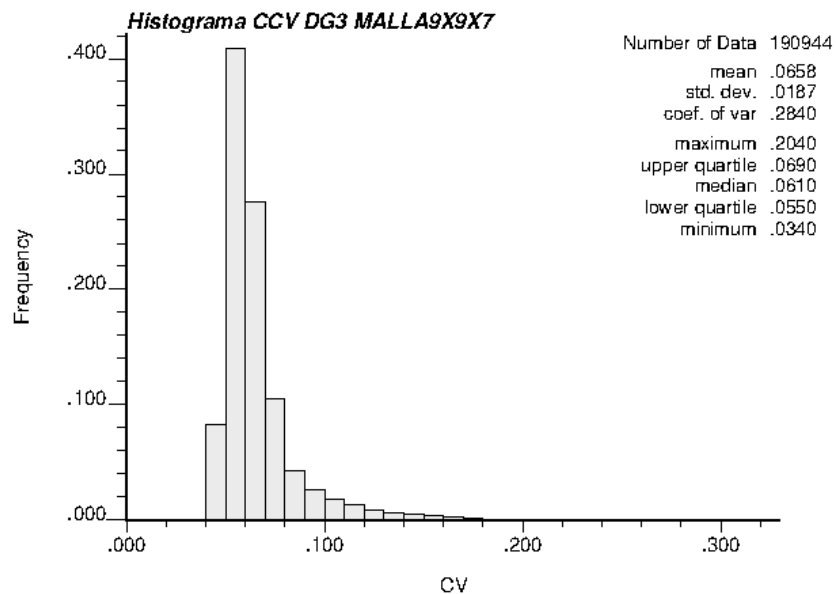


Figura 61. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 1 DG3 malla 9x9x7m

Observación: Entre las mallas 7x7x7m y 9x9x7m la forma de los histogramas son muy parecidos.

Estrategia 2

En las Figuras 62, 63 y 64 se presentan los histogramas con las mallas de: 6x6x7m, 8x8x7m y 10x10x7m respectivamente.

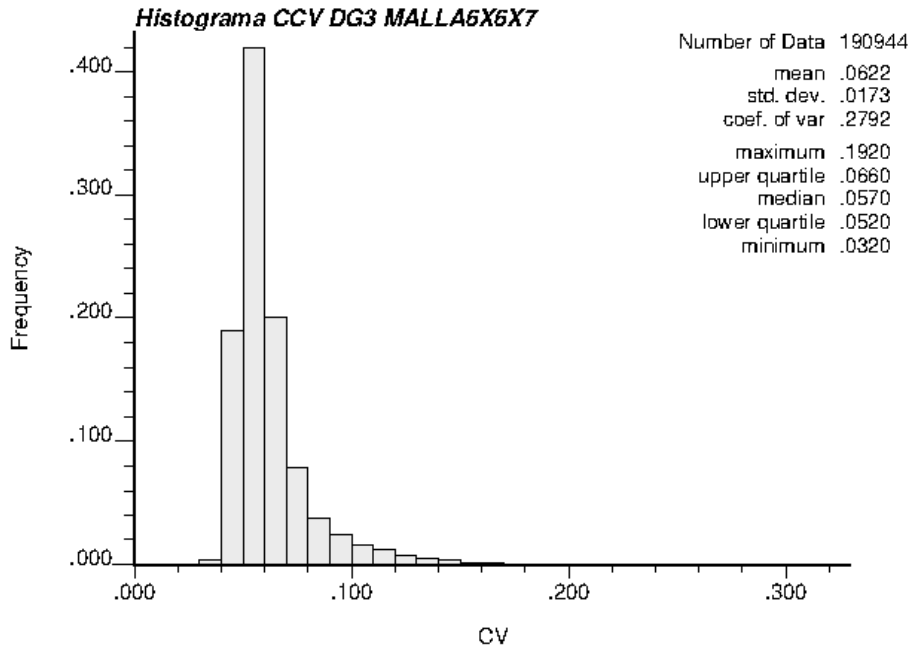


Figura 62. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG3 malla 6x6x7m

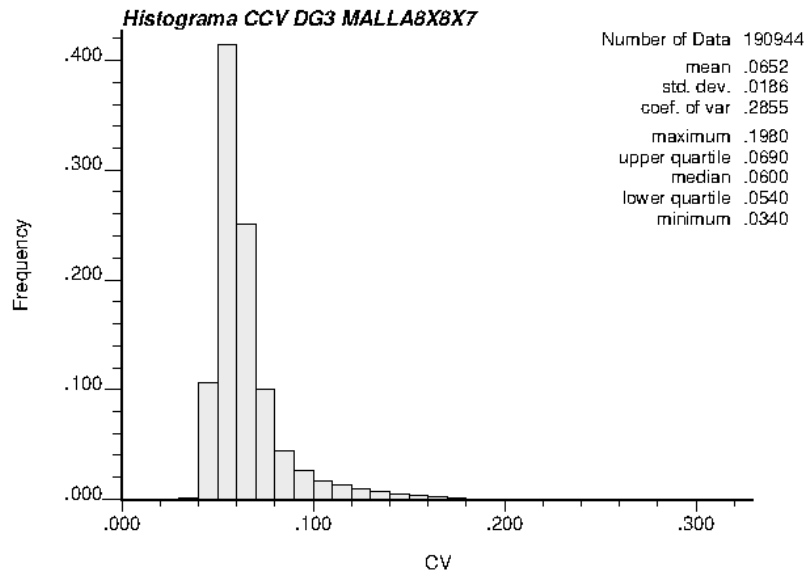


Figura 63. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG3 malla 8x8x7m

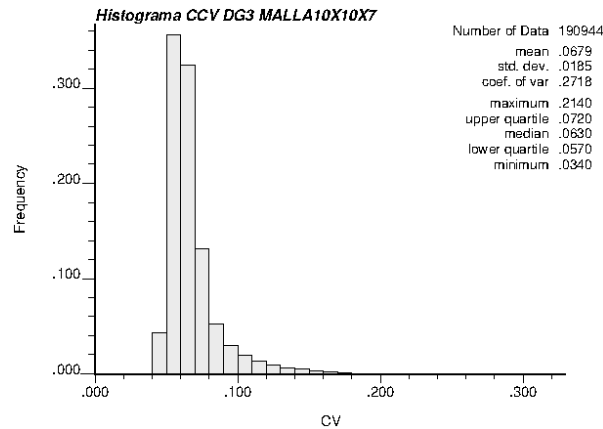


Figura 64. Histograma CCV (coeficiente de variación condicional), estrategia 2 DG3 malla 10x10x7m

Observación: Es notorio que las formas de los de la malla 8x8x7m y 10x10x7m son muy parecidas.

Finalmente se concluye que con este análisis se puede intuir que existen diferencias al pasar de una malla a otra en el respectivo dominio analizado, basado en la media del CCV y la forma del histograma, lo cual no es suficiente ya que no se conocen recursos vs incertidumbre, lo cual se discute en el capítulo 9.

9 Categorización de Recursos Geológicos

La categorización de recursos geológicos y reservas mineras es una de las etapas más críticas en la evaluación de un proyecto minero. El financiamiento e inversiones dependen de la cantidad (tonelaje) y calidad (ley) de los recursos y reservas. Es también uno de los procedimientos más subjetivos en la evaluación, la clasificación queda sujeta a la opinión experta de un especialista en evaluación de yacimientos.

Categorizar un recurso mineral como Medido, Indicado, Inferido y una reserva como Probada o Probable respectivamente, es un requisito tanto para informes públicos como para evaluaciones internas de la compañía (activos mineros). Desde la comprensión de los recursos minerales hasta la estimación de las reservas de mineral, la incertidumbre geológica tiene un gran impacto en los recursos y clasificación de reserva.

9.1 Código JORC

Dentro de los códigos internacionales existentes y que hacen parte de CRIRSCO, el JORC es uno de los más usado para generar los informes públicos. Es un código de Australasia, la guía fue publicada desde 1990 para la generación de informes públicos por parte de las personas competentes (persona con un grado de experticia

en experiencia sobre el recurso geológico a evaluar). Los principales principios que rigen la operación y aplicación del Código JORC son transparencia, relevancia y competencia. A continuación, se presente en la figura 65 la relación entre resultados de exploración, recursos y reservas minerales.



Figura 65. Resultados de exploración, recursos y reservas minerales del código JORC.

Este esquema permite orientar el presente trabajo para la optimización de la malla de muestreo en cada dominio geológico, para ser reservas mineras, solo se tienen presentes los bloques categorizados como medidos e indicados.

9.2 El coeficiente de variación condicional como criterio de categorización

La clasificación de recursos/reservas se basa tradicionalmente en criterios geométricos, como el número de muestras o perforaciones dentro de un volumen alrededor de los bloques de depósito que se clasifican, o alternativamente. Otra forma es usando la varianza de estimación (kriging). Estos criterios son relativamente fáciles de entender e implementar, sin embargo, no tiene presente la variabilidad local de las leyes, lo que lleva a tergiversación de la confianza de las clasificaciones (categorizaciones) estimadas dentro de volúmenes.

Actualmente existen criterios para hacer categorizaciones de recursos geológicos basados en la simulación geoestadística, marco para cuantificar la incertidumbre geológica y el riesgo en cuatro pasos: 1) generación de realizaciones del depósito en el soporte de bloques, 2) derivación de funciones de distribución condicional (ccdf) para cada bloque y atributo seleccionado, 3) evaluación y producción de perfiles de riesgo, 4) utilización del coeficiente de variación condicional (CCV) de la

ccdf como el medida de incertidumbre para la clasificación de recursos de cada bloque.

El CCV (coeficiente de variación condicional) será usado en el presente trabajo, ya que integra tanto las consideraciones geométricas tradicionalmente usadas, en el sentido de ubicaciones de datos, como la variabilidad in situ de las leyes. Con el CCV se conoce la variabilidad bloque a bloque, lo que resulta muy útil para hacer la categorización de un recurso geológico, en medido, indicado e inferido.

9.3 El gráfico tonelaje ley sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional)

En este gráfico, se ordenan los bloques de menor a mayor CCV. Para cada CCV y para una ley de corte predefinida, se calcula el tonelaje sobre esta ley de corte en las diferentes realizaciones, resultando 100 curvas de tonelaje sobre una ley de corte vs CCV.

Las diferentes curvas permiten establecer umbrales de CCV para categorizar un recurso geológico en medidos (para CCV pequeños, cuando las curvas tienen poca dispersión), indicados (para CCV intermedios, cuando la dispersión entre las curvas aumenta) e inferidos (para CCV altos, cuando la dispersión entre las curvas está cerca de su nivel máximo). Tomando como referencia el código internacional JORC, solo los bloques medidos e indicados pueden tomarse como reserva.

DG1, CASO 1

A continuación, se analizan las siguientes estrategias de muestreo estudiadas; malla 5x5x7m, 6x6x7m, 7x7x7m y 8x8x7m. Para definir la malla óptima de corto plazo en el dominio geológico 1 (DG1), se utilizó las interpretaciones del CCV (bloque a bloque) sobre una ley de corte establecida en el respectivo dominio geológico. En el anexo 1, se presentan los umbrales definidos en la categorización de los recursos para el caso 1 (DG1).

Malla 5x5x7m

La figura 66 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel, las puntas de las flechas/líneas en color indican los umbrales del CCV: medidos (rojo), indicados (verde) e inferidos (azul)

Malla 6x6x7m

La figura 67 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel.

Malla 7x7x7m

La figura 68 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel.

Malla 8x8x7m

La figura 69 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel.

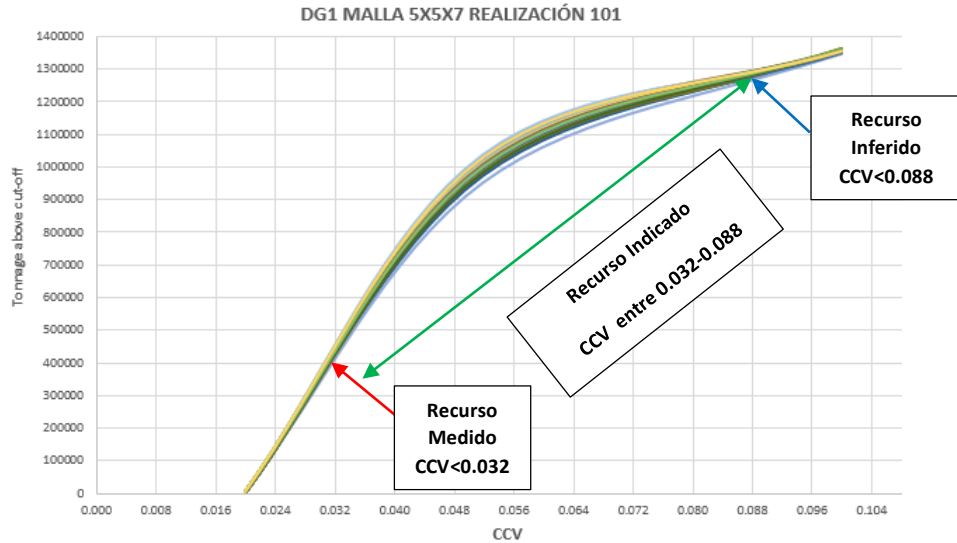


Figura 66. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG1, malla 5x5x7m. Umbrales CCV: línea roja (recurso medido), línea verde (recurso indicado) y línea azul (recurso inferido).

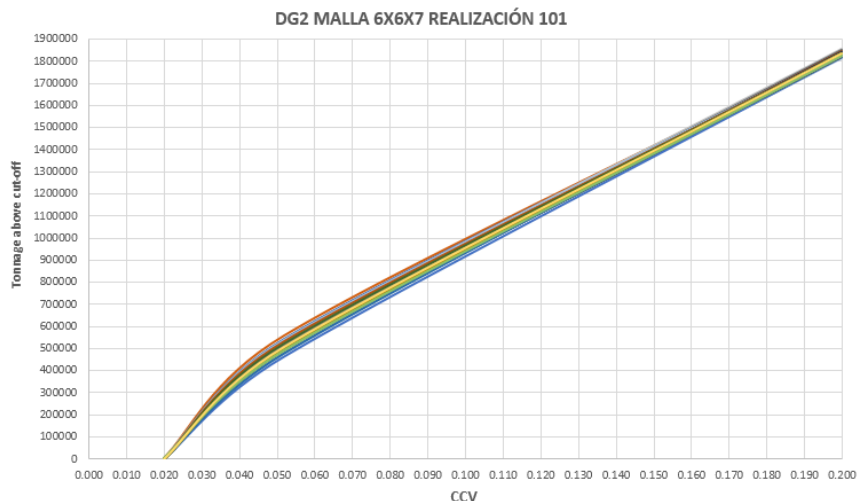


Figura 67. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG1, malla 6x6x7m.

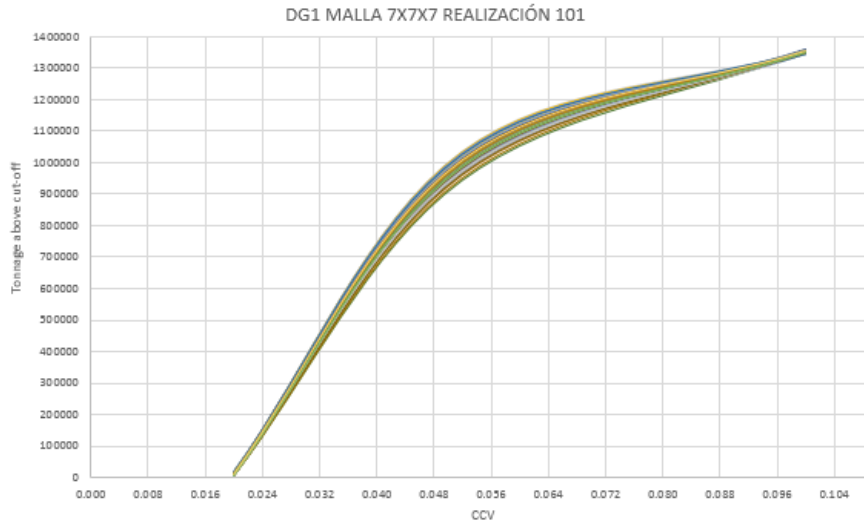


Figura 68. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG1, malla 7x7x7m.

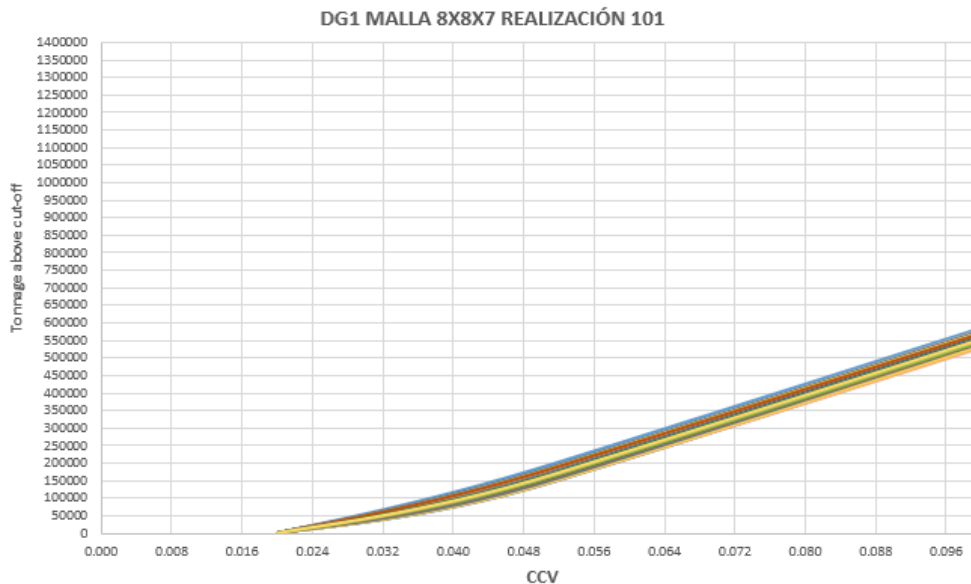


Figura 69. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG1, malla 8x8x7m.

Nota: Se definen los umbrales del CCV de la siguiente manera, por ejemplo en la malla 5x5x7m para hacer la categorización de los recursos del DG1 figura 66, las líneas representan las 100 realizaciones (curvas), las flechas de color indican un cambio de umbral, el punto de inflexión, donde se comienzan abrir las curvas, CCV de 0.035 (rojo), nuevamente se estabilizan en el CCV desde 0.088 (azul) en adelante. Finalmente los umbrales/categorización de recursos son los siguientes, ver anexo 1: $CCV < 0.032$ Medidos, CCV entre 0.032-0.088 Indicados (color verde) y $CCV > 0.088$ Inferidos.

DG2. CASO 2

A continuación, se analizan las siguientes estrategias de muestreo estudiadas; malla 5x5x7m, 6x6x7m y 7x7x7m. Para definir la malla óptima de corto plazo en el dominio geológico 2 (DG2), se utilizó las interpretaciones del CCV bloque a bloque sobre una ley de corte establecida en el respectivo dominio geológico. En el anexo 2, se presentan los umbrales definidos en la categorización de los recursos para el caso 2 (DG2).

Malla 5x5x7m

La figura 70 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel, las puntas de las flechas/líneas en color indican los umbrales del CCV: medidos (rojo), indicados (verde) e inferidos (azul).

Malla 6x6x7m

La figura 71 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.7% de níquel.

Malla 7x7x7m

La figura 72 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.7% de níquel.

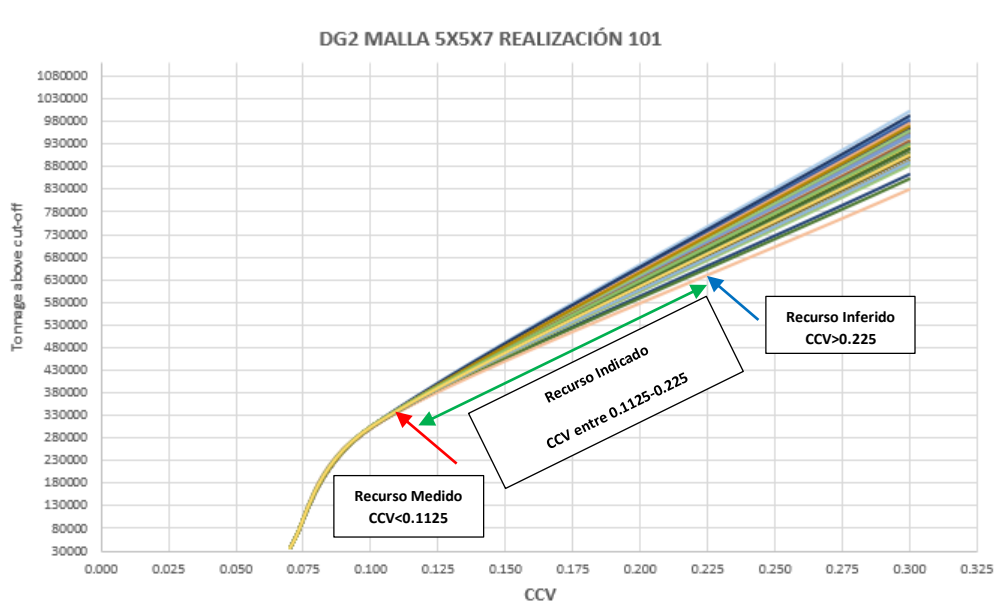


Figura 70. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG2, malla 5x5x7m. Umbrales CCV: indicando con la punta de la línea roja (recurso medido), línea verde (recurso indicado) y línea azul (recurso inferido).

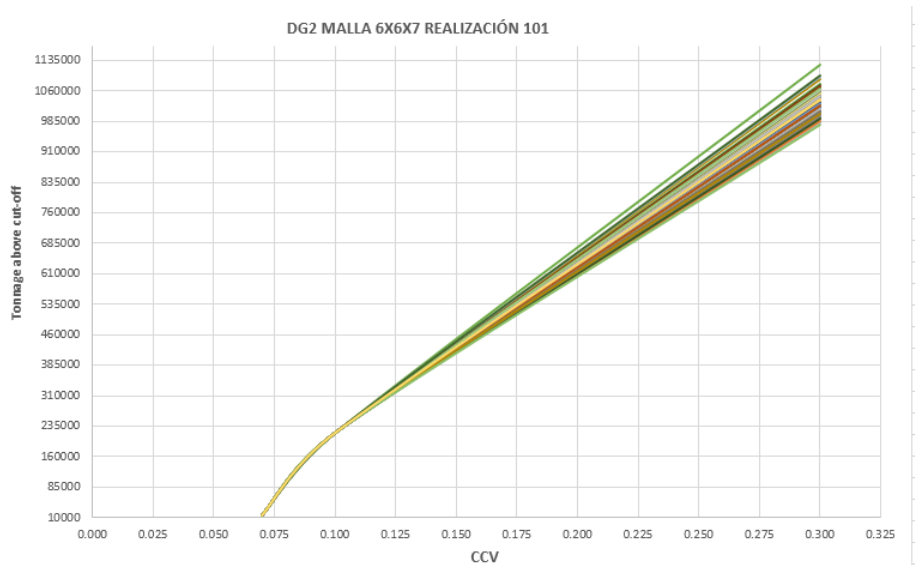


Figura 71. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG2, malla 6x6x7

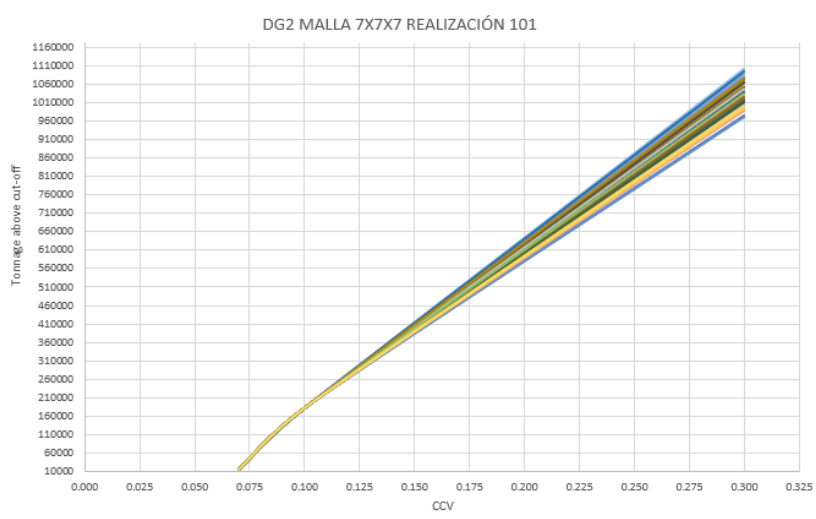


Figura 72. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG2, malla 7x7x7

Nota: Se definen los umbrales del CCV de la siguiente manera, por ejemplo en la malla 5x5x7m para hacer la categorización de los recursos del DG2 figura 70, las líneas representan las 100 realizaciones (curvas), las flechas de color indican un cambio de umbral, el punto de inflexión, donde se comienzan abrir las curvas, CCV de 0.1125 (rojo), nuevamente se estabilizan en el CCV desde 0.225 (azul) en adelante. Finalmente los umbrales/categorización de recursos son los siguientes, ver anexo 1: CCV<0.1125 Medidos, CCV entre 0.1125-0.225 Indicados (color verde) y CCV>0.225 Inferidos.

DG3, CASO3

A continuación, se analizan las siguientes estrategias de muestreo estudiadas; malla 5x5x7m, 6x6x7m y 7x7x7m. Para definir la malla óptima de corto plazo en el dominio geológico 2 (DG2), se utilizó las interpretaciones del CCV bloque a bloque sobre una ley de corte establecida en el respectivo dominio geológico. En el anexo 1, se presentan los umbrales definidos en la categorización de los recursos para el caso 1 (DG1).

Malla 5x5x7m

La figura 73 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.25% de níquel, las puntas de las flechas/líneas en color indican los umbrales del CCV: medidos (rojo), indicados (verde) e inferidos (azul).

Malla 6x6x7m

La figura 74 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.7% de níquel.

Malla 7x7x7m

La figura 75 muestra el gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV (coeficiente de variación condicional). Ley de corte: mayor o igual 0.7% de níquel.

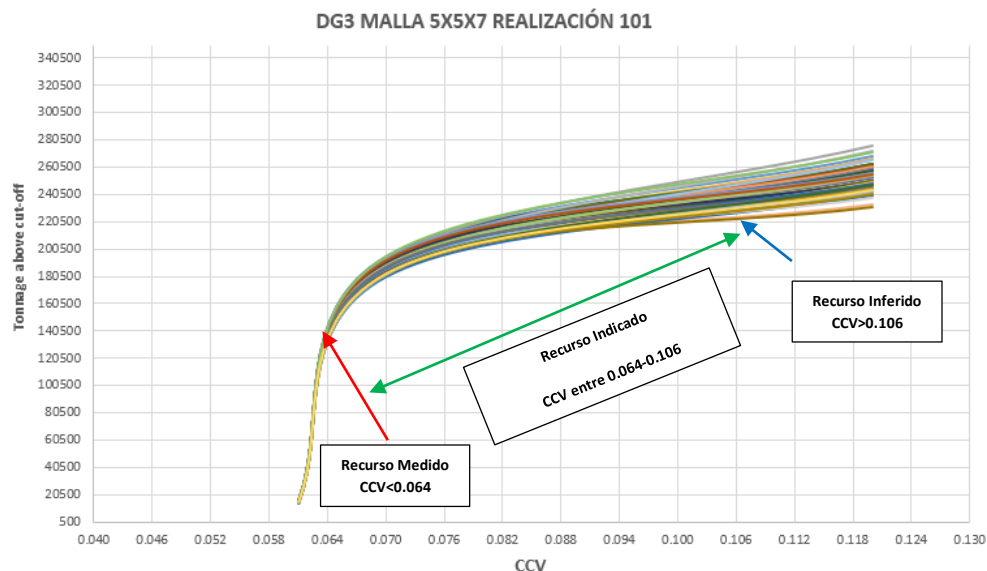


Figura 73. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG3, malla 5x5x7m. Umbrales CCV: línea roja (recurso medido), línea verde (recurso indicado) y línea azul (recurso inferido).

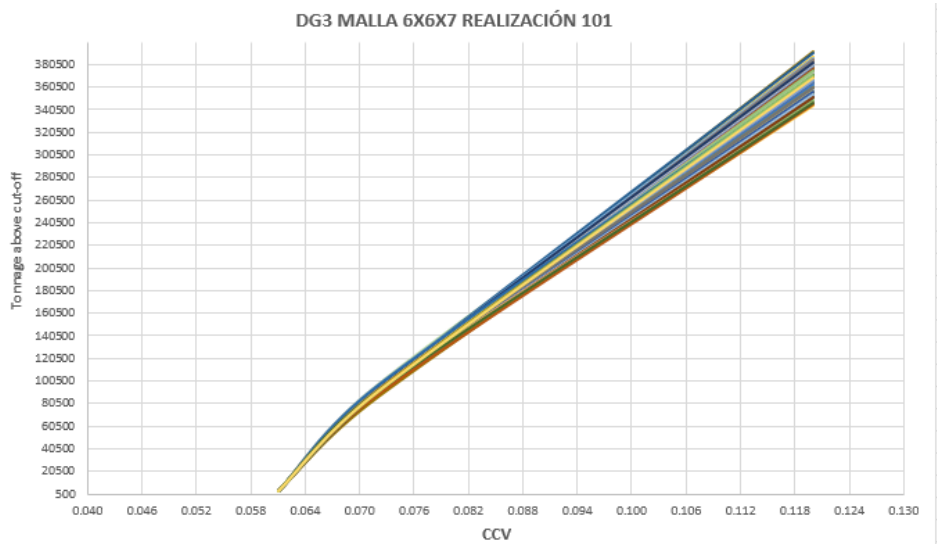


Figura 74. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG3, malla 6x6x7m

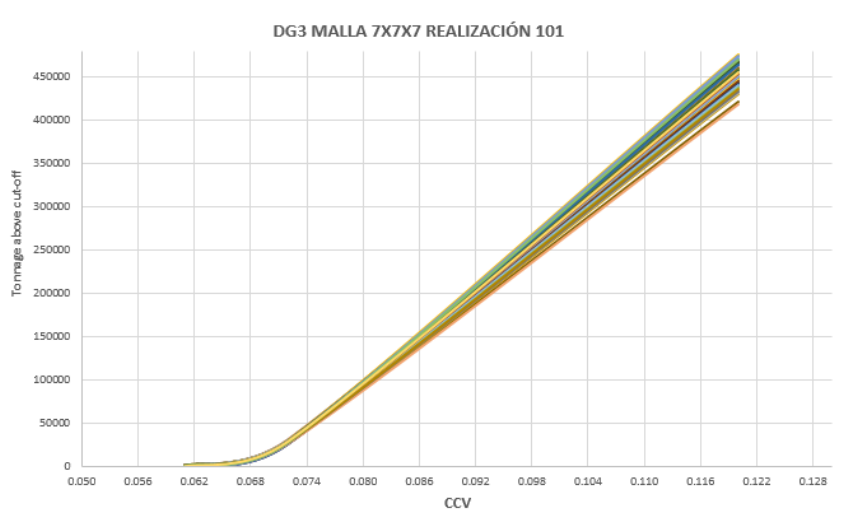


Figura 75. Gráfico tonelaje sobre una ley de corte vs CCV, DG3, malla 7x7x7m

Nota: Se definen los umbrales del CCV de la siguiente manera, por ejemplo en la malla 5x5x7m para hacer la categorización de los recursos del DG1 figura 73, las líneas representan las 100 realizaciones (curvas), las flechas de color indican un cambio de umbral, el punto de inflexión, donde se comienzan abrir las curvas, CCV de 0.064 (rojo), nuevamente se estabilizan en el CCV desde 0.106 (azul) en adelante. Finalmente los umbrales/categorización de recursos son los siguientes, ver anexo 1: $CCV < 0.064$ Medidos, CCV entre 0.064-0.106 Indicados (color verde) y $CCV > 0.106$ Inferidos.

10 Resultados

Dentro de los resultados obtenidos en el análisis de los respectivos umbrales determinados en la categorización de los recursos usando el CCV (coeficiente de variación condicional), para definir en cada dominio geológico la malla óptima de muestreo a corto plazo, se utiliza la relación costo/beneficio/número de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta (CBNT). A continuación se hace un resumen de los aspectos usados para definir la malla óptima para cada dominio geológico, ver tabla 13.

DATOS DE OPERACIÓN MINA-LABORATORIO	
1 ton a Libra (1x10 ³)	2.204
\$USD/Libra (Nov17)	5.7
Costo BARRENO (Mina+Lab) \$USD	60
Recuperación Metalúrgica (%)	0.75
Tiempo Muestra Laboratorio (hrs)	24
Muestras Analizadas Lab (Día)	225
Muestras Analizadas Lab (Mes)	6750
Metros Plan por Día (mts)	540
Trabajo Perforación por Día (hrs)	16
Muestras Perforadas (Día)	77

Tabla 13. Datos utilizados de la operación/laboratorio costos, preparación, análisis y tiempo, para determinar la malla óptima en cada dominio geológico (DG)

10.1. CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta)

Utilizando los valores de la tabla 13, se determinan los aspectos (CBNT); número de muestras que se perforan con la malla propuesta en cada dominio geológico y costo/tiempo de los barrenos perforados, tiempo en perforar la malla propuesta (día), tiempo en preparar-analizar muestras en el laboratorio. Con estos valores se define la malla óptima para cada dominio geológico, donde se proponen diferentes estrategias de mallas de muestreo. En la tabla 14 se presenta un ejemplo para el caso del dominio geológico 1 (DG1).

MALLA DG1	USD \$ MUESTRAS (1x10 ³)	TIEMPO PERFORAR MUESTRA MINA (DÍA)	TIEMPO ANALIZAR MUESTRA LABORATORIO (DÍA)	COSTO/BENEFICIO USD\$ (1x10 ³)
5x5x7	630	136	47	6589
6x6x7	424	92	31	6021
7x7x7	331	72	25	6640
8x8x7	250	54	18	6128

Tabla 14. Tabla CBNT, DG1, mallas de muestreo 5x5x7m, 6x6x6x7m, 7x7x7m y 8x8x7m. Al final en color verde se subraya que la malla 7x7x7m es la que mejor tiene relación costo/beneficio, además tiempo (días) perforar y análisis-resultados laboratorio impacta la operación minera/laboratorio.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los tres dominios geológicos estudiados.

DG1 (DOMINIO GEOLOGICO 1)

En las tablas anexo 1 y 2 se analizan los resultados obtenidos en cada malla de muestreo estudiada, bajo las relaciones (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta). Finalmente la malla óptima en el DG1 es de 7x7x7m.

DG2 (DOMINIO GEOLOGICO 2)

En las tablas anexo 3 y 4 se analizan los resultados obtenidos en cada malla de muestreo estudiada, bajo las relaciones CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta). Finalmente la malla óptima en el DG2 es de 6x6x7m.

DG3 (DOMINIO GEOLOGICO 3)

En las tablas anexo 5 y 6 se analizan los resultados obtenidos en cada malla de muestreo estudiada, bajo las relaciones CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta). Finalmente la malla óptima en el DG3 es de 6x6x7m.

Es importante aclarar que la malla de muestreo actual de corto plazo es de 5x5x7m para todo el depósito, con los resultados obtenidos hace pensar reevaluar la estrategia de muestreo usada y poner en práctica esta metodología de trabajo con el uso del CCV (coeficiente de variación condicional) para categorizar recursos geológicos.

De los resultados obtenidos, se concluye que la zona de mayor variabilidad es el dominio geológico 2 (DG2), la cual exige una malla más densa que los otros dominios, además se comprueba que la malla actual en las zonas más críticas (zona de mineralización) se puede ampliar, conservando el riesgo/incertidumbre/tonelaje con la malla de 6x6x7 vs 5x5x7m (actual).

Capítulo 7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

El estudio ilustra el aporte del concepto de dominios geológicos para subdividir los depósitos de lateritas, lo cual permite optimizar un proceso en la operación minera, como es la malla de muestreo a corto plazo.

En relación al objetivo principal planteado durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se logró definir la malla óptima de corto plazo en los tres dominios geológicos estudiados, usando simulación geoestadística y con el uso del coeficiente de variación condicional (CCV) como medida de incertidumbre para clasificar los recursos y analizar la relación CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta).

Según los casos de estudios, DG1, DG2 y DG3, se determina lo siguiente: dominio geológico 1 (DG1), la malla óptima en esa zona con características litológicas definidas es de 7x7x7m; en el dominio geológico 2 (DG2), la malla óptima es de 6x6x7m; en el dominio geológico 3 (DG3), la malla óptima es de 7x7x7m. Es importante aclarar que la malla de muestreo actual de corto plazo es de 5x5x7m, lo cual hace pensar reevaluar la estrategia de muestreo usada y poner en práctica esta metodología de trabajo, con el uso del CCV (coeficiente de variación condicional) para categorizar recursos geológicos y aplicarlo a la optimización de las mallas de muestreo a corto plazo. Es de resaltar que la mayor variabilidad se presenta en la zona intermedia del perfil de meteorización, en este caso el DG2 (dominio geológico 2), la cual exige una malla más densa que en los otros dominios.

Con todo lo anterior, se concluye que la metodología propuesta genera cierta confianza, ya que la variabilidad de la malla óptima se define bloque a bloque, donde la medida del CCV complementa las técnicas actualmente aplicadas que son meramente geométricas o, en el caso de la varianza de error obtenida por kriging, no toman en cuenta la variabilidad local (en particular, el efecto proporcional), mientras que la simulación sí la considera.

7.2 Recomendaciones

Con el uso del CCV (coeficiente de variación condicional), la metodología propuesta es muy clara y reproducible. Permite ser más confiable al momento de una auditoría, por lo tanto, es recomendable usarla al momento de optimizar mallas de muestreo a corto plazo en las operaciones mineras.

Se hace las siguientes recomendaciones para futuros trabajos:

- Revisar y ajustar los dominios geológicos finales antes de proponer dicha metodología. Cada dominio debe ser validado usando técnicas geoestadísticas.
- Hacer los análisis para los demás atributos (elementos; Fe, MgO, SiO₂, Al₂O₃), con el fin de relacionarlos y así tener mayores argumentos al momento de ajustar la respectiva malla de muestreo de corto plazo.
- Reconsiderar la metodología y en lo posible evaluar la posibilidad de hacer pruebas con el fin de encontrar la buena aplicación de los aspectos CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta).
- En la zona de baja ley, caso dominio geológico 1 (DG1), se puede pensar en ampliar la malla en sectores donde las concentraciones estén por debajo de la ley de corte para estos tipos de materiales (rocas como peridotitas, peridotita saprolitizada), ya que en ciertos lugares del depósito se presentan valores que se encuentran por debajo de la ley de corte, concentración de níquel menor a 0.25 por ciento (%).
- Se recomienda para estudios posteriores simular en grilla fina la geología, muchas veces la incertidumbre se encuentra en los contactos más que en las leyes. Además realizar mapas de clasificación de recursos y CCV (coeficiente de variación condicional), y declarar el nivel de incertidumbre esperado en los recursos categorizados con cierta malla (intervalo de confianza), sobre un volumen de producción, mensual, anual o similar.

Bibliografía

- Boyle, C. (s.f.). Conditional Simulation Methods to Determine Optimum Drill Hole Spacing. *Spectrum Series*, 11.
- Brus, D. J., & Heuvelink, G. B. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *ScienceDirect, ELSEVIER*, 10.
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G. (1997). *GSLIB Geostatistical Software Library an User's Guide*. Stanford, California: Oxford University Press. Second Edition.
- Dimitrakopoulos, R., Godoy, M., Chou, C.L. (2009). Resource/reserve classification with integrated geometric and local grade variability measures. In proceedings, Orebody modelling and strategic mine planning 2009, AusIMM, p. 207–214
- Emery, X. (2000). *Geoestadística Lineal*. Santiago de Chile: Servicios Gráficos Claus Von Plate y Cía. Ltda.
- Emery, X., Ortiz, J.M., Rodríguez, J. (2004) Quantifying uncertainty in mineral resources by use of classification schemes and conditional simulations. *Math Geol* 38(4):445-564
- Energética, Unidad de Planeación Minero. (2009). *El Níquel en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Hernández, J., & Emery, X. (2009). A geostatistical approach to optimize sampling designs for local forest inventories. *NRC Research Press*, 10.
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J. (1978) *Mining geostatistics*. Academic Press, London.
- Matoso, C. (2008). *Cerro Matoso 1982-2008*. Montelibano (Córdoba): ISBN Obra independiente.
- Maleki Tehrani, M.A., Asghari, O., Emery, X. (2013). Simulation of mineral grades and classification of mineral resources by using hard and soft conditioning data: application to Sungun porphyry copper deposit. *Arab J Geosci* 6:3773–3781
- Mining.com. http://www.mining.com/nickel-price-picked-as-2017-winner/?utm_source=digest-en-mining-170130&utm_medium=email&utm_campaign=digest
- Soltani-Mohammadi, S.A. (2013) A Simulated Annealing-Based Algorithm to Locate Additional Drillholes for Maximizing the Realistic Value Information. *Natural Resources Research*, 9.
- Soltani, S. (2013). Proposed algorithm for optimization of directional additional exploratory drill holes and computer coding. *Arabian Journal of Geosciences*, 455-462.
- van Groenigen, J.W., Siderius, W., Stein, A. (1999). Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma* 87(3-4): 239-259.

ANEXOS

RESULTADO DE CLASIFICACIÓN MALLA 5X5X7 DG1				
Ton Bloques	588.43	No Bloques		
Categoría	CCV	Min	Max	Average
Medidos	<0.032	0	1108	15
Indicados	0.032-0.088	2977	4063	3995
Inferidos	>0.088	1	1	1
Bloques/Ton (1x10 ³ t)/Ley(%)		2978	5172	4011

RESULTADO DE CLASIFICACIÓN MALLA 5X5X7 DG1			Ley de Corte >=0.25%			Muestras: 10496			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)				
Ton Bloques	588.43	No Bloques			Tonelaje (1x10 ³ Ton)			Ley			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Categoría	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Medidos	<0.032	0	1108	15	0	682	9	0	0.328	0.246	0	214	2	0.00	160	2	0	2015	20
Indicados	0.032-0.088	2977	4063	3995	1752	2391	2351	0.321	0.327	0.325	562	782	764	422	586	573	5298	7366	7189
Inferidos	>0.088	1	1	1	1	1	1	0.351	0.534	0.423	0.21	0.31	0.25	0.15	0.24	0.19	2	3	2
Bloques/Ton (1x10 ³ t)/Ley(%)		2978	5172	4011	1752	3043	2360	0.224	0.396	0.331	563	996	766	422	747	575	5300	9384	7219
RESULTADO DE CLASIFICACIÓN 6X6X7 DG1			Ley de Corte >=0.25%			Muestras: 7072			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)				
Ton Bloques	588.43	No Bloques			Tonelaje (1x10 ³ Ton)			Ley			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Categoría	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Medidos	<0.030	0	934	10	0	550	6	0.000	0.333	0.119	0	183	1	0	137	1	0	1724	7
Indicados	0.030-0.080	2805	3714	3618	1651	2185	2129	0.318	0.324	0.321	525	708	683	394	531	513	4945	6672	6439
Inferidos	>0.080	180	299	294	106	176	173	0.325	0.367	0.359	34	65	62	26	48	47	324	608	585
Bloques/Ton (1x10 ³ t)/Ley(%)		2985	4947	3922	1756	2911	2308	0.214	0.341	0.266	559	956	746	419	717	560	5270	9004	6446
RESULTADO DE CLASIFICACIÓN MALLA 7X7X7 DG1			Ley de Corte >=0.25%			Muestras: 5520			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)				
Ton Bloques	588.43	No Bloques			Tonelaje (1x10 ³ Ton)			Ley			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Categoría	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Medidos	<0.032	8	1071	28	5	630	16	0.253	0.332	0.257	1	209	4	1	157	3	11	1971	40
Indicados	0.032-0.088	2881	4048	3970	1695	2382	2336	0.321	0.327	0.324	544	779	757	408	584	568	5127	7339	7131
Inferidos	>0.088	1	1	1	1	1	1	0.335	0.508	0.418	0.20	0.30	0.25	0.15	0.22	0.18	2	3	2
Bloques/Ton (1x10 ³ t)/Ley(%)		2890	5120	3999	1701	3013	2353	0.303	0.389	0.333	546	988	761	409	741	571	5140	9313	7171
RESULTADO DE CLASIFICACIÓN MALLA 8X8X7 DG1			Ley de Corte >=0.25%			Muestras: 4160			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)				
Ton Bloques	588.43	No Bloques			Tonelaje (1x10 ³ Ton)			Ley			Tonelaje Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Categoría	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Medidos	<0.035	0	650	7	0	382	4	0.332	0.024	0.024	0	127	0	0	95	0	0	1196	1
Indicados	0.035-0.088	3093	3754	3628	1820	2209	2135	0.315	0.324	0.317	573	716	677	430	537	508	5402	6743	6376
Inferidos	>0.088	231	378	376	136	222	221	0.326	0.399	0.392	44.31	88.75	86.73	33.23	66.56	65.05	418	836	817
Bloques/Ton (1x10 ³ t)/Ley(%)		3324	4782	4011	1956	2814	2360	0.321	0.352	0.244	618	931	764	463	699	573	5819	8776	6377

Tabla Anexo 1. DG1 categorización recurso geológico, umbrales definidos, y resultados basados en las gráficas tonelaje sobre una ley de corte vs

CCV

MALLA DG1	USD\$ MUESTRAS (1X10 ³)	TIEMPO PERFORAR MUESTRA MINA (DÍA)	TIEMPO ANALIZAR MUESTRA LABORATORIO (DÍA)	COSTO/BENEFICIO USD\$ (1X10 ³)
5X5X7	630	136	47	6589
6X6X7	424	92	31	6021
7X7X7	331	72	25	6840
8X8X7	250	54	18	6128

Tabla Anexo 2. Resultados finales relación CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta), DG1.

Nota: En color verde se resalta la malla óptima para el dominio geológico 1 (DG1), malla de 7x7x7m, CBNT= USD 6840 (1X10³)

RESULT OF CLASIFICACION MALLA 5X5X7 DG2				
Ton Blocks	471.24	No Blocks		
Category	CCV	Min	Max	Average
Measured	<0.1125	765	1393	1358
Indicated	0.1125-0.225	1127	1976	1344
Inferred	>0.225			
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1892	3369	2702

RESULT OF CLASIFICACION MALLA 5X5X7 DG2					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 11808			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	471.24	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.1125	765	1393	1358	360	656	640	0.934	1.127	1.096	337	740	701	253	555	526	3172	6971	6608
Indicated	0.1125-0.225	1127	1976	1344	531	931	633	0.825	0.988	0.839	438	920	531	329	690	399	4128	8668	5007
Inferred	>0.225										0	0	0	0	0	0	0	0	0
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1892	3369	2702	892	1588	1273	0.880	1.058	0.968	775	1660	1233	581	1245	925	7301	15639	11615
RESULT OF CLASIFICACION MALLA 6X6X7 DG2					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 7956			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	471.24	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.1125	543	1005	985	256	474	464	0.937	1.191	1.145	240	564	531	180	423	399	2259	5315	5008
Indicated	0.1125-0.225	1576	2218	1709	743	1045	805	0.853	0.980	0.871	634	1024	701	475	768	526	5969	9651	6609
Inferred	>0.225		10	1		5	1		1.087	0.466	0	5	0	0	4	0	0	48	3
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		2119	3233	2695.4	999	1524	1270	0.895	1.086	0.827	873	1593	1233	655	1195	925	8228	15014	11617
RESULT OF CLASIFICACION MALLA 7X7X7 DG2					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 6210			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	471.24	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.1125	504	801	789	238	377	372	0.936	1.246	1.207	222	470	449	167	353	337	2095	4431	4228
Indicated	0.1125-0.225	1693	2162	1840	798	1019	867	0.844	0.986	0.870	673	1005	754	505	753	566	6344	9465	7108
Inferred	>0.225				0	0	0				0	0	0	0	0	0	0	0	0
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		2197	2963	2629	1035	1396	1239	0.890	1.116	1.039	896	1475	1203	672	1106	902	8439	13896	11336

Tabla Anexo 3. DG2 categorización recurso geológico, umbrales definidos (tabla superior) y resultados basados en las gráficas tonelaje sobre una ley de corte vs CCV

MALLA DG2	USD\$ MUESTRAS (1X10 ³)	TIEMPO MUESTRA MINA (MES)	ANALIZAR MUESTRA LABORATORIO (DÍA)	COSTO/BENEFICIO USD\$ (1X10 ³)
5X5X7	708	153	52	10907
6X6X7	477	103	35	11139
7X7X7	373	81	28	10963

Tabla Anexo 4. Resultados finales relación CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta), DG2

Nota: En color verde se resalta la malla óptima para el dominio geológico 2 (DG2), malla de 6x6x7m, CBNT= USD 11139 (1X10³)

RESULT OF CLASIFICACION MALLA 5X5X7 DG3				
Ton Blocks	327.6	No Blocks		
Category	CCV	Min	Max	Average
Measured	<0.064	113	126	119
Indicated	0.064-0.106	1203	1357	1266
Inferred	>0.106		1	0
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1316	1484	1385.01

RESULT OF CLASIFICACION MALLA 5X5X7 DG3					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 7872			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	327.6	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.064	113	126	119	37	41	39	0.891	0.940	0.912	33	39	36	25	29	27	311	366	335
Indicated	0.064-0.106	1203	1357	1266	394	445	415	0.81	0.823	0.815	319	366	338	239	274	254	3008	3447	3185
Inferred	>0.106		1	0	0	0	0		0.710	0.007	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1316	1484	1385.01	431	486	454	0.851	0.824	0.578	352	405	374	264	304	280	3319	3815	3520
RESULT OF CLASIFICACION MALLA 6X6X7 DG3					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 5304			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	327.6	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.064	34	38	37	11	12	12	0.934	1.015	0.969	10	13	12	8	9	9	98	119	111
Indicated	0.064-0.106	1285	1438	1366	421	471	448	0.809	0.826	0.817	341	389	366	255	292	274	3209	3666	3445
Inferred	>0.106	10	27	16	3	9	5	0.727	0.855	0.780	2	8	4	2	6	3	22	71	39
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1329	1503	1419	435	492	465	0.823	0.899	0.855	353	409	381	265	307	286	3329	3857	3555
RESULT OF CLASIFICACION MALLA 7X7X7 DG3					Ley de Corte >=0.70%			Muestras: 4140			Tonnage Ni (1x10 ³ Ton)			Rec Metalúrgica (1x10 ³ Ton)			USD\$ (1X10 ³)		
Ton Blocks	327.6	No Blocks			Tonnage (1x10 ³ Ton)			Grade			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Category	CCV	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
Measured	<0.064	2	3	2.00	1	1	1	0.856	1.102	0.966	1	1	1	0	1	0	5	10	6
Indicated	0.064-0.106	1350	1530	1453.00	442	501	476	0.816	0.835	0.824	361	419	392	271	314	294	3400	3943	3696
Inferred	>0.106	3	13	8	1	4	3	0.748	0.892	0.797	1	4	2	1	3	2	7	36	20
Blocks/Ton (1x10 ³ t)/Grade(%)		1355	1546	1463	444	506	479	0.807	0.943	0.862	362	423	395	272	318	296	3412	3989	3702

Tabla Anexo 5. DG3 categorización recurso geológico, umbrales definidos (tabla superior) y resultados basados en las gráficas tonelaje sobre una ley de corte vs CCV

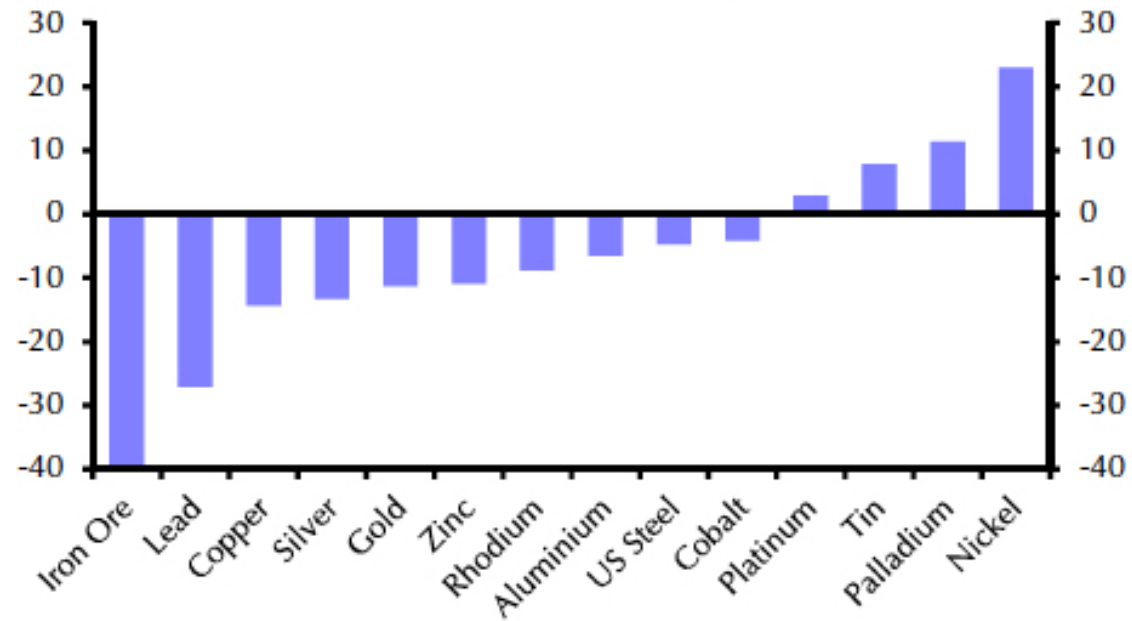
MALLA DG3	USD\$ MUESTRAS (1X10^3)	TIEMPO MUESTRA MINA (DÍA)	ANALIZAR MUESTRA LABORATORIO (DÍA)	COSTO/BENEFICIO USD\$ (1X10^3)
5X5X7	472	102	35	3047
6X6X7	318	69	24	3237
7X7X7	248	54	18	3453

Tabla Anexo 6. Resultados finales relación CBNT (relación costo/beneficio/número-tiempo de muestras preparadas-analizadas en el laboratorio/tiempo en perforar cada dominio con su respectiva malla propuesta), DG3

Nota: En color verde se resalta la malla óptima para el dominio geológico 3 (DG3), malla de 7x7x7m, CBNT= USD 3453 (1X10^3)

Precios del níquel y otros metales finales 2017

**EXPECTED PERFORMANCE BASED ON OUR END-2017
FORECASTS FOR PRICES (%)**



Sources – Bloomberg, Thomson Reuters, CE

Figura Anexo 1. Expectativas de precios de metales a finales de 2017, donde el níquel con mejor pronóstico. Fuente: Bloomberg, Thomson Reuters