

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL YACIMIENTO AURIFERO IDENTIFICADO COMO BLOQUE A01 PERTENECIENTE A LA FORMACION EL CALLAO, UBICADO EN EL CALLAO, ESTADO BOLIVAR, POR MEDIO DEL MÉTODO GEOESTADÍSTICO : KRIGING ORDINARIO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Willdave Brandt
Para optar al título
de Ingeniero de Minas

Caracas, Junio de 2018

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL YACIMIENTO AURIFERO IDENTIFICADO COMO BLOQUE A01 PERTENECIENTE A LA FORMACION EL CALLAO, UBICADO EN EL CALLAO, ESTADO BOLIVAR, POR MEDIO DEL MÉTODO GEOESTADÍSTICO : KRIGING ORDINARIO.

Tutor Académico: Prof. Omar Márquez Muñoz

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Willdave Brandt
Para optar al título
de Ingeniero de Minas

Caracas, Junio de 2018

CARTA DE APROBACIÓN

Caracas, junio 2018

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Willdave Marvin Brandt Fajardo titulado:

**“EVALUACIÓN DEL YACIMIENTO AURIFERO IDENTIFICADO COMO BLOQUE A01
PERTENECIENTE A LA FORMACION EL CALLAO, UBICADO EN EL CALLAO, ESTADO
BOLIVAR, POR MEDIO DEL MÉTODO GEOESTADÍSTICO : KRIGING ORDINARIO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Luis Araya
Jurado

Prof. Raiza Sueiro
Jurado

Prof. Omar Anibal Márquez
Tutor Académico

DEDICATORIA

Dedicado a William Brandt y Belkis Fajardo mis padres

A mi tía Ana Soler y German Fajardo mis segundos padres

Y a la memoria de Gustavo Sánchez y Daniel Linares...

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar gracias a mis padres por haberme otorgado la vida y ser mis guías y mentores durante ella, a mi tía Ana por ser una persona que siempre me guía y madre en los momentos de desespero, los amo con todo mi ser.

A mi mejor amiga Mariana Sánchez, por creer en mí cuando pensé en abandonar, ser mi editora estrella y estar presente conmigo sin importar todo un mar que nos separa.

A mis amigos los Vengadores (John, Jorge, Daniel, Kleibert, Amilcar y el troll), amigos invaluable que me dio esta hermosa casa de estudio.

A mi Team, AW, también por su respaldo, Gab, Oriente, Lince, Vader, Diabliyo, Brimer, hermanos de armas y de mil y un batallas!

A Ana Frías por ser esa hermana que siempre quise tener.

A José Gregorio Hernandez por ser mi hermano menor en toda la carrera y compañero de estudio y durante el gran reto que fueron nuestros trabajos de grado.

A José Statzewitch, el ruso, mi compañero de pasantías y más que colega, un indiscutible amigo y aliado en la fuerza.

Al profesor Luis Araya por ser mi mentor y maestro en un esta hermosa área como es la geoestadística

A la Profesora Aurora Piña por no dudar de mis capacidades, al Dpto de Minas y a la Universidad Central de Venezuela por concederme el honor de ser un hijo más que nace bajo sus nubes.

A todos GRACIAS

EVALUACIÓN DEL YACIMIENTO AURIFERO IDENTIFICADO COMO BLOQUE A01 PERTENECIENTE A LA FORMACION EL CALLAO, UBICADA EN EL CALLAO, ESTADO BOLIVAR, POR MEDIO DEL MÉTODO GEOESTADÍSTICO : KRIGING ORDINARIO.

Tutor académico: Profesor Omar Márquez Muñoz.

Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de geología, Minas y Geofísica.

Palabras clave: Geoestadística, Evaluación de Yacimientos, Kriging, Estimación, Oro, Cuantificación de Recursos.

Resumen. El siguiente trabajo radica en la implementación de las herramientas geoestadísticas para la estimación de recursos minerales, específicamente el uso del Kriging Ordinario como método de estimación. El objetivo principal persigue la evaluación correspondiente a los recursos presentes a un yacimiento aurífero ubicado en la Formación El Callao, denominado Bloque A01, comprendido en su totalidad por 190 sondeos, los cuales definen 9 cuerpos mineralizados en la mencionada zona. A partir de los sondeos y las direcciones de mineralización se define un modelo de bloques con sub-bloques de dimensiones de 10m x 5m x 10m con características litológicas inherentes a cada uno de ellos. Se realizó el estudio estadístico descriptivo, permitiendo establecer los valores umbrales para facilitar el estudio variográfico de los tenores presentes en cada cuerpo mineralizado. Obteniendo como resultado una totalidad de 426,74 Oz de oro, siendo categorizados como recursos indicados 295,44 Oz de ellas y como recursos inferidos 131,3 Oz.

INDICE GENERAL

INTRODUCCION	18
CAPÍTULO I	19
1.1 Planteamiento del problema	20
1.2 Objetivos de la investigación	21
1.2.1 Objetivo General.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 Justificación.....	21
CAPÍTULO II.....	23
2.1 Antecedentes de la investigación	24
2.2 Bases Teóricas.....	27
2.2.1 Geología Regional	27
2.2.1.1 Provincia de Imataca.....	28
2.2.1.2 Provincia de Cuchivero – Amazonas	28
2.2.1.3 Provincia de Roraima.....	29
2.2.1.4 Provincia de Carichapo-Pastora.....	29
2.2.1.5 Grupo Carichapo.....	30
2.2.1.6 El Supergrupo Pastora.....	33
2.2.1.7 Formación Florinda.....	33
2.2.1.8 Formación Cicapra.....	33
2.2.1.9 Formación El Callao	34
2.2.1.10 Formación Yuruarí.....	34
2.2.2 Geología Local	35
2.2.2.1 Distrito aurífero de El Callao.....	35

2.2.3 Relieve y Fisiografía.....	36
2.2.3.1 Clima.....	37
2.3.4 Morfología de los cuerpos minerales.....	37
2.3 Bases CONCEPTUALES	39
2.3.1 Clasificación de reservas	39
2.3.1.1 Clasificación De Recursos y Reservas Mineras Según el Código de Australasia para informar sobre recursos minerales y reservas (Código JORC).....	39
2.3.1.1.1 Recursos Minerales	40
Recurso Mineral Inferido	40
Recurso Mineral Indicado	40
Recurso Mineral Medido.....	41
2.3.1.1.2 Reserva Minera	41
2.3.1.1.3 Reserva Minera Probable	41
2.3.1.1.4 Reserva Minera Probada	42
2.3.1.2 Clasificaciones Marco de las Naciones Unidas para la Energía Fósil y los Recursos y Reservas Minerales 2009 (CMNU-2009).	42
2.3.2 Categorización de Recursos.....	44
2.3.2.1 Criterios Tradicionales o Clásicos	44
2.3.2.1.1 Continuidad geológica.....	44
2.3.2.1.2 Densidad de la red de exploración (grado de estudio)	45
2.3.2.1.3 Interpolación contra extrapolación.....	46
2.3.2.1.4 Consideraciones tecnológicas	46
2.3.2 Concepto de geoestadística.....	46
2.3.3 Orígenes de la geoestadística.....	47
2.3.4 Variables regionalizadas.....	47

2.3.5 Variograma	48
2.3.6 Propiedades del variograma.....	49
2.3.6.1 Comportamiento a distancias grandes	49
2.3.6.1.1 Rango.	49
2.3.6.2 Comportamiento a cortas distancias	50
2.3.6.2.1 Comportamiento Cuadrático o Parabólico	51
2.3.6.2.2 Comportamiento lineal	52
2.3.6.2.3 Discontinuidad en el origen. Efecto pepita o nugget effect	53
2.3.7 Detección de anisotropías	53
2.3.8 Combinación lineal de variogramas	54
2.3.9 Modelos de variograma	55
2.3.9.1 Efecto pepita puro o nugget effect	55
2.3.9.2 Modelo Esférico.....	56
2.3.9.3 Modelo exponencial.....	57
2.3.9.4 Modelo gaussiano	59
2.3.9.5 Modelo potencia.....	60
2.3.9.6 Modelo Cúbico.....	61
2.3.9.7 Modelo Seno Cardinal	62
2.3.10 El variograma experimental.....	63
2.3.11 Cálculo del variograma experimental.....	64
2.3.11.1 Ajuste de un modelo de variograma	65
2.3.12 Clases de distancia.....	66
2.3.13 Clases de dirección	68
2.3.14 Desventaja del variograma	71
2.3.14.1 Sensibilidad a valores extremos.....	71

2.3.14.2 Estadística de dos puntos	73
2.3.15 Kriging.....	74
2.3.15.1 Clasificación de los diferentes tipos de Kriging	74
2.3.16 Kriging Ordinario	75
2.3.17 Criterios Geoestadísticos de Categorización	77
2.3.17.1 Varianza Kriging.....	77
2.3.17.2 Método del Error Porcentual de la Estimación de la Media	80
2.3.18 Software.....	81
2.3.18.1 Software Libre	81
2.3.18.2 Software Propietario	82
2.3.18.3 Software Minero	82
2.3.19 Herramientas informáticas utilizadas para el procesamiento de datos	83
2.3.19.1 Hojas de cálculo.....	83
2.3.19.2 Geostatistical Software Library (GSLIB)	83
2.3.19.2.1 Funciones principales de GSLIB.....	84
2.3.19.3 Software minero RECMIN	84
2.3.19.3.1 Ventajas y Desventajas.....	85
2.3.19.4 Software SGeMS	86
2.3.19.4.1 Ventajas y Desventajas.....	86
CAPÍTULO III.....	87
3.1 Tipo de investigación	88
3.2 Diseño de la investigación.....	88
3.3 Población y Muestra.....	88
3.4 Técnicas y métodos de recolección de datos.....	89
3.5 Análisis de los datos e interpretación.....	89

3.6 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	91
3.6.1 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	91
3.6.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	93
CAPÍTULO IV.....	99
4.1 Caracterización geologica	100
4.1.1 Generalidades de la campaña de sondeos del Bloque A01	100
4.1.2 Definición de los cuerpos minerales presentes.....	101
4.1.3 Modelamiento de bloques correspondientes a los cuerpos mineralizados	103
4.2 estadística descriptiva.....	104
4.2.1 Histogramas y curvas de probabilidad acumulada	104
4.2.1.1 Importación de datos a SGeMS	105
4.2.1.2 Histogramas para datos de cada cuerpo mineral.....	105
4.2.1.3 Valores umbrales para cada cuerpo mineral	109
4.2.2 Tablas de estadística descriptiva por cada cuerpo mineralizado	114
4.3 estudio variográfico.....	115
4.3.1 Mapas de variogramas	115
4.3.1.1 Tablas por cuerpo mineralizado de las direcciones de mayor continuidad espacial.....	116
4.3.2 Variogramas Experimentales.....	116
4.3.2.1 Tablas por cuerpo mineralizado de propiedades de variogramas	117
4.4 estimación mediante kriging ordinario.....	118
4.5 categorización y cuantificación de recursos	118
4.5.1 Categorización de bloques generados por el kriging.....	118
4.5.2 Reportes.....	120

CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	130

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Provincias geológicas de Guayana (Departamento de Geología CVG Minerven) ..27	27
Figura 2. Relación genera entre recursos y reservas minerales. Fuente Código JORC.....39	39
Figura 3. Categorías y ejemplos de clases de la CMNU.....43	43
Figura 4. Forma de un variograma típico. (Rojas, 2015).....49	49
Figura 5. Comportamiento parabólico a distancias cortas (Rojas, 2015)51	51
Figura 6. Comportamiento lineal a distancias cortas con diversas pendientes (Rojas, 2015) 52	52
Figura 7. Variograma con una discontinuidad nugget effect igual a 3. (Rojas, 2015)53	53
Figura 8. Comportamiento anisotrópico de la variable bajo estudio. (Rojas, 2015)54	54
Figura 9. Variograma con pendiente mayor a distancias cercanas al origen. (Rojas, 2015) ...55	55
Figura 10. Variograma efecto pepita o nugget effect (Rojas, 2015)56	56
Figura 11. Modelo de variograma esférico (Rojas, 2015)57	57
Figura 12. Modelo de variograma exponencial (Rojas, 2015).....58	58
Figura 13. Modelo de variograma gaussiano (Rojas, 2015)59	59
Figura 14. Modelos de variograma potencia para distintas potencias. (Rojas, 2015)60	60
Figura 15. Modelo de variograma cúbico (Rojas, 2015)61	61
Figura 16. Modelo de variograma seno cardinal (Rojas, 2015).....62	62
Figura 17. Ejemplo de un variograma experimental (Rojas, 2015).....64	64
Figura 18. ajuste de variograma modelo exponencial al experimental de la figura 17. (Rojas, 2015).....66	66
Figura 19. Ejemplo del cálculo del variograma experimental utilizando clases de distancias (Rojas, 2015).....67	67
Figura 20. Forma en que se define la clase de la dirección . (Rojas, 2015).....69	69
Figura 21. Clase de la dirección y el truncamiento considerado para detección anisotrópica. (Rojas, 2015).....70	70

Figura 22. Clases de distancia y dirección para el cálculo del variograma experimental. (Rojas, 2015).....	71
Figura 23. Valores de la figura 18, donde se cambiaron los valores indicados. (Rojas, 2015)	72
Figura 24. Variograma experimental para los datos de la figura 22. (Rojas, 2015)	73
Figura 25. Variogram cloud de los valores de la figura 24 (Rojas, 2015).....	73
Figura 26. Categorización de reservas según los autores: Diehl & David y Según Wellmer...	78
Figura 27. Histograma de las varianzas kriging (V_k) segmentado en 3 poblaciones: 1) 0-0.0075 –Recursos medidos 2) 0.0075-0.0135 –Recursos indicados 3) > 0.0135 –Recursos inferidos (Annels, 1991)	79
Figura 28. Esquema de las etapas de la investigación y herramientas informáticas utilizadas	91
Figura 29. Archivos para la carga de sondeos	91
Figura 30. Formato de entrada de datos para Sgems y Gslib.....	93
Figura 31. Vista en el visor 3D de SGeMS de los puntos correspondientes a las vetas.	94
Figura 32. Consola de símbolo de sistemas a punto de ejecutar el programa “varmap.exe” ...	95
Figura 33. Archivo de parámetros para “varmap.exe”	95
Figura 34. Creación de los variogramas experimentales por medio de SGeMS.	97
Figura 35. Mapa vista de planta de los sondeos pertenecientes al Bloque A01 generado a través de Datamine.....	100
Figura 36. Vista en 3D de los sondeos pertenecientes al Bloque A01 generado a través de RecMin.....	101
Figura 37. Archivos de entrada de sondeos para RecMin	101
Figura 38. Vista lateral de los sondeos pertenecientes al Bloque A01, categorizados según su litología	102
Figura 39. Superficies cerradas para cada grupo litológico presente en el Bloque A01	103
Figura 40. Modelo de bloques correspondiente a los cuerpos mineralizados.....	103

Figura 41. Modelo geológico de bloques correspondiente a los cuerpos mineralizados.....	104
Figura 42. Vista de perfil de la intersección del cuerpo mineralizado V4 con sondeos.....	105
Figura 43. Datos de entrada del cuerpo mineral para SGeMS.....	105
Figura 44. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V1.....	106
Figura 45. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V2.....	106
Figura 46. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V3.....	106
Figura 47. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V4.....	107
Figura 48. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V5.....	107
Figura 49. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V6.....	107
Figura 50. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V7.....	108
Figura 51. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V8.....	108
Figura 52. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V9.....	108
Figura 53. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V1.....	110
Figura 54. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V2.....	110

Figura 55. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V3.....	111
Figura 56. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V4.....	111
Figura 57. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V5.....	112
Figura 58. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V6.....	112
Figura 59. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V7.....	112
Figura 60. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V8.....	113
Figura 61. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V9.....	113
Figura 62. Mapa de variogramas para el cuerpo mineral V2 en dirección XY	115
Figura 63. Mapa de variogramas para el cuerpo mineral V2 en dirección XZ.....	115
Figura 64. Ajuste del modelo de variogramas para el cuerpo mineral V4 en SGeMS.....	117
Figura 65. Categorización de bloques por medio del método de la varianza del kriging.	
119Brandt/Trabajo especial de grado/TEG willdave brandt A IMPRIMIR.doc -	
_Toc518861920	
Figura 66. Concentración aurífera del Bloque A01 delimitando sub-bloques con ley de corte	120

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características litológicas de la provincia de Pastora	30
Tabla 2. Estratigrafía del distrito El Callao	32
Tabla 3. Ejemplo de clasificación en función de la densidad de la red de exploración.....	45
Tabla 4. Clasificación de reservas a partir de la utilización del error Kriging de la media.	80
Tabla 5. Valores umbrales de tenor establecidos para los cuerpos mineralizados en el Bloque A01	109
Tabla 6. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V1, V2 y V3.	114
Tabla 7. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V4, V5 y V6.	114
Tabla 8. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V7, V8 y V9.	114
Tabla 9. Direcciones Preferenciales por cuerpo mineralizado.....	116
Tabla 10. Propiedades de ajuste de los variogramas experimentales a modelo exponencial.	117

INTRODUCCION

La planificación minera a lo largo del proceso del minado permite identificar las limitantes y logísticas generadas por diferentes variables durante la vida del proyecto minero, es por ello que es indispensable generar una planificación eficiente que pueda prever y anticiparse antes las situaciones futuras, de ello dependerá la rentabilidad de muchos procesos futuros así como la vitalidad de la mina.

La caracterización previa es de vital importancia ante el diseño y el cómo abordar el yacimiento de manera eficaz, además de establecer las zonas con mayor enriquecimiento mineral y tener un mejor control en las operaciones de producción y extracción de mineral.

La presente investigación tiene como finalidad realizar una evaluación de yacimientos por medio de Kriging ordinario, en base a las características de variabilidad espacial de la distribución del tenor aurífero de los cuerpos mineralizados presentes en un bloque correspondiente a un yacimiento ubicado en la Formación El Callao en el estado Bolívar, tomando en cuenta todas las etapas correspondientes a un análisis geoestadístico, para ello esta investigación se contempla en cuatro capítulos, el primero basado en plantear la problemática, justificación de la investigación y definir el objetivo principal y específico de la misma. En segundo lugar, el capítulo II está estructurado bajo el desarrollo de los antecedentes de la investigación y los basamentos teóricos necesarios para realizar la misma, posteriormente en tercer lugar, el capítulo III en el cual se muestra la metodología a implementar, población, muestra, técnicas de recolección de datos y medios por los cuales se realizarán los análisis pertinentes a los mismos, y por último un cuarto capítulo presentando los resultados pertinentes a esta investigación, la caracterización geológica de cada cuerpo mineralizado, la definición de la morfología del yacimiento en cuestión, el estudio descriptivo y variográfico de las muestras, la categorización de los recursos estimados y los reportes especificando los recursos parciales por cada cuerpo mineralizado, los recursos parciales por cada categoría, y por finalmente los recursos totales categorizados expresados en onzas.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La estimación de recursos y reservas es una operación de alta responsabilidad que determina en gran medida el valor económico-estratégico de un yacimiento mineral. Este cálculo puede ser realizado por métodos clásicos o modernos: En los primeros se utilizan fundamentalmente valores medios o medias ponderadas para la estimación de bloques definidos a conveniencia, por lo que su uso ha estado relacionado con problemas de precisión. Aunque los métodos clásicos son aconsejables para cuantificaciones de reservas a nivel global, no son adecuados para la caracterización de yacimientos minerales con morfologías complejas.

Los métodos empleados para la estimación y caracterización de los recursos minerales en yacimiento auríferos en Venezuela, ubicados en la Formación El Callao, estado Bolívar, no permiten describir detalladamente los parámetros geológicos debido a que no tienen en cuenta las características de variabilidad y correlación espacial, no es tratada adecuadamente la alta variabilidad espacial presente en estos yacimientos y no utilizan procedimientos modernos para la integración de información que incorporen fuentes con distinto grado de conocimiento, por lo que no se adaptan a las complejidades de la gran extensión mineralizada. Por consiguiente la caracterización de recursos minerales resulta inexacta y poco detallada, lo cual repercute desfavorablemente en la explotación racional y una planificación óptima para el minado, fundamentalmente en modelos irregulares como son los depósitos de oro. Para ello surge como alternativa la implementación de métodos geoestadísticos, donde predominan técnicas de variabilidad y correlación espacial en base a los datos originales, realizando un estudio en base a etapas básicas para determinar el comportamiento del tenor aurífero considerando la influencia de la distancia y la variancia para realizar un modelo que se ajuste al comportamiento espacial de los cuerpos

mineralizados en el yacimiento, permitiendo además de ellos clasificar en cuanto a las características de variabilidad implícitas surgidas por la estimación y una cuantificación acertada para los sub-bloques definidos en cada uno de los cuerpos minerales identificados.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el yacimiento aurífero identificado como el Bloque A01 perteneciente a la Formación El Callao, ubicado en El Callao, estado Bolívar, por medio del método geoestadístico: Kriging Ordinario.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Examinar por métodos analíticos de tipo exploratorios, histogramas, curvas de probabilidad acumulada y características descriptivas los sondeos ejecutados en el bloque A01.
2. Determinar la dirección de mayor continuidad espacial y variabilidad para los tenores auríferos delimitado por el bloque A01.
3. Generar el Kriging para el bloque A01 en base a la estructura espacial provista por los modelos de variogramas ajustados a los variogramas experimentales.
4. Proponer el modelo geológico del yacimiento basados en los sondeos exploratorios.
5. Categorizar y cuantificar los recursos de oro del mencionado bloque.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La evolución científico-técnica en la geología y minería, que ha abarcado durante décadas a todo el mundo, se manifiesta en un incremento brusco del ritmo de extracción, utilización

de los recursos naturales y selectividad en los métodos de minado, los yacimientos pertenecientes a la Formación El Callao en Venezuela no escapa de ello, debido a la necesidad de incrementar la producción minera, atado al área de desarrollo estratégico Arco Minero del Orinoco, sustentado en el impulso económico actual. Adicional a esto se ha evolucionado en el cómo caracterizar yacimientos minerales a nivel mundial, por este motivo la planificación y operación en este tipo de yacimientos en Venezuela debe apuntar a ser lo más óptimo posible, y para ello se debe definir de forma local las características más a detalle del cuerpo mineralizado. Los métodos clásicos han dominado la manera de evaluar las reservas en yacimientos mineros al cuantificar en escala global, con la desventaja de dejar grandes puntos ciegos e incertidumbre a escalas en las cuales estos métodos pierden precisión; la Geoestadística aparece para suplir estas necesidades y surge para realizar estimaciones mediante ajustes estadístico-matemáticos sobre el comportamiento espacial del yacimiento a nivel geoquímico, como es el caso específico de esta investigación, y caracterización de la variabilidad. Este trabajo de investigación persigue la implementación de estos métodos para realizar estimaciones basados en modelos lo más preciso posibles para cada cuerpo mineral, en el caso específico del yacimiento aurífero perteneciente a la Formación El Callao, Estado Bolívar, lo cual apunta hacia un beneficio en la nación, además evidencia un aporte de cara a la nueva visión del Estado con respecto a la actividad minera, tomando en cuenta los métodos utilizados anteriormente, es notoria la necesidad de implementar nuevos métodos, con medidas más rigurosas que permitan una evaluación más a detalle en vista de las características de este tipo morfológico de yacimientos auríferos, considerando el conocimiento estratégico basado en la importancia de dicho mineral para la nación. La implementación de estos métodos busca un impacto beneficioso mediante el criterio ambiental al poseer una información más a detalle, instando a operaciones de minado óptimas consiguiendo una inevitable reducción a la afectación ambiental.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

- CARLOS E. ROJAS. (2015). “Modelado geoestadístico para las unidades productoras 5PS20 y 4PS30 de crudo extrapesado del área reservada del distrito Cabrutica, campo Zuata principal, de la faja petrolífera del Orinoco. Trabajo especial de postgrado para optar al título de Especialista en Gerencia Integrada de Yacimientos de Hidrocarburos”. Universidad Central de Venezuela. Caracterizar y correlacionar 49 pozos con topes estratigráficos para obtener una simulación de las facies y obtener propiedades petrofísicas.
- SEBASTIÁN PIZARRO. (2011). “Modelamiento geoestadístico de leyes de cobre total y soluble”. Tesis para optar al grado de magister en minería. Universidad de Chile. Generar simulaciones Geoestadísticas de CuT y CuS que reproduzcan la distribución conjunta de ambas variables.
- CHICA OLMO (1987). “Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales”. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. En el texto se reúnen las principales conclusiones metodológicas de índole tanto teórica como práctica, alcanzadas a través de los diferentes estudios y proyectos realizados en el dominio minero.
- JUAN CARLOS SANDOVAL (2014). “Geología y Geoestadística para la evaluación mineral del proyecto magistral”. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. Los variogramas calculados en todas las direcciones nos indican una dirección preferencial de mineralización para la ley de Cu ángulo horizontal de 80 grados y un ángulo vertical de 65 grados, en esta dirección se observa una estructura bien definida ajustada a un

modelo exponencial, con la más baja variabilidad que todas las demás direcciones analizadas.

- SANDRA PAOLA ZARZA (2006). “Modelado geoestadístico de litofacies y clases petrofísicas en yacimientos carbonatados fracturados del sureste de México”. Tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería. Universidad Autónoma de México. Los modelos obtenidos de la simulación estocástica no son únicos ni definitivos, sino que, son una herramienta más en la caracterización de los yacimientos conjuntamente con las demás disciplinas y especialidades.
- YONNY RUIZ (S.F.) “Aplicación de software libre para la estimación de recursos y para la evaluación técnica económica de las reservas minerales”. Tesis para obtener el título de ingeniero de minas. Universidad Nacional de Piura. Perú. Se estudia la factibilidad del software libre para la estimación de recursos y para la evaluación técnica económica de las reservas minerales.
- STATZEWITCH JOSÉ (2017) “Propuesta de planificación a largo plazo para la mina El Choco 10, en el Bloque Guasipati-El Callao municipio El Callao estado Bolívar periodo 2017-2021”. Tesis para optar al título de ingeniero de minas. Universidad Central de Venezuela. Generar una propuesta a largo plazo para la mina Choco 10 Bloque Guasipati-El Callao, para el periodo 2017-2021.
- ARAYA LUIS (2009) “MODELAMIENTO QUÍMICO UTILIZANDO EL MÉTODO KRIGING DEL YACIMIENTO FERRÍFERO “C2NE” DEL CERRO BOLÍVAR, MUNICIPIO RAÚL LEONI, ESTADO BOLÍVAR” Trabajo presentado como requisito parcial para ascender a la categoría de Profesor Agregado. Modelar

geoquímicamente el yacimiento ferrífero “C2NE” el Cerro Bolívar, Municipio Raúl Leoni, Estado Bolívar.

2.2 BASES TEORICAS

2.2.1 Geología Regional

El escudo de Guayana se encuentra al sur del río Orinoco y ocupa aproximadamente 50% de la superficie de Venezuela con rocas antiguas (granulitas y charnockitas del complejo de Imataca) y tan jóvenes como las kimberlitas y eclogitas de Guaniamo, que se registran en buena parte de la evolución geotectónica similar a la de otros escudos precámbricos en el mundo.

El escudo de Guayana se divide en cuatro provincias geológicas, Imataca, Carichapo-Pastora, Cuchivero y Roraima (Figura 1), estas forman parte del Cratón Amazónico el cual se extiende por las Guayanas, Colombia, el Norte de Brasil y Bolivia.

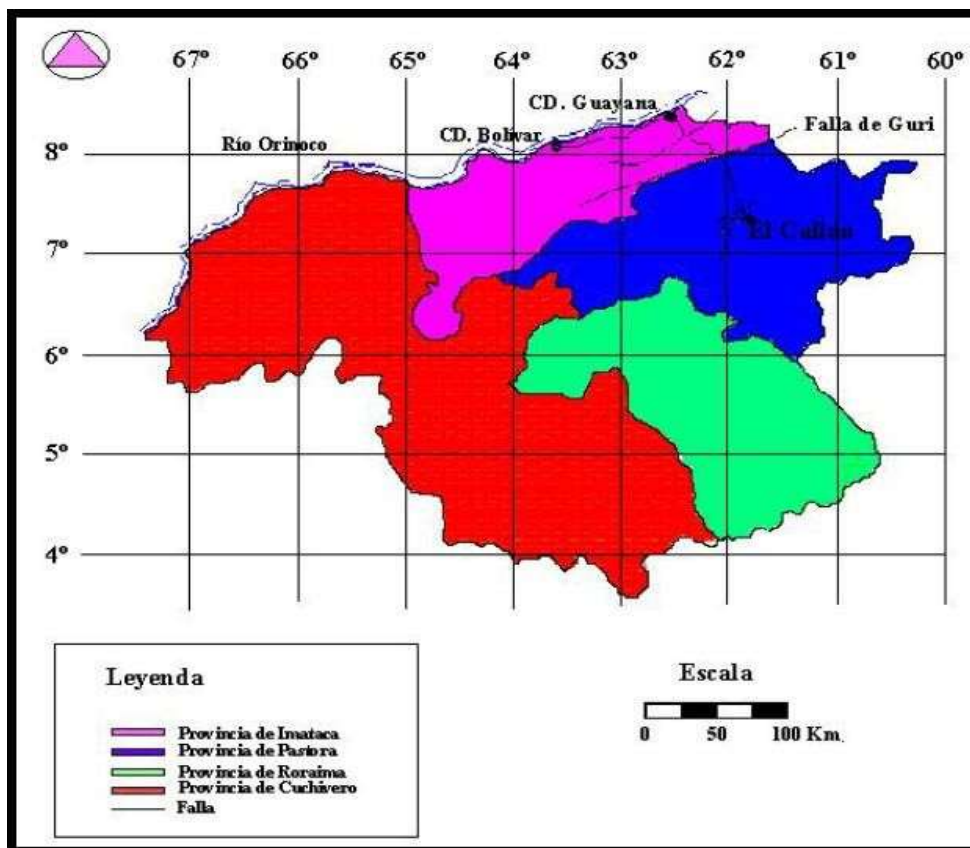


Figura 1. Provincias geológicas de Guayana (Departamento de Geología CVG Minerven)

2.2.1.1 Provincia de Imataca

Se extiende desde las proximidades del río Caura hasta el Delta del Orinoco y en dirección NW-SE desde el curso del Río Orinoco hasta la falla del Gurí por unos 80 km. Posee una litología profundamente metamorforizada, y pertenece en general a las subfacies de granulita hornablendica de las facies granulíticas (Chase 1965). Formada, por gneises graníticos y granulitas félsicas, anfibolitas, granulitas máficas y ultramáficas con presencias menores de formaciones bandeadas de hierro (BIF), con litologías secundarias de cuarcita, caliza, dolomita, charnockitas, granitos intrusivos y remanentes del metamorfismo (Sidder et al,1991).

2.2.1.2 Provincia de Cuchivero – Amazonas

Denomina a un grupo de rocas intrusivas a volcánicas calcoalcalinas félsicas y rocas sedimentarias que intrusionaron y se depositaron sobre el basamento de CRV y granitos sódicos asociados. Esta provincia del Paleoproterozoico tardío a Mesoproterozoico incluye rocas volcánicas riolíticas y asociadas, comagmáticas con granitos calcoalcalinos del grupo Cuchivero; areniscas conglomerados, limolitas , tobas y lutitas del grupo Roraima; Stocks de rocas diabasicas-granodioriticas cuarcíferas de la asociación Avanadero y el grupo Rapakivi de El Parguaza y rocas de complejos alcalinos como el de la Churuata, así como intrusiones de carbonatitas de Cerro Impacto, lamprófiro y kimberlitas eclogitas de Guaniamo. La provincia se extiende desde la parte más occidental del estado Bolívar hasta la el sur-suroeste del estado Amazonas (Mendoza 1974).

2.2.1.3 Provincia de Roraima

Se extiende desde los límites del parque nacional Canaima en el km 95, cerca de la piedra de la Virgen, hasta Santa Elena de Uairén en dirección NS y desde el Río Venamo hasta las proximidades del Río Paraguana. Está compuesta por rocas de del grupo Roraima con diabasas y rocas gabronoríticas cuarcíferas a dioríticas cuarcíferas de la asociación Avanadero. Las rocas de esta provincia no presentan un marcado tectonismo (sinclinales suaves muy abiertos y de muy bajo buzamiento) con algún fallamiento, incluso fallas de arrastre como en el Tepuy de Parú, frente a Kakuri, alto Ventauri en el Estado Amazonas, relacionados con la orogenia Nickeriana y a levantamientos epirogénicos.

2.2.1.4 Provincia de Carichapo-Pastora

Se extiende desde la falla del Guri al Norte hasta las proximidades del parque nacional Canaima al sur (km 95), por el Este hasta los límites con la zona en reclamación del Territorio Esequibo y al Oeste con el Río Caura.

La Pastora también llamada como la provincia del oro, está formada por Cinturones de Rocas Verdes (CRV) delgados, antiguos y tectonizados, tipo, Carichapo y CRV más anchos, jóvenes y menos tectonizados tipo Botanamo, y por complejos graníticos sódico como el Complejo de Supamo, siendo toda la secuencia intrucionada por granitos potásicos dioritas y rocas gabroides con escasos y no bien definidos complejos máficos, ultra máficos, ofiolíticos o no, intrusiones y sills de diabasas y rocas asociadas norítico-gabroides (Salazar y otros, 1989). La zona ubicada en el sector Guasipatí–El Callao, donde aflora una buena sección del Supergrupo Pastora, antiguo CRV, compuesto por el grupo Carichapo y la formación Yuruarí.

2.2.1.5 Grupo Carichapo

El Grupo Carichapo está formado por las formaciones Cicapra predominantemente komatítica, la formación Florinda, Basáltico tholeítica a komatítica y la formación El Callao, generalmente basáltico-andesítica (basandesitas) tholeíticas. La provincia de Pastora o provincia del oro está conformada por las formaciones Supamo, Los Caribes, Caballape, Yuruani, Florinda, El Callao, Florinda, y Cicapra (ver tabla 1), formada por cinturones de rocas verdes (CVR), delgados, más antiguos, compuestos por Carichapo y CVR, más anchos, jóvenes menos tectonizados y metamorfizados tipo Botanamo (ver Tabla 2). El grupo Carichapo está constituido por las formaciones Cicapra, predominantemente komatítica, Florinda, basalto tholeítica a komatítica y El Callao, típicamente basalto-andesítica (“basandesitas”) tholeíticas.

Tabla 1. Características litológicas de la provincia de Pastora

Unidad	Descripción Litológica
Formación Supamo	Rocas graníticas sódicas: Cuarzo-dioritas, granodioritas, trondjemitas y además, paragénesis y migmatitas.
Formación Los Caribes	Secuencia de rocas metamórficas: filitas, meta areniscas rojas y meta conglomerados polimícticos, intercalados con lavas y brechas piroclásticas ácidas.
Formación Caballape	Rocas epiclásticas volcánicas (limonitas, grauvaca y conglomerados) 80%, y piroclásticas (tobas y brechas) 20 %, flujos de

	andesitas y dacitas intercaladas.
Formación Yuruarí	Rocas epiclásticas (filitas, esquistos, meta limonitas y meta areniscas) Localmente: brechas tobáceas y lavas dacíticas, metamorfismo regional, facies de los esquistos verdes y localmente. Lavas tholeíticas normales a ferruginosas
Formación El Callao	Metaladas basálticas a andesíticas, afectadas por metamorfismo regional, facies de los esquistos verdes a las facies de las anfibolitas localmente. Lavas tholeíticas normales a ferruginosas.
Formación Florinda	Metalavas tholeíticas normales o magnesianas y menores cantidades de komatíticas, como esquistos talco-carbonáticos.
Formación Cicapra	80% de los esquistos anfibólico-epidóticoalbiticos, afectados por metamorfismo regional facies de los esquistos verdes. Transformados en anfibolitas localmente, basaltos komatíticos en menor proporción.

Fuente: Guilloux, 1997

Tabla 2. Estratigrafía del distrito El Callao

Formación El Callao	Flujos y almohadillas basálticas-andesíticas (probablemente toleíticos), tobas, chert, jaspe y anfibolitas de grano fino.
Formación Cicapra	Tobas y brechas metamórficas andesíticas (posiblemente calcoalcalinas) y epiclásticas asociadas, anfibolitas y chert.
Formación Yuruarí	Filitas, esquistos cloríticos y sericíticos, meta-sedimentos feldespáticos, flujos andesíticos - dacíticos, tobas, brechas y chert.
Formación Caballaje	Greywacke y conglomerados volcánicos, tobas andesíticas, dacíticas y brechas.

Fuente: Unidad geológica de Minerven 2002

Sobre dichas unidades hay intrusiones graníticas, cuarzo-monzoníticas y trondjemíticas del complejo Supamo, además de sills y diques diabásicos y diques gabríticos.

Los tipos de roca representativos comprende generalmente vulcanitas (flujos masivos y basaltos almohadillados) máficas tholeíticas metamorfozadas en facies a Prenita-Pumpelita (metamorfismo de grado muy bajo) hasta raramente Esquistos Verdes, volcánicas y vulcanoclasticas (tobas y aglomerados andesíticos y dacíticos) calcoalcalinas de composición intermedia hasta félsica y sedimentos químicos (*chert*) y epiclástico (greywacke, limonitas y filitas). Estas rocas han sido interesadas por intrusiones de diques máficos (diabasa y gabro) y secundariamente félsicos (pórfidos cuarzo-feldespáticos). Unas rocas intrusivas máficas pueden ser contemporáneas de la formación supra-crustales, otras pueden ser, desde observaciones de campo, de edad claramente más joven.

2.2.1.6 El Supergrupo Pastora

Constituye la secuencia supracortical en el CRV de Guasipati-El Callao, está representada por una unidad de rocas volcánicas esencialmente máficas en su parte inferior y por una unidad de rocas volcánicas félsicas y sedimentarias asociadas, en su parte superior. La unidad máfica se definió como grupo Carichapo (formaciones Cicapra, Florinda y El Callao) y la félsica como Formación Yuruarí.

2.2.1.7 Formación Florinda

Corresponde a las rocas volcánicas ultramáficas de afinidad komatítica compuesta de basaltos almohadillados tholeíticos-magnesianos a normales, intercaladas con rocas talco-carbonáticas, las cuales se identifican como peridotitas komatíticas. Algunas lavas magnesianas muestran textura espinifex. La Formación Florinda definida por Menéndez (1994) en Mendoza (2005) como equivalente a la parte inferior de la formación El Callao y cuando esta última está ausente se localiza infrayacente a la formación Cicapra.

2.2.1.8 Formación Cicapra

Suprayacente localmente con la Formación Florinda y presenta una litología de esquistos anfibolíticos derivados de brechas y alternancia de niveles submarinos de basaltos komatíticos, tobas andesíticas, grauvacas, areniscas lodolíticas y areniscas conglomeráticas. Localmente se intercalan basaltos komatíticos y jasperoides recristalizados tipo chert, con óxidos de hierro y de manganeso, se encuentran tobas líticas, tobas brechadas y, aglomerados

volcánicos. Geomorfológicamente ocupan áreas bajas y sus suelos son laterías arcillosas color vino tinto.

2.2.1.9 Formación El Callao

Se desarrolla en la región de El Callo, representa más de 3000 metros de espesor y esta litológicamente formada por casi exclusivamente lavas basálticas almohadilladas, bajas en potasio y altas en hierro, flujo de lavas andesíticas con un predominio transicional entre ambas basandesitas, con estructuras almohadilladas altamente espilitizada, con cantidades menores de brechas de flujo al tope levemente metamorfizadas, geomorfológicamente ocupa las colinas y montes más altos (300 a 800 m.s.n.m) que meteorizan a suelos lateríticos muy arcillosos de color rojo intenso.

2.2.1.10 Formación Yuruarí

La Formación Yuruarí suprayace concordantemente a las formaciones El callao y Cicapra. Corresponde a un vulcanismo dacítico a riodacítico con lavas, brechas y tobas félsicas, derivados de epiclásticas y turbiditas, además de areniscas y limonitas feldespáticas de estratificación delgada.

En la parte inferior contiene filitas magnesíferas y grafíticas, lentejones alargados de cherts y niveles interlaminados de limolitas feldespáticas con filitas clorítica, en esta formación se pueden observar diques y existencias de pórfidos de cuarzo y feldespatos en forma de intrusiones de emplazamiento posterior recordando al Grupo Carichapo, geomorfológicamente ocupa colinas bajas y sabanas con vegetación tipo chaparros, con suelos lateríticos de colores amarillentos a algo rojizos

2.2.2 Geología Local

2.2.2.1 Distrito aurífero de El Callao

Es el de mayor tradición y conocimiento de la Provincia Pastora, en la cual fue descubierto oro por primera vez, hacia el año 1827. El Callao es el distrito aurífero más rico y famoso de Guayana con más de 300 vetas de cuarzo aurífero que han producido en su historia una cantidad mayor a 250 toneladas de oro.

Las mayores concentraciones de oro se producen en vetas de tipo hidrotermales de cuarzo aurífero con bajo contenido de sulfuros (<5% estas vetas, en su mayoría) estas vetas en su mayoría están asociadas a zonas de cizalla y fallas. Tales zonas de cizalla, en su mayoría próximas a la mineralización se caracterizan por la presencia de cherts, carbonatos magnesianos (más cercanos al depósito) y carbonatos ricos en FeO (En el depósito), con productos guías de alteración.

Secuencia litoestratigráfica: El cuadrilátero aurífero de El Callao presenta un interés minero estratégico como unidades de roca caja en los cuerpos mineralizados y en particular de numerosas vetas de cuarzo aurífero. Esta unidad consiste en rocas volcánicas diferenciadas que pueden distinguir varios tipos de litologías:

Lavas ultramáficas y máficas: se representan como coladas y lentejones alargados de komatitas o de basaltos con tendencia komatítica, los cuales tienen en su interior vetillas de clorita.

Basaltos y andesitas: están constituidos por una mineralogía de recristalización metamórfica de grano fino, masivo color verde oscuro, compuesta por horblenda, plagioclasas, clinozoisita, cuarzo secundario (5%) localmente, debido a la abundancia de los feldespatos y del cuarzo, la andesita tiene una composición más félsica a la diorita. La horblenda-antínolita está alterada en clorita y los feldespatos en caolinita.

Andesita: Contiene abundante cantidad de carbonatos de color verde claro a gris, principalmente calcita en cristales individuales, en vesículas o en impregnaciones difusas.

Tobas máficas y tobas con cristales: se encuentran algunos niveles de tobas de composición máfica e intermedia y también niveles de tobas con cristales, las cuales se presentan en intercalaciones dentro de rocas máficas.

Intrusiones ígneas: La secuencia volcánica, contiene varios diques, sills y cuerpos de rocas ígneas de composición variable, entre las cuales podemos mencionar: los diques de diabasa o de gabro-anfibolíticos los cuales su emplazamiento está controlado por la estructura a escala regional, y los diques o intrusiones de pórfido cuarcífero consisten de feldespatos potásicos, plagioclasas, cuarzo, clorita, micas y sulfuros (pirita), la roca es por lo general de color gris, masiva, dura y de grano grueso. (STATZEWITCH, 2017)

2.2.3 Relieve y Fisiografía

En la extensión territorial perteneciente al área de estudio se puede distinguir un claro dominio espacial del paisaje lomerío, lo que determina una cierta monotonía topográfica, con altos valores de pendiente; mientras que el restante, corresponde al paisaje valluno donde predominan los valores de pendiente bajos y las geomorfos planas y semiplanas. Además, estas dos unidades intercalan los planos inclinados que forman parte integral del valle (Artigas 2011).

2.2.3.1 Clima

Según datos proporcionados por el INAMEH de la región Guayana, utilizando datos suministrados por la estación meteorológica Puente Blanco pertenecientes al Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo y Aguas, ubicado según coordenadas geográficas: Latitud 7° 22' 07" y Longitud Oeste 61° 49' 41" con una altitud de 180 m.s.n.m; entre los años 1974-1985 C.V.G.TECMIN (1989), se conoce que las condiciones climáticas medias del área de estudio rondan las siguientes cifras:

- Precipitación Media Anual: 1050mm
- Evaporación Total Media Anual: 1743mm
- Temperatura Media Anual: 35,7°C
- Temperatura Media Mínima Anual: 21°C
- Temperatura Media Máxima Anual: 31,4°C

El clima es tropical de sabana arbolada (Clasificación Koeppen), con un periodo de lluvias comprendido entre los meses de Abril a Octubre.

2.3.4 Morfología de los cuerpos minerales.

El conocimiento de la forma de los cuerpos minerales es fundamental para el estudio de los yacimientos minerales y tiene gran importancia al aplicar los métodos para el cálculo de las reservas y otros trabajos. El cuerpo mineral constituye la unidad estructural del yacimiento; su morfología está íntimamente ligada con su génesis y con los procesos sufridos durante su desarrollo.

V.I, Smirnov (1982) considera que un cuerpo o deposito mineral es “la acumulación local de la materia prima mineral natural asociada a un elemento geológico estructural determinado o a una combinación de tales elementos”. Por su propio concepto, la forma de

los cuerpos minerales depende de las estructuras geológicas o tectónicas con las que se encuentra asociado, las cuales pueden ser determinantes en este sentido. Asimismo, determinados procesos de origen de acumulaciones minerales generan determinados cuerpos con formas características; se pueden relacionar estrechamente la morfología de los cuerpos minerales con los tipos genéticos de yacimientos, aunque esto puede sufrir variaciones dentro de límites muy amplios.

Se distinguen tres tipos morfológicos de cuerpos minerales atendiendo a las relaciones que existen entre sus tres dimensiones básicas: cuerpos isométricos, tabulares y tubulares. Se llaman cuerpos isométricos aquellas acumulaciones de minerales que aproximadamente poseen las mismas dimensiones, en cualquier dirección en que se corte. Dentro de este tipo morfológico aparecen los stocks, los stockworks y los bolsones o bolsas.

Los stockworks, también llamados vetas entrecruzadas o criaderos en masa, corresponden a cuerpos muy complejos formados por una masa isométrica de rocas con mineralización diseminada, atravesada por un sistema complicado de vetas o venillas que se intersecan en direcciones variadas. Son característicos para los yacimientos de tipo hidrotermal.

En cuanto a los yacimientos tabulares se caracterizan por tener dos direcciones que predominan sobre una tercera sustancialmente más corta, generando cuerpos aplanados, tabulares, los cuales pueden ser de dos tipos, las primeras vetas o filones y en segundo lugar estratos o capas. Definiendo las vetas como cuerpos tabulares a los cuales pueden ser definidos los elementos geométricos de ubicación, rumbo y buzamiento, se encuentran en la naturaleza de espesor variable, algunas se acuñan en sentido del buzamiento de las mismas, con mineralización por impregnación diseminada con origen endógeno hidrotermal.

En último lugar los yacimientos los cuerpos tubulares, en los cuales predomina una sola dirección ampliamente sobre las otras dos (2), generando cuerpos columnares o chimeneas de origen ígneo.

2.3 BASES CONCEPTUALES

2.3.1 Clasificación de reservas

2.3.1.1 Clasificación De Recursos y Reservas Mineras Según el Código de Australasia para informar sobre recursos minerales y reservas (Código JORC).

En la figura 2, se observa la relación general entre recursos y reservas minerales propuesta por el Código de Australasia para informar sobre recursos minerales y reservas, establecida en 1999 en un encuentro entre el Concejo de Instituciones Mineras y Metalúrgicas (CMMI) y la comisión de naciones unidas para continuar con el proceso de desarrollo de normas y definiciones internacionales.



Figura 2. Relación general entre recursos y reservas minerales. Fuente Código JORC

2.3.1.1.1 Recursos Minerales

Es una concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza de la Tierra en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos geológicos específicos. Los Recursos Minerales se subdividen, en orden ascendente de la confianza geológica, en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos.

Recurso Mineral Inferido

Es aquella parte de un Recurso Mineral por la cual se puede estimar el tonelaje, ley y contenido de mineral con un bajo nivel de confianza. Se infiere a partir de evidencia geológica y se asume pero no se certifica la continuidad geológica ni de la ley. Se basa en información inferida mediante técnicas apropiadas de localizaciones como pueden ser afloramientos, zanjas, rajos, laboreos y sondajes que pueden ser limitados o de calidad y confiabilidad incierta.

Recurso Mineral Indicado

Es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual puede estimarse con un nivel razonable de confianza el tonelaje, densidad, forma, características físicas, ley y contenido mineral. Se basa en información sobre exploración, muestreo y pruebas reunidas mediante técnicas apropiadas en ubicaciones como pueden ser: afloramientos, zanjas, rajos, túneles, laboreos y sondajes. Las ubicaciones están demasiado espaciadas o su espaciamiento es inapropiado para confirmar la continuidad geológica y/o de ley, pero está espaciada con suficiente cercanía para que se pueda suponer continuidad.

Recurso Mineral Medido

Es aquella parte de un Recurso Mineral para el cual puede estimarse con un alto nivel de confianza el tonelaje, su densidad, forma, características físicas, ley y contenido de mineral. Se basa en la exploración detallada e información confiable sobre muestreo y pruebas obtenidas mediante técnicas apropiadas de lugares como pueden ser afloramientos, zanjas, rajos, túneles, laboreos y sondajes. Las ubicaciones están espaciadas con suficiente cercanía para confirmar continuidad geológica y/o de la ley.

2.3.1.1.2 Reserva Minera

Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando se extraiga el material. Se han realizado las evaluaciones apropiadas, que pueden incluir estudios de factibilidad e incluyen la consideración de modificaciones por factores razonablemente asumidos de extracción, metalúrgicos, económicos, de mercados, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones demuestran en la fecha en que se reporta que podría justificarse razonablemente la extracción. Las Reservas de Mena se subdividen en orden creciente de confianza en Reservas Probables Minerales y Reservas Probadas Minerales.

2.3.1.1.3 Reserva Minera Probable

Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Indicado y en algunas circunstancias Recurso Mineral Medido. Incluye los materiales de dilución y tolerancias por pérdidas que puedan producirse cuando se explota el material. Se han realizado evaluaciones apropiadas, que pueden incluir estudios de factibilidad, e incluyen la consideración de factores modificadores razonablemente asumidos de minería, metalúrgicos, económicos, de mercadeo, legales, medioambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones

demuestran a la fecha en que se presenta el informe, que la extracción podría justificarse razonablemente.

.2.3.1.1.4 Reserva Minera Probada

Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido. Incluye los materiales de dilución y tolerancias por pérdidas que se pueden producir cuando se explota el material. Se han realizado evaluaciones apropiadas que pueden incluir estudios de factibilidad, e incluyen la consideración de modificaciones por factores fehacientemente asumidos de minería, metalúrgicos, económicos, de mercados, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones demuestran, a la fecha en que se publica el informe, que la extracción podría justificarse razonablemente.

2.3.1.2 Clasificaciones Marco de las Naciones Unidas para la Energía Fósil y los Recursos y Reservas Minerales 2009 (CMNU-2009).

Es un sistema genérico basado en principios en el que las cantidades se clasifican de acuerdo a tres criterios, cada uno de ellos es asignado a una dimensión, por lo que al final se cuenta con un sistema de tres dimensiones; el eje E, el eje F y el eje G (UNEXPO,2010).

El primer conjunto de categorías (eje E) designa en qué medida son favorables las condiciones sociales y económicas a la hora de establecer la viabilidad comercial del proyecto, considerando los precios del mercado y las condiciones de naturaleza jurídica, normativa, ambiental y contractual.

El segundo conjunto (eje F) designa la madurez de los estudios y compromisos necesarios para poner en práctica planes y proyectos de explotación de los recursos mineros. Esos estudios van desde las primeras actividades de exploración hasta el establecimiento de un proyecto para extraer y vender el producto.

El tercer conjunto de categorías (eje G) designa el nivel de confianza en el conocimiento geológico y las posibilidades de recuperar las cantidades establecidas.

Una clase queda definida al seleccionar una combinación determinada de una categoría de cada uno de los tres criterios o ejes. Como los códigos se citan siempre en la misma secuencia (E; F; G) pueden suprimirse las letras y dejarse solo los números. De esta manera, el código numérico que define una clase resulta idéntico en todos los idiomas que utilizan la numeración arábiga. La figura 3 muestra las categorías y ejemplos de clases de la CMNU

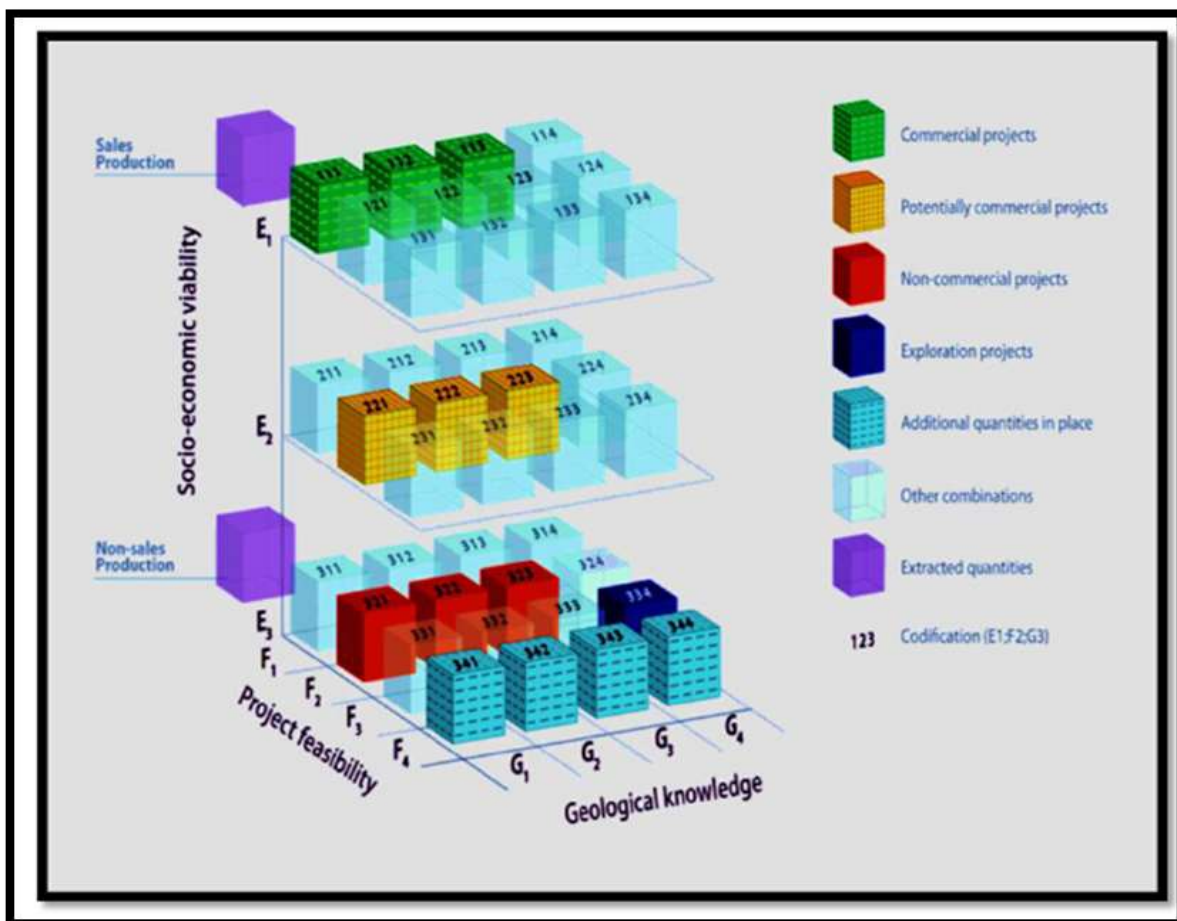


Figura 3. Categorías y ejemplos de clases de la CMNU

Fuente: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/unfc2009/UNFC2009_ES39_s.pdf

2.3.2 Categorización de Recursos

La categorización de recursos minerales (o geológicos) y reservas mineras es una de las etapas más críticas en la evaluación de un proyecto minero, dado que el financiamiento del proyecto y las inversiones dependen de la cantidad (tonelaje) y calidad (ley) de los recursos y reservas. Además, la decisión de invertir en el proyecto considera la confiabilidad en los valores estimados de estos recursos y reservas.

Sin embargo, este a su vez es de los procedimientos más subjetivos en la evaluación, dado que la clasificación queda sujeta a la opinión experta de un especialista en evaluación de yacimientos. En los últimos años, los códigos internacionales han tendido a incluir de manera más explícita los requerimientos para la divulgación de resultados de la estimación de los recursos y reservas, sin embargo, aún no se ha especificado una metodología fija para todos los proyectos.

Los principales métodos a través de los cuales los recursos minerales pueden ser categorizados se dividen en dos grupos:

- Criterios tradicionales o clásicos
- Criterios geoestadísticos.

2.3.2.1 Criterios Tradicionales o Clásicos

Los métodos tradicionales de categorización hacen uso de los siguientes criterios:

2.3.2.1.1 Continuidad geológica

La clasificación de recursos y reservas minerales depende en primer lugar de la comprensión de la génesis del yacimiento y de la valoración de la continuidad geológica del volumen mineralizado. Aquí es muy importante establecer la

continuidad física o geometría de la mineralización o de las estructuras controladoras. La continuidad física o geométrica no es fácilmente cuantificable. Para establecer este tipo de continuidad es necesario interpretar los datos disponibles y establecer el modelo geológico del yacimiento sobre la base del conocimiento existente y la experiencia previa obtenida en depósitos similares.

2.3.2.1.2 Densidad de la red de exploración (grado de estudio)

Para las distintas categorías se recomienda un determinado espaciamiento de la red de exploración lo cual está en función del tipo de yacimiento. Las redes para cada categoría se argumentan sobre la base de la experiencia (principio de analogía) en otros yacimientos similares, véase tabla 3.

Tabla 3. Ejemplo de clasificación en función de la densidad de la red de exploración.

Tipos de yacimiento	Densidad de la red para las distintas clases de recursos		
	Medida	Indicada	Inferida
Yacimiento de carbón De Witbank (Africa del Sur)	250 x 250m	350 x350 m	500 x 500m
Yacimiento de Oro de Saddleback (Australia)	25 x 25 m	50 x 50 m	100 x 100m
Yacimiento de Niquel Laterítico	25 x 25 m	50 x50 m	100 x 200 m
Placeres de minerales pesados.	200 x40 m	400 x 80 m	Continuidad geológica

2.3.2.1.3 Interpolación contra extrapolación

Los bloques cuyos valores han sido estimados por interpolación o sea están localizados dentro de la red de muestreo son clasificados en categorías más confiables que los localizados más allá de la última línea de pozos (extrapolados). La mayoría de los sistemas de clasificación exige no incluir bloques extrapolados en la clase de recursos medidos.

2.3.2.1.4 Consideraciones tecnológicas

La recuperación del testigo, el volumen de las muestras, la forma en que fueron tomadas y el método de perforación influyen directamente sobre la calidad de los datos. Los sectores donde existen problemas de representatividad o confiabilidad de los análisis deben ser excluidos de la categoría de recurso medido.

2.3.2 Concepto de geoestadística

El término “geoestadística” se refiere al estudio estadístico de un fenómeno natural (Journel y Huijbregts, 1978). G. Matheron, fue el primero en establecer una definición teórica: “La geoestadística es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias para el reconocimiento y estimación de fenómenos naturales” (Matheron, 1962 citado en Journel y Huijbregts, 1978). Un fenómeno natural puede ser caracterizado por la distribución en el espacio de una o más variables llamadas “variables regionalizadas”, por ejemplo, la distribución de altitudes en un espacio horizontal que caracterizan una superficie topográfica.

(Journel y Huijbregts, 1978). Chauvet, 1994, define a la geoestadística como el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio (Cuador-Gil y Quintero-Silverio,2001).

2.3.3 Orígenes de la geoestadística

Los orígenes de la geoestadística se encuentran en la industria minera. D.G.Krige, ingeniero en las minas de Sudáfrica, junto con el estadístico H. S. Sichel, desarrollaron un nuevo método de estimación a principios de 1950 cuando encuentran que la estadística clásica era inadecuada para la estimación de reservas de minerales diseminados . Georges Matheron, ingeniero francés desarrollo los conceptos innovadores de Krige, formalizándolos en una su "*Teoría de las variables regionalizadas*" Matheron, en el Centro de Geoestadística, revoluciono el uso de estadística en minería a principios de 1960. La palabra Kriging fue dada en reconocimiento de D.G. Krige.

A principios de 1970, el método de interpolación kriging había probado ser muy útil en la industria minera, así la geoestadística fue introducida a la comunidad petrolera a mediados de 1970, a través del primer paquete comercial: BLUEPACK .

Con la llegada de computadoras personales, en 1970, la técnica geoestadística se extendió a muchas otras áreas de Ciencias de la Tierra. Sin embargo, no fue hasta a mediados de los 80's que las técnicas geoestadísticas fueron utilizadas en áreas de la industria petrolera, creciendo su popularidad desde entonces.

2.3.4 Variables regionalizadas

Variable distribuida en el espacio de manera tal que presenta una estructura espacial de correlación.

Una definición más rigurosa matemáticamente equivalente consistiría en decir que una variable regionalizada es una variable aleatoria z definida en un punto del espacio x . Donde en el caso más general x es un punto en el espacio tridimensional.

2.3.5 Variograma

El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de la propiedad o variable bajo estudio sobre una zona dada. Por ejemplo, se puede observar en un variograma la dirección de mayor y menor continuidad espacial de la variable. Esto permite tomar en cuenta que, por ejemplo, la variable porosidad varía de forma más continua en la dirección N-S que en la dirección E-O.

El variograma γ para una función aleatoria estacionaria de orden 2, se define formalmente como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} 2E[Z(x) - Z(x+h)]^2 = \frac{1}{2} Var[Z(x) - Z(x+h)] \quad (4)$$

Donde x y h son puntos o vectores en el espacio $Z(x)$ y $Z(x+h)$ representan la propiedad o variable bajo estudio en los puntos x y $x+h$ respectivamente. Nótese que al ser h un vector en el espacio, éste posee cierta dirección y módulo (que se denotará por h), por lo que el variograma no es más que el valor promedio del cuadrado de la diferencia entre dos valores de la propiedad bajo estudio, en puntos del espacio que se encuentran separados por una distancia h en la dirección de h . De esta forma, el variograma es en general una función positiva que depende del módulo del vector h y de su dirección. Así, utilizando el variograma, se puede estudiar como varía la propiedad en una cierta dirección al variar la distancia, a través del módulo y la dirección del vector h . Cuando el variograma sólo depende del módulo del vector h y no de la dirección en que se calcula se dice que es *isotrópico* y cuando depende de ambos se dice que es *anisotrópico*.

Es importante observar que el variograma depende de la distancia y la dirección entre los puntos donde se observa la variable y no de la propia localización de estos.

Como funciones de la distancia $|h|$, los variogramas son funciones muy particulares que, como se verá más adelante, satisfacen ciertas condiciones, por lo cual, cualquier función de la distancia no necesariamente es un variograma. Por ejemplo, $\gamma(h) = |h|^\alpha$ no es un variograma para $\alpha > 2$.

La forma típica de variación con distancia, para una dirección dada, de los variogramas correspondientes a funciones aleatorias estacionarias se muestra en la figura 4.

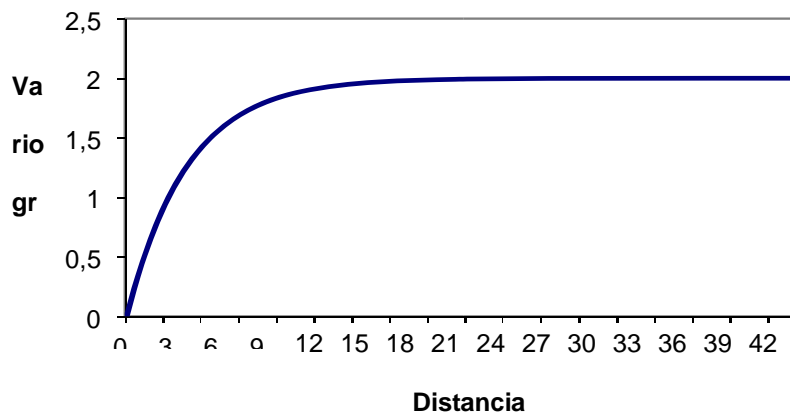


Figura 4. Forma de un variograma típico. (Rojas, 2015)

2.3.6 Propiedades del variograma

2.3.6.1 Comportamiento a distancias grandes

2.3.6.1.1 Rango.

Si a partir de una distancia específica d , $Z(x)$ y $Z(x+h)$ no están correlacionadas entonces $C(h) = 0$ para todo h tal que $|h| \geq d$. De esta forma, por la propiedad anterior, el variograma se estabiliza a partir de dicha distancia tomando el

valor constante $C(0)$. Esta distancia se conoce como el *rango o alcance* del variograma y el valor constante que toma se llama *meseta o sill* y corresponde a la varianza de la función aleatoria Z . Por ejemplo, en la figura 4 el rango es aproximadamente quince (15) y el sill es dos (2).

Esta propiedad del variograma indica que si dos valores de una misma propiedad se encuentran separados a una distancia mayor al rango del variograma entonces no hay correlación entre ambos. Es así como a través del rango del variograma se puede definir una “zona de influencia” y tener una idea de la extensión de ésta. Por ejemplo, si el variograma de la porosidad en un determinado yacimiento tiene rango 2 Km, entonces los valores de porosidad separados por una distancia mayor a 2 Km son no correlacionados. En consecuencia, muestras separadas una distancia mayor a 2 Km no tienen influencia una sobre la otra.

Como se verá posteriormente, no todos los variogramas se estabilizan a partir de una distancia dada. Esto puede indicar la presencia de una tendencia en la variable o bien que para cualquiera que sea la distancia, los valores de la variable bajo estudio siempre se encuentran correlacionados dentro de la región o yacimiento en la cual se estudia dicha variable.

2.3.6.2 Comportamiento a cortas distancias

El comportamiento del variograma a pequeñas distancias es sumamente importante porque es este comportamiento el que se encuentra ligado a la variabilidad espacial de h la propiedad o variable bajo estudio. Por ejemplo, si para valores de $|h|$ pequeños, $Z(x)$ y $Z(x+h)$ tienen valores muy diferentes entonces $\gamma(h)$ crecerá muy rápido con pequeñas variaciones de la distancia, lo que indica que la propiedad varía muy rápido entre puntos poco separados. Inversamente, si $Z(x)$ y $Z(x+h)$ son

bastantes similares para distancias pequeñas, entonces el variograma crecerá en forma más lenta con pequeñas variaciones de la distancia, indicando que hay menor variabilidad de la propiedad entre puntos poco separados.

El comportamiento del variograma a cortas distancias posee fundamentalmente 3 formas:

2.3.6.2.1 Comportamiento Cuadrático o Parabólico

Este comportamiento indica que la variable regionalizada es sumamente continua e incluso infinitamente diferenciable. La figura 5 muestra un comportamiento cuadrático cerca del origen. Esta característica implica que si la variable bajo estudio, por ejemplo, porosidad o saturación de agua, tiene un variograma con un comportamiento cuadrático en el origen, entonces varía poco con pequeñas variaciones de la distancia. Este tipo de comportamiento generalmente se observa en los topos estructurales de los yacimientos.

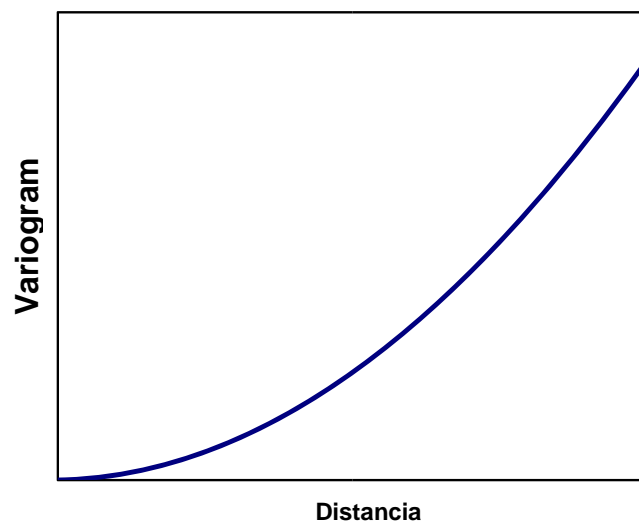


Figura 5. Comportamiento parabólico a distancias cortas (Rojas, 2015)

2.3.6.2.2 Comportamiento lineal

En este caso la variable regionalizada es continua pero no diferenciable. Esto implica que la variable es menos regular que en el caso anterior. La pendiente de la línea recta que forma el variograma en distancias cercanas al origen es una medida de cuán rápido varía la propiedad. Así, a mayor pendiente mayor es la variación a distancias pequeñas y a menor pendiente menor será la variación en estas distancias. Esto es equivalente a considerar la pendiente como una medida de cuán rápido decae con la distancia la influencia que tiene la variable o propiedad en estudio en un punto en otro punto de la región.

La figura 6 muestra varios comportamientos lineales para distancias pequeñas con distintas pendientes.

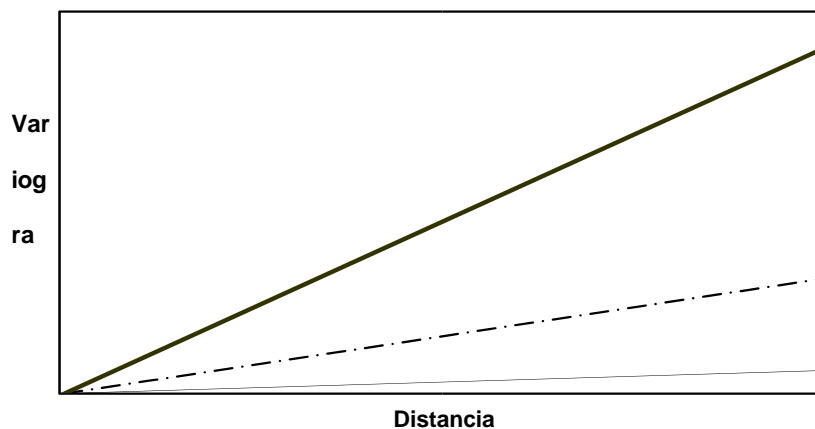
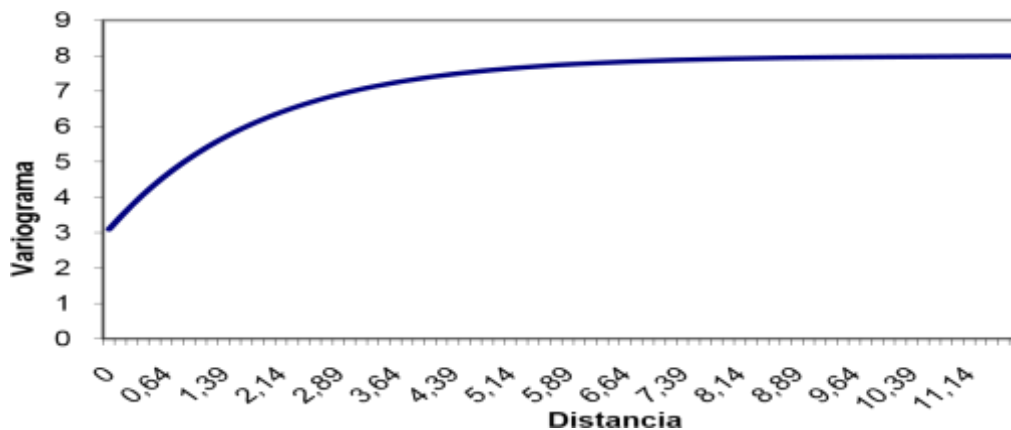


Figura 6. Comportamiento lineal a distancias cortas con diversas pendientes (Rojas, 2015)

2.3.6.2.3 Discontinuidad en el origen. Efecto pepita o *nugget effect*

Aunque $\gamma(0) = 0$, puede ocurrir que el variograma presente una discontinuidad en el origen. Es decir, para valores de la distancia $|h|$ sumamente pequeños, $\gamma(h)$ no se aproxima a $\gamma(0)$. Esto generalmente suele encontrarse si la variable es extremadamente irregular a distancias cortas, o bien se puede interpretar como errores de medida en esta, o a la presencia de estructuras de tamaño inferior a la distancia a la cual se tomaron las muestras, entre otras.

La figura 7 muestra un variograma con una discontinuidad en el origen o *nugget effect* con un valor de tres (3).



2.3.7 Figura 7. Variograma con una discontinuidad *nugget effect* igual a 3. (Rojas, 2015)

Como se había indicado anteriormente, el variograma, al ser una función dependiente de la distancia y de la dirección en que se calcula, permite detectar direcciones de anisotropía en la variable bajo estudio. Esto se observa al estudiar la forma que tiene el variograma en distintas direcciones y comparar su comportamiento, según los casos estudiados anteriormente. Por ejemplo, supongamos que al calcular el variograma de la porosidad en un yacimiento en las direcciones N-S y E-O se obtiene la Figura 8. En este caso se observa que la pendiente en el origen del variograma en la dirección N-S es menor que la pendiente en el origen del variograma en la dirección

E-O. Esto indica entonces que la porosidad varía en forma más suave en la dirección N-S que en la dirección E-O. Como se verá más adelante, esta información contenida en el variograma es transmitida al método de estimación por kriging y a las simulaciones estocásticas, obteniéndose de esta manera estimaciones y simulaciones que toman en cuenta la dirección de anisotropía que presenta la variable en el medio.

Los distintos tipos de anisotropía que se pueden observar en el variograma al ser calculado en diferentes direcciones son: La anisotropía geométrica, anisotropía zonal y combinaciones de estas.

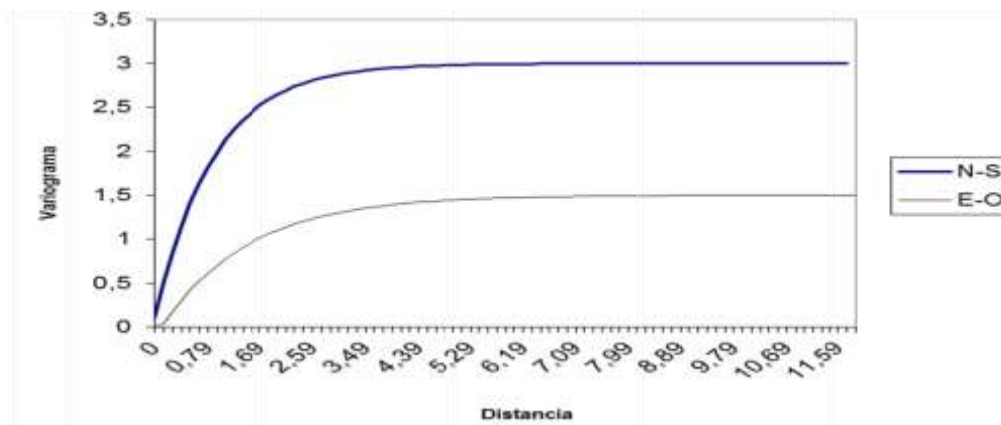


Figura 8. Comportamiento anisotrópico de la variable bajo estudio. (Rojas, 2015)

2.3.8 Combinación lineal de variogramas

Si $\gamma_1(h), \gamma_2(h), \gamma_3(h), \dots, \gamma_N(h)$ son distintos variogramas y $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ son números positivos entonces $\gamma(h) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma_i(h)$ es un variograma. Esta propiedad es fundamental para estudiar variables que puedan presentar variaciones a distintas escalas. Por ejemplo, puede ocurrir que la variación a pequeñas distancias sea más fuerte que a mayores distancias debido a un proceso geológico particular. Este fenómeno se observa en el variograma al poseer una pendiente fuerte en distancias cercanas al origen con un característico cambio de curvatura para distancias mayores, con una pendiente más suave como se puede observar en la figura 9.

Al variograma resultante de la combinación lineal de variogramas con diversos parámetros (rango y meseta o *sill*) se le denomina variograma imbricado o por su nombre en inglés, *nested structure*.

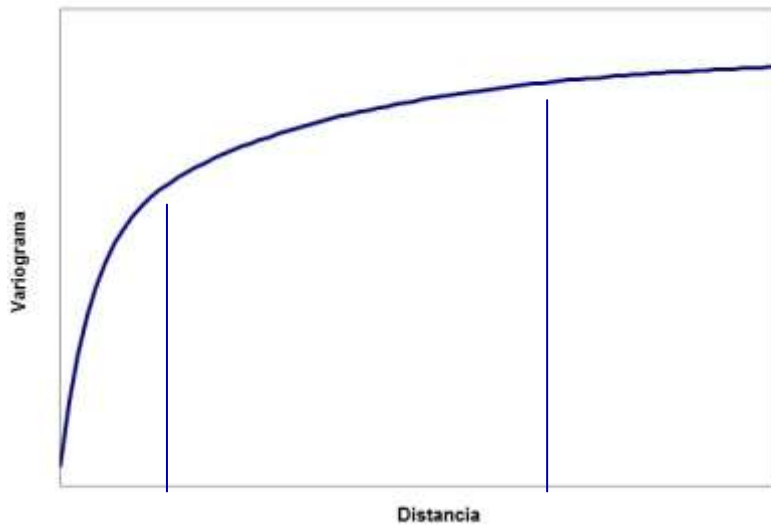


Figura 9. Variograma con pendiente mayor a distancias cercanas al origen. (Rojas, 2015)

Este tipo de variograma es característico de variables con variaciones a diferentes escalas. Las líneas segmentadas indican los rangos de las dos estructuras imbricadas.

2.3.9 Modelos de variograma

Vistas las propiedades básicas de los variogramas, a continuación se describen algunas funciones que son variogramas isotrópicos. Estas suelen llamarse *modelos de variogramas* (La lista que se presenta no es exhaustiva). Asimismo, recordar que h es un vector y que el valor h que aparece en las ecuaciones siguientes corresponde al módulo de éste.

2.3.9.1 Efecto pepita puro o *nugget effect*

Este variograma se define por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } |h| = 0 \\ s & \text{si } |h| \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde s es el *sill* del variograma. La figura 10 muestra el variograma de *nugget effect*



Figura 10. Variograma efecto pepita o *nugget effect* (Rojas, 2015)

Este modelo de variograma corresponde a un fenómeno completamente aleatorio, en el cual no hay correlación entre los valores de la variable en estudio en puntos distintos, sin importar cuan cerca estos se encuentran.

2.3.9.2 Modelo Esférico

El modelo esférico se define por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} s \left(\frac{3|h|}{2\alpha} - \frac{1}{2} \frac{|h|^3}{\alpha^3} \right) & \text{si } |h| \leq \alpha \\ s & \text{si } |h| > \alpha \end{cases} \quad (6)$$

Donde s es el *sill* del variograma y a el alcance o rango.

La Figura 11 muestra el variograma esférico. Este modelo presenta un comportamiento lineal en el origen con pendiente igual a $1.5 \ s/a$ y es quizás uno de los modelos de variogramas más utilizados.

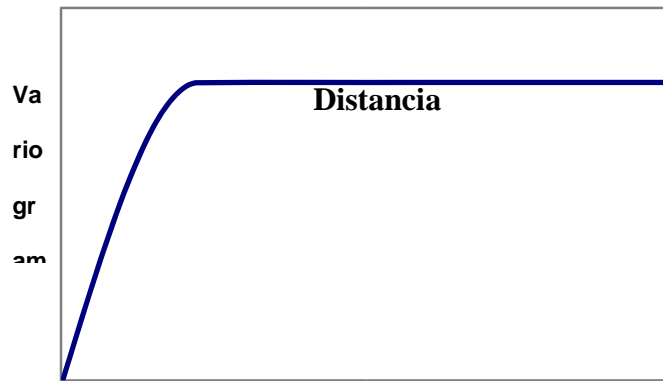


Figura 11. Modelo de variograma esférico (Rojas, 2015)

2.3.9.3 Modelo exponencial

El modelo exponencial se define como

$$\gamma(h) = s \left(1 - \exp \left(-\frac{|h|}{a} \right) \right) \quad (7)$$

Donde s es el valor del *sill* y a es el *rango aparente*. En el caso del modelo exponencial el valor a recibe este nombre porque a esta distancia no se estabiliza el variograma. De hecho, el variograma exponencial alcanza el *sill* cuando a tiende al infinito. Por esta razón se suele calcular el *rango experimental*, que se define como la

distancia a la cual el variograma alcanza el 95 % del valor del *sill*. Para el variograma exponencial el *rango experimental* es $3a$. Una forma equivalente de escribir la ecuación que define al variograma exponencial es considerar:

$$\gamma(h) = s \left(1 - \exp \left(-\frac{3|h|}{a'} \right) \right) \quad (8)$$

Escrito en esta forma, el *sill* es s y el *rango experimental* es $a' = 3a$. Utilizando esta última ecuación, se obtiene que el variograma exponencial tiene un comportamiento lineal en el origen con pendiente igual a $3s/a$. De esta forma, el variograma exponencial tiene una pendiente mayor en el origen que el variograma esférico. La figura 12 muestra el variograma exponencial.

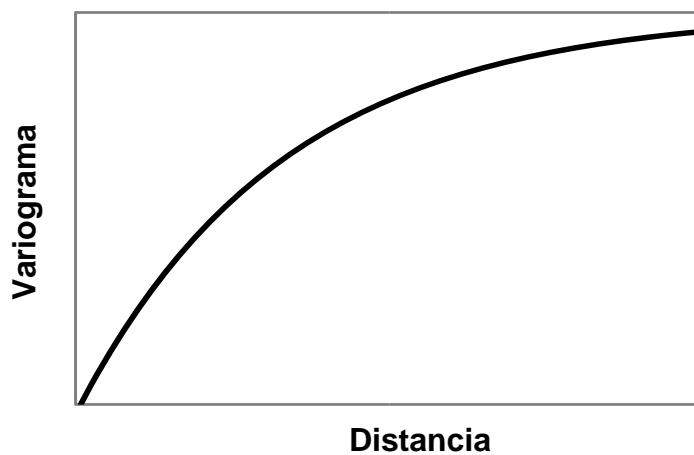


Figura 12. Modelo de variograma exponencial (Rojas, 2015)

2.3.9.4 Modelo gaussiano

El modelo gaussiano se define como

$$\gamma(h) = s \left(1 - \exp \left(-\frac{|h|^2}{a^2} \right) \right) \quad (9)$$

Donde s es el *sill* y a es el *rango aparente*. Para distancias cercanas a cero,

$$\left(1 - \exp \left(-\frac{|h|^2}{a^2} \right) \right) \approx \frac{|h|^2}{a^2}$$
 por lo que este variograma presenta un comportamiento

parabólico o cuadrático en el origen, razón por la cual se utiliza para modelar variables extremadamente continuas. El variograma gaussiano tiene rango *sill* experimental igual a $\sqrt{3a}$ y al igual que el variograma exponencial, alcanza el cuándo a tiende al infinito.

El modelo gaussiano conduce a inestabilidades numéricas que han sido reportadas en la literatura cuando se utiliza para estimar por kriging. Una solución a este problema es considerar el modelo gaussiano combinado con un modelo de efecto pepita puro. La Figura 13 muestra el variograma gaussiano.

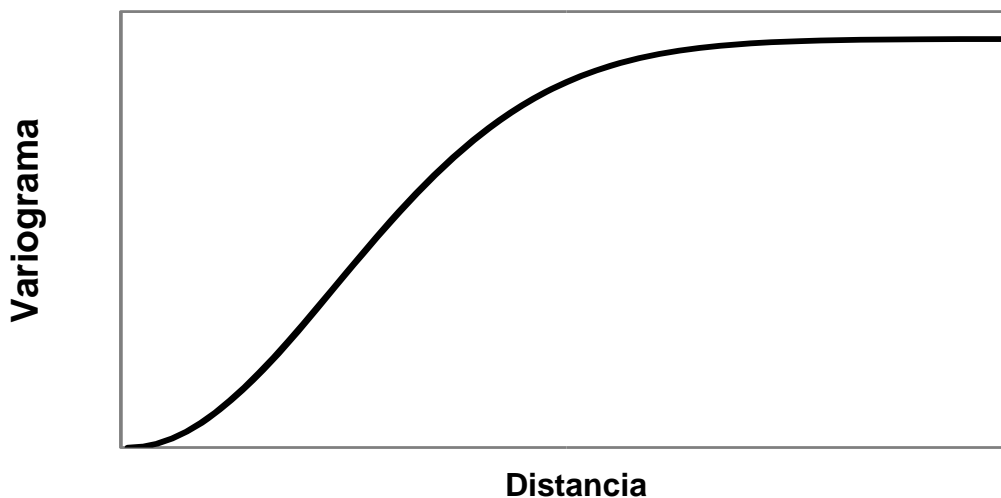


Figura 13. Modelo de variograma gaussiano (Rojas, 2015)

2.3.9.5 Modelo potencia

El modelo potencia se define por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = s|h|^p \quad (10)$$

Donde s es un número positivo que funciona como un factor de escala y p es un parámetro tal que $0 \leq p < 2$.

El comportamiento en el origen de este tipo de variograma depende del parámetro p y puede variar desde un comportamiento lineal (por ejemplo $p = 1$) hasta un comportamiento cuadrático (por ejemplo $p = 1.7$). Asimismo, se debe observar que este tipo de variograma no posee un *sill*, por lo cual representan fenómenos no estacionarios o intrínsecos. La figura 14 muestra el comportamiento del variograma potencia para distintos valores de p y factores de escala s .

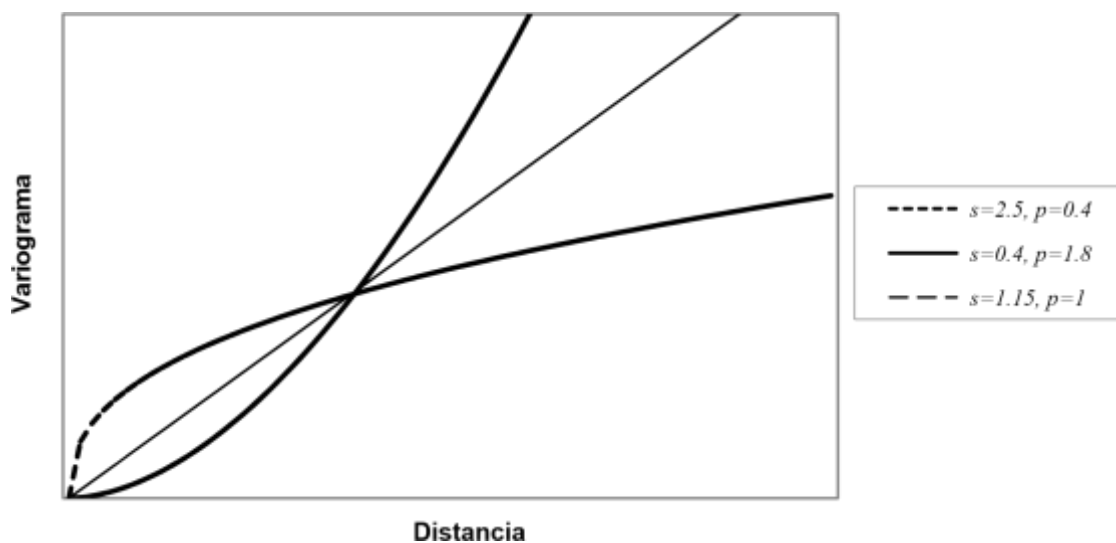


Figura 14. Modelos de variograma potencia para distintas potencias. (Rojas, 2015)

2.3.9.6 Modelo Cúbico

Este modelo de variograma se encuentra definido por la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) \begin{cases} s \left(7 \frac{|h|^2}{a^2} - 8.75 \frac{|h|^3}{a^3} + 3.5 \frac{|h|^5}{a^5} - 0.75 \frac{|h|^7}{a^7} \right) & \text{si } |h| \leq a \\ s & \text{si } |h| > a \end{cases} \quad (11)$$

Es similar al modelo gaussiano, ya que presenta un comportamiento parabólico en el origen, pero a diferencia de este, alcanza el *sill* s y tiene como rango el valor a .

La Figura 15 muestra la gráfica del modelo cúbico.

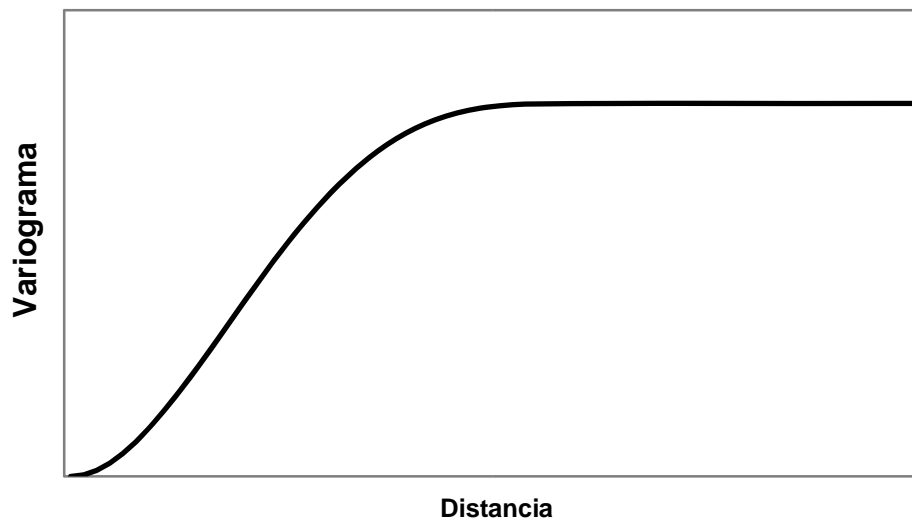


Figura 15. Modelo de variograma cúbico (Rojas, 2015)

2.3.9.7 Modelo Seno Cardinal

El modelo seno cardinal se define como lo indica la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = s \left(1 - \frac{\text{sen}\left(\frac{|h|}{a}\right)}{\frac{|h|}{a}} \right) \quad (12)$$

Tiene *sill* s y lo alcanza cuando a converge al infinito. El *rango experimental* es $3a$ y es un modelo con comportamiento cuadrático en el origen que sirve para representar modelos sumamente continuos. La figura 16 muestra la gráfica del modelo seno cardinal. Este tipo de modelo se utiliza cuando la variable o propiedad en estudio posee periodicidades.

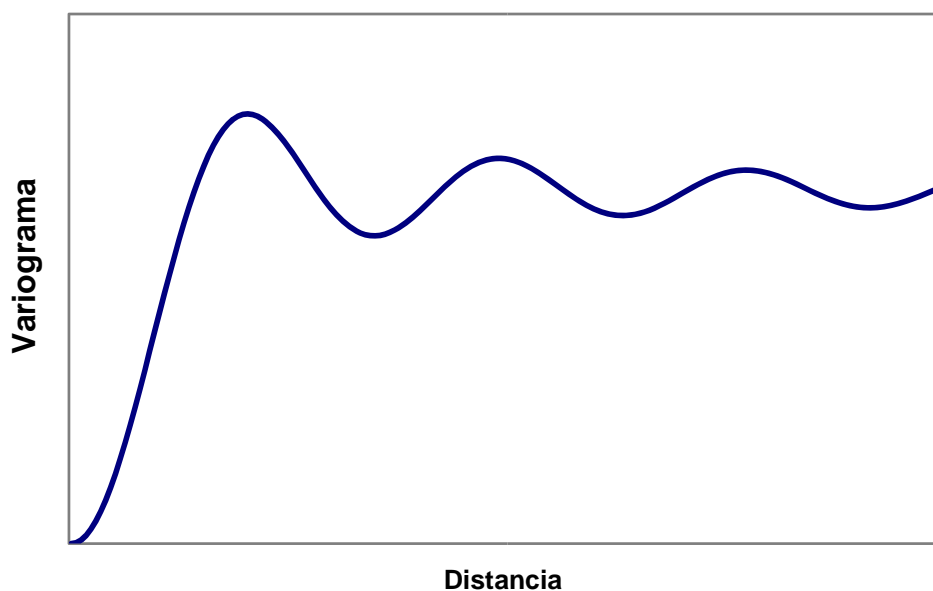


Figura 16. Modelo de variograma seno cardinal (Rojas, 2015)

2.3.10 El variograma experimental

En general en un estudio geoestadístico es necesario determinar el modelo de variograma que será usado para la estimación o simulación de la variable en estudio. En general, este trabajo es difícil de realizar y debe ser llevado a cabo con mucha cautela, tratando de incorporar el mayor conocimiento de los datos que se estudian y de las distintas disciplinas que puedan aportar información sobre el comportamiento de estos, ya que todos los procedimientos posteriores dentro del propio estudio geoestadístico requieren del variograma previamente escogido. Por consiguiente, el variograma no se debe fijar arbitrariamente sino que debe ser obtenido de la propia información que aportan los datos o variable en estudio. Para ello, se utiliza el variograma experimental, que en el caso de una sola variable, se define por:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = |h|} (z(x_i) - z(x_j))^2 \quad (13)$$

Donde $N(h)$ es el número de pares de puntos que se encuentran a una distancia h , $z(x)$ es el valor de la propiedad medida en el punto x y la suma se considera sobre todos los pares que estén separados una distancia h en la dirección del vector h . En el caso de 2 variables Z y Y , el variograma cruzado experimental se define como:

$$\gamma_{ZY}^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = |h|} (z(x_i) - z(x_j))(y(x_i) - y(x_j)) \quad (14)$$

Donde $z(x)$ y $y(x)$ son los valores de las propiedades o variables observadas en el punto x . Nótese que $\gamma^*(h)$ y $\gamma_{ZY}^*(h)$ son simplemente discretizaciones de $\gamma(h)$ y

$\gamma_{ZY}(h)$, respectivamente. De esta forma, para hallar un modelo de variograma que se adapte a los datos con que se cuentan, se procede básicamente en la forma siguiente:

2.3.11 Cálculo del variograma experimental

Se calcula primero el variograma experimental en diversas direcciones y distancias, con la finalidad de detectar el comportamiento espacial de la variable. Esto es, por ejemplo, para determinar si hay mayor relación entre puntos separados por una distancia dada en el sentido N-S que en el sentido E-O, o si por el contrario, la variación de la propiedad entre dos puntos depende sólo de la distancia que los separa, o bien para estudiar tendencias o *drift* en la variable, así como su comportamiento a pequeñas y grandes distancias. Resultado de este estudio, se tiene, en cada dirección utilizada, un conjunto de puntos que representa el valor del variograma experimental calculado para distintos valores de la distancia en dicha dirección. Al graficar estos puntos, se obtiene una representación discreta (ya que se cuenta con un número finito de muestras de la variable o propiedad en estudio) de como varía el variograma experimental en una cierta dirección al variar la distancia. Un ejemplo de este tipo de gráfico se muestra en la figura 17, donde se presenta el variograma experimental calculado en una sola dirección y para distintos valores de distancia.

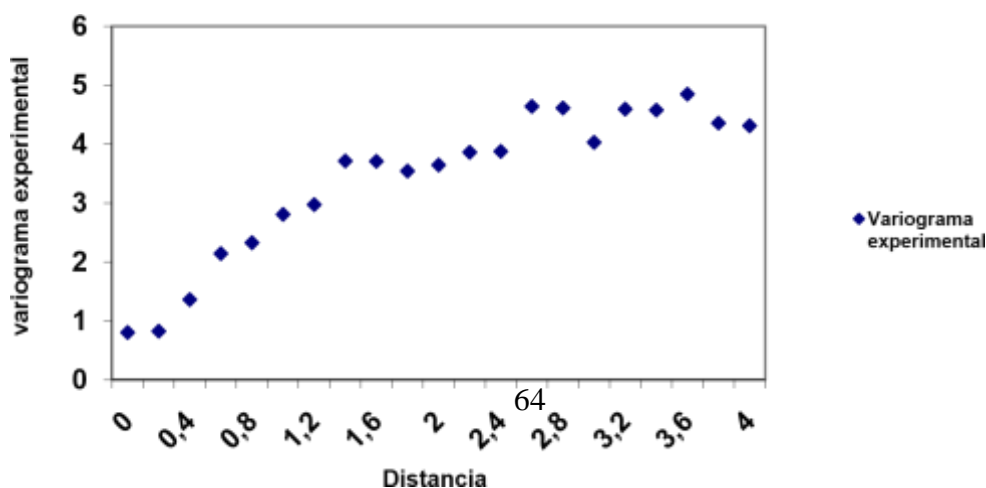


Figura 17. Ejemplo de un variograma experimental (Rojas, 2015)

Es usual escoger entre todos los variogramas experimentales, aquellos que representan las direcciones de mayor y menor continuidad espacial de la variable, ya que a partir de estas se puede definir un elipsoide de anisotropía en cualquier dirección.

2.3.11.1 Ajuste de un modelo de variograma

Una vez escogidos los variogramas experimentales a utilizar, se ajusta un modelo de variograma a estos, utilizando cualquiera de los modelos de variograma y variando para ello los parámetros que definen el modelo de variograma. Por ejemplo, el *sill*, el rango o la potencia en el caso del modelo potencia. Este ajuste generalmente se realiza buscando que el modelo pase cerca de todo los puntos del variograma experimental o siga la tendencia de estos, y el criterio ampliamente utilizado para ello es netamente visual, ya que a pesar de existir métodos que realizan este ajuste, el tiempo de cómputo que se requiere para este hace que su uso sea poco frecuente.

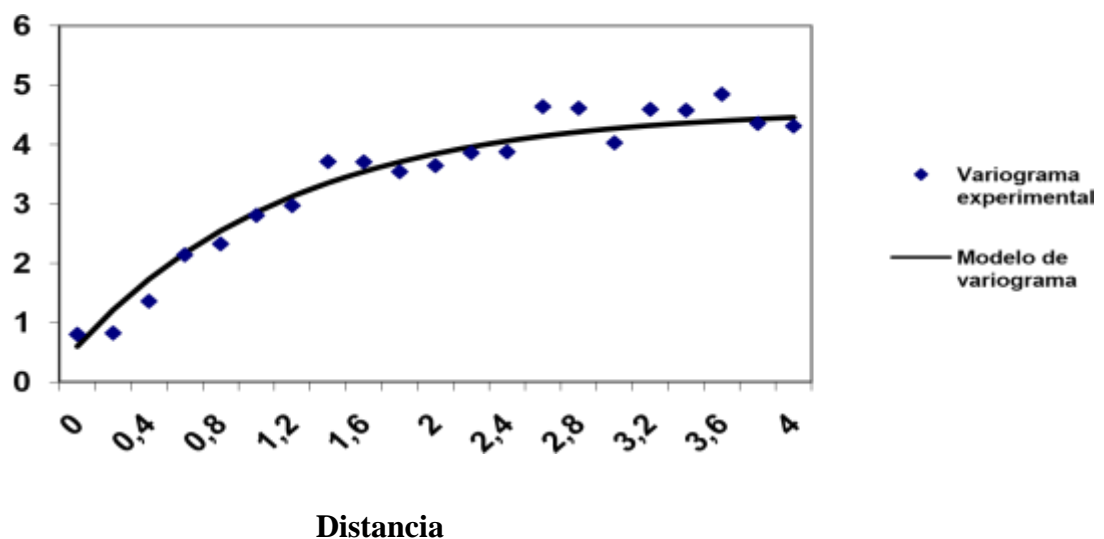


Figura 18. ajuste de variograma modelo exponencial al experimental de la figura 17. (Rojas, 2015)

Es así como se obtiene un modelo de variograma representativo de los datos o variable bajo estudio. Un ajuste del variograma experimental de la figura 17 se muestra en la figura 18.

Nótese que el modelo de variograma proporciona un valor en distancias donde el valor del variograma experimental se desconoce, lo cual, como se verá en las secciones de kriging y simulación, es fundamental para la estimación o simulación de la variable en estudio. Ahora bien, aunque podrían obtenerse valores en distancias intermedias a través de una interpolación entre los puntos del variograma experimental, los valores así obtenidos no pueden ser usados en los sistemas de kriging, por que no garantizan la existencia y unicidad de la solución. Esto sólo se consigue cuando se utilizan los valores provenientes de un modelo de variograma. Asimismo, el variograma experimental no puede ser utilizado como un variograma, ya que no satisface las propiedades de todo variograma vistas anteriormente.

Dada la importancia del variograma experimental como fuente de información para capturar el comportamiento espacial de la variable a través del modelo de variograma que se le ajusta, a continuación se indica como calcular el variograma experimental a partir de los datos que se desean estudiar. Para ello se estudian los casos siguientes:

2.3.12 Clases de distancia

Para una distancia o *lag* h , se define una tolerancia Δh , que generalmente es un porcentaje de h , y se escogen todos los puntos que se encuentran separados por una distancia mayor que $h - \Delta h$ y menor que $h + \Delta h$ del punto de referencia. Estos puntos forman la clase de distancia o *lag* h , y son los que se utilizan para calcular el valor del variograma experimental a la distancia h , y cualesquiera otros puntos son descartados. Posteriormente,

los valores del variograma experimental se obtienen en distancias que son múltiplos del *lag* h . Es decir, en distancias de la forma $2h, 3h, 4h \dots nh$ conservando la misma tolerancia Δh para definir las clases de distancia correspondientes a estas. Por ejemplo, la clase de distancia para $3h$ se encuentra formada por todos los puntos cuya distancia al punto de referencia es mayor que $3h - \Delta h$ y menor que $3h + \Delta h$.

La figura 19 muestra un ejemplo del cálculo del variograma experimental utilizando clases de distancia. Tomando como referencia el punto $z(x_1)$, se observa que ninguno de los otros puntos se encuentran a la distancia de $h, 2h$ o $3h$ de $z(x_1)$. Sin embargo, el punto $z(x_2)$ se encuentra en la clase de distancia de h , los puntos $z(x_3)$ y $z(x_4)$ pertenecen a la clase de distancia de $2h$ y el punto $z(x_5)$ a la clase de distancia de $3h$. En este caso, el valor del variograma experimental a la distancia de $2h$ se calcularía utilizando los pares formados por $z(x_1)$ y $z(x_3)$ por $z(x_1)$ y $z(x_4)$ los que se obtienen al repetir el proceso tomando como referencia los restantes puntos.

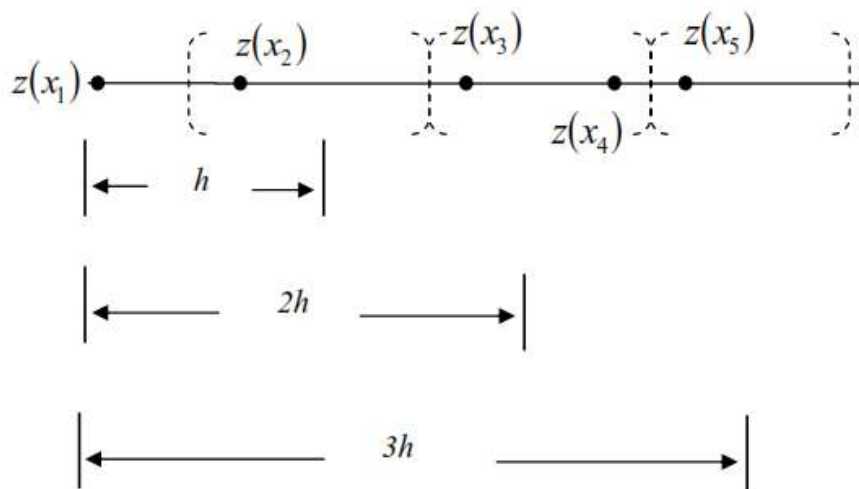


Figura 19. Ejemplo del cálculo del variograma experimental utilizando clases de distancias (Rojas, 2015)

Es usual escoger la tolerancia Δh como el 50% del valor del *lag* h , ya que de esta forma las clases de distancia no se superponen. Esto implica que no existen pares de puntos repetidos en el cálculo del variograma experimental en distancias diferentes, lo que produciría un suavizamiento del variograma experimental e incrementaría su valor en el origen, lo cual no es conveniente debido a la importancia de detectar lo mejor posible, el comportamiento en el origen de la variable o propiedad en estudio. Asimismo, esta escogencia del *lag* asegura que no hay valores de la variable o propiedad fuera de alguna clase de distancia. En cuanto al número n de *lag* a utilizar, este se escoge de manera tal que nh no exceda la mitad de la medida del dominio sobre el cual se trabaja, y en lo que respecta al valor inicial del *lag* h , en la industria petrolera un valor apropiado es la distancia promedio entre los pozos.

2.3.13 Clases de dirección

Al igual que con la distancia, puede ocurrir que no existan puntos exactamente en la dirección especificada. Entonces para una dirección θ se define una tolerancia $\Delta\theta$ y se escogen todos los puntos que se encuentran entre las direcciones $\theta - \Delta\theta$ y $\theta + \Delta\theta$. Estos puntos forman la clase de la dirección θ y son los que se utilizan para calcular el valor del variograma experimental en dicha dirección, mientras que cualesquiera otros puntos son descartados.

La figura 20 muestra en forma gráfica como se determina la clase de una dirección arbitraria θ . En esta puede observarse además que el cono formado crece a medida que se incrementa la distancia del punto destacado, lo cual puede contribuir a que la anisotropía de la variable o propiedad no sea capturada en forma adecuada. Para

evitar este inconveniente se define un valor b que se denomina ancho de banda, de forma tal que cuando la distancia entre el eje principal en la dirección θ y cualesquiera de los otros ejes en las direcciones $\theta \pm \Delta\theta$ es mayor a b , el cono se trunca para que el ancho sea constantemente igual a $2b$, como se muestra en la figura 21, y al igual que antes se escogen sólo los puntos en la región así formada.

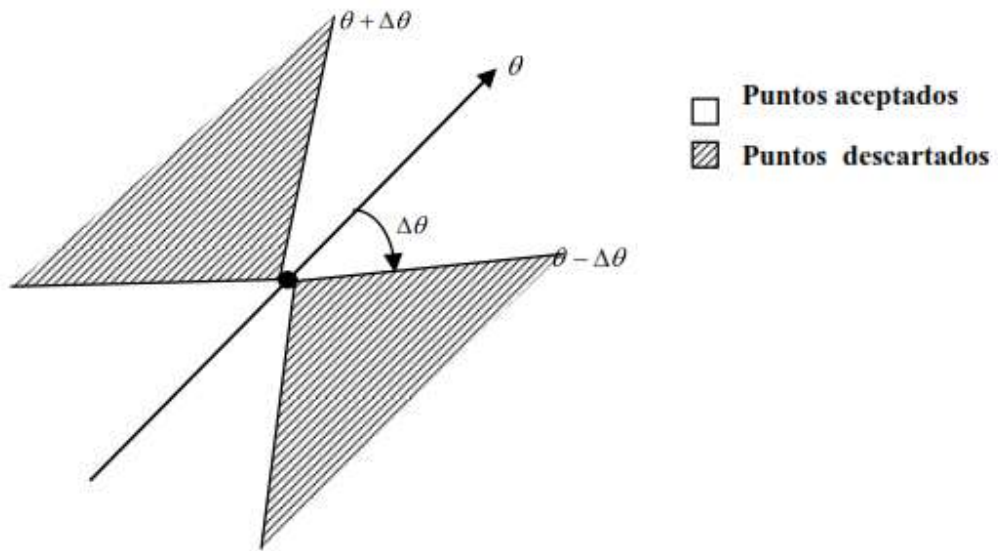


Figura 20. Forma en que se define la clase de la dirección θ . (Rojas, 2015)

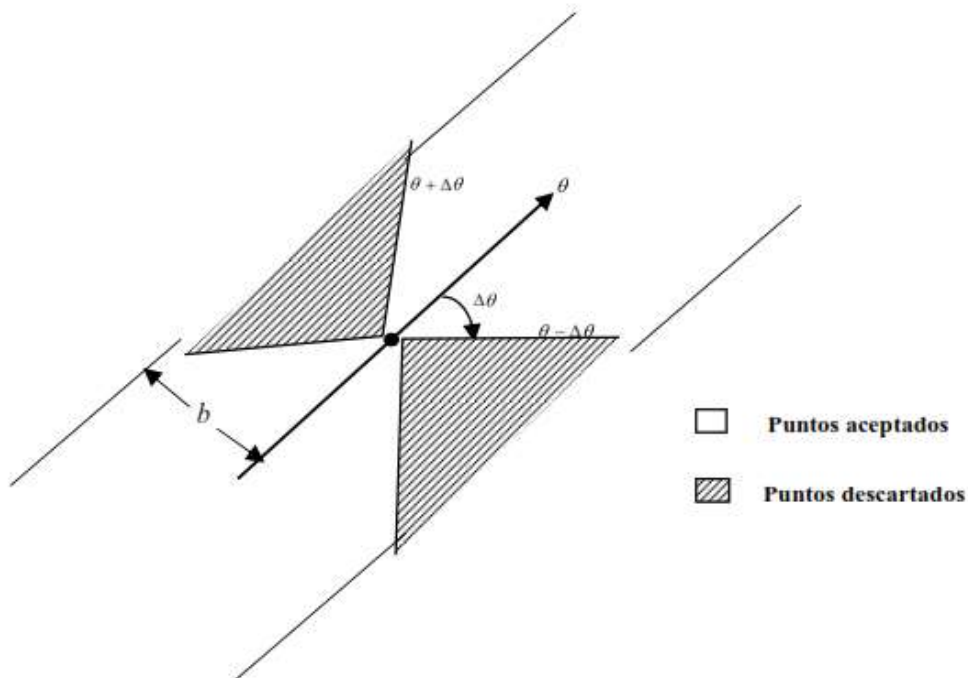


Figura 21. Clase de la dirección θ y el truncamiento considerado para detección anisotrópica. (Rojas, 2015)

El valor b del truncamiento junto con la tolerancia angular $\Delta\theta$ son parámetros fundamentales para capturar la anisotropía de la variable en estudio.

Una vez que ha sido definida la clase de dirección θ , entonces para cada punto $Z(x)$ donde ha sido observada la propiedad o variable en estudio, se escogen los puntos que están en esta y en las clases de distancia $h, 2h, 3h, \dots, nh$ para formar pares de puntos que se utilizarán para calcular los valores del variograma en la dirección θ y a distancias $h, 2h, 3h, \dots, nh$. Esto se muestra gráficamente en la figura 22.

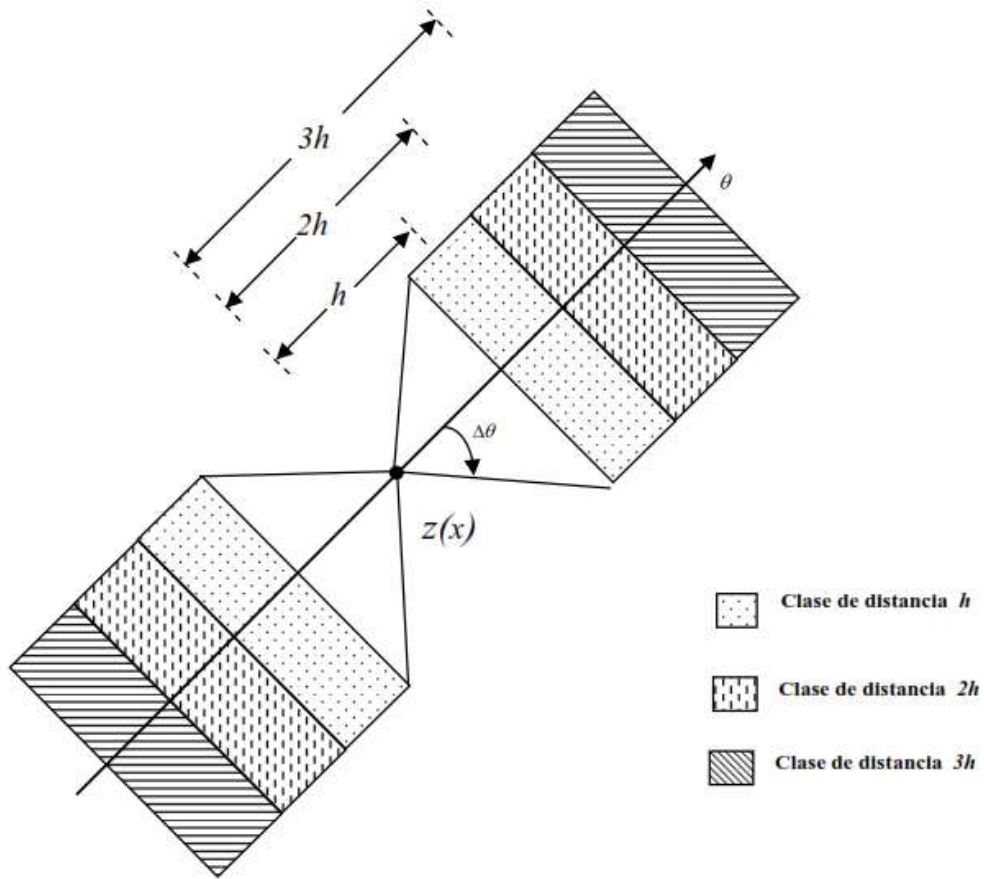


Figura 22. Clases de distancia y dirección para el cálculo del variograma experimental. (Rojas, 2015)

2.3.14 Desventaja del variograma

Entre las mayores desventajas del variograma se pueden destacar las siguientes:

2.3.14.1 Sensibilidad a valores extremos

El variograma involucra una diferencia al cuadrado entre la variable o propiedad en estudio en dos puntos distintos. Cuando esta cambia bruscamente o se

comparan valores bastante disímiles, la diferencia al cuadrado es muy grande e influye notablemente en la forma que tiene el variograma. Esto hace que la continuidad espacial buscada a través del variograma no sea detectada correctamente. Esta deficiencia suele ser reportada en la literatura indicando que el variograma experimental no es un estimador robusto del variograma. Por esta razón, se han estudiado otras medidas de variabilidad espacial que sean menos sensibles a valores extremos, las cuales se utilizan para calcular el variograma experimental y ajustar un modelo de La figura 23 muestra el ejemplo de la figura 18, considerando ahora dos valores extremos, el variograma experimental de estos valores. Nótese como se pierde la estructura observada en la figura 20.

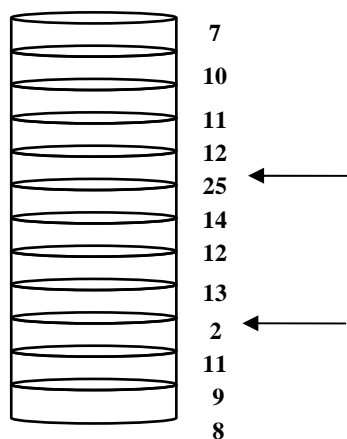


Figura 23. Valores de la figura 18, donde se cambiaron los valores indicados. (Rojas, 2015)

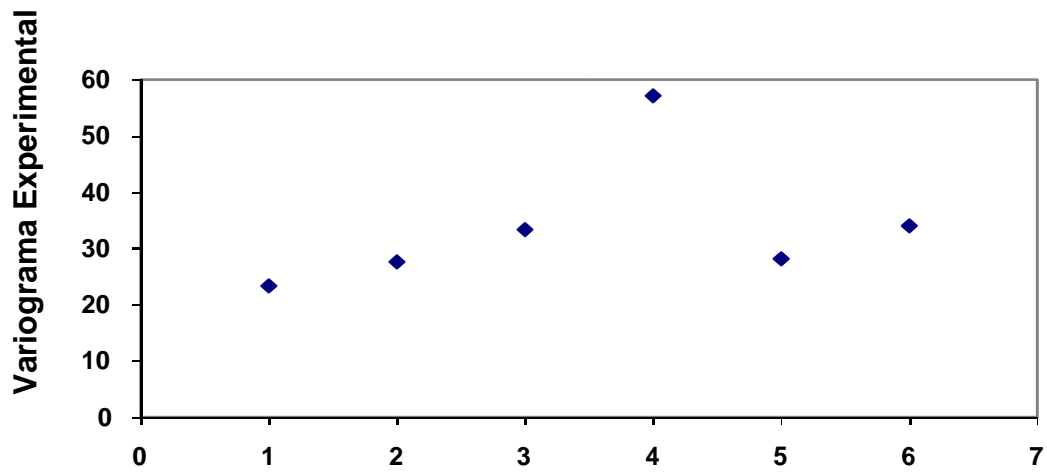


Figura 24. Variograma experimental para los datos de la figura 22. (Rojas, 2015)

El efecto de los valores indicados en la figura 24 se puede observar en el *variogram cloud* que se muestra en la figura 25.

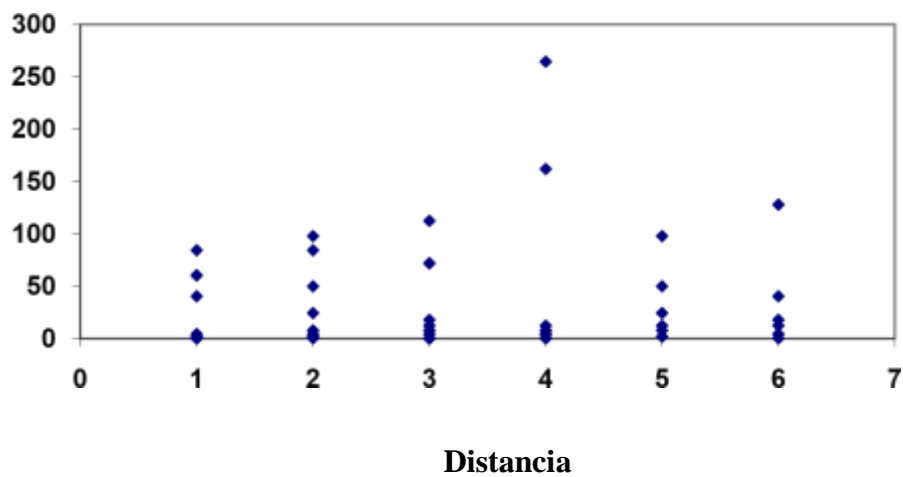


Figura 25. Variogram cloud de los valores de la figura 24 (Rojas, 2015)

2.3.14.2 Estadística de dos puntos

Con esto se quiere indicar que a través del variograma sólo se estudia la relación entre dos puntos cada vez. Esta característica no permite, por ejemplo, determinar la sinuosidad de los canales cuando se utilizan los variogramas de variables

indicadoras. Esta deficiencia ha orientado las investigaciones recientes a considerar técnicas multipuntos, donde se estudian relaciones entre más de dos puntos.

2.3.15 Kriging

El kriging es el término usado para designar al "mejor estimador lineal insesgado" de un punto y al mejor promedio lineal móvil ponderado de un bloque.

Este término surgió a mediados de 1960 para nombrar una técnica creada en Francia por Matheron a partir de los trabajos de D. G. Krige quién fue probablemente el primero que hizo uso de la correlación espacial y del mejor estimador lineal insesgado. El kriging es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal insesgado de una característica desconocida que se estudia.

2.3.15.1 Clasificación de los diferentes tipos de Kriging

Los Kriging pueden ser clasificados según la forma del estimador:

Lineales: Simple, Ordinario, Universal y Residual

No lineales: Disyuntivo, Indicador y Probabilístico.

También pueden caracterizarse según el soporte de la medición de los datos:
Puntual y en bloques.

Y a su vez se presentan también Kriging paramétrico y no paramétrico

Paramétrico: Multigaussiano, Disyuntivo y Lognormal

No paramétrico: Simple, Ordinario, Universal, Residual, Indicador y Probabilístico

2.3.16 Kriging Ordinario

El método de estimación kriging ordinario se aplica cuando se asume que el modelo a estimar es intrínseco, siendo por lo tanto el valor esperado de $Z(\mathbf{x})$ un valor constante m pero desconocido.

Para estimar el valor desconocido Z_V^* del bloque V , se deben seleccionar los valores de $Z(\mathbf{x})$ conocidos (datos muestrales) que sean vecinos dentro de la zona de influencia, y aplicar la siguiente ecuación (Armstrong, 1998: 86; Deutsch y Journel, 1998: 65):

$$Z_V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(\mathbf{x}_i)$$

Siendo:

Z_V^* : valor estimado mediante OK n : la cantidad de valores vecinos al punto central en V .

$z(\mathbf{x}_i)$: valor muestral en la posición \mathbf{x}_i

λ_i : factor de peso para el valor muestral $z(\mathbf{x}_i)$

Si se considera que m es desconocida entonces se obtiene, de la primera condición de un buen estimador, lo siguiente:

$$\begin{aligned} E[Z_V^*] &= E[Z_V] \\ E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\mathbf{x}_i)\right] &= m \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i m &= m \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Esta es una condición para los factores de ponderación en la estimación de kriging ordinario.

De forma análoga a la ecuación matricial 2.21 pero con un filtrado de la restricción anterior y de la media m desconocida, se tiene la siguiente ecuación matricial del kriging ordinario (Journel y Huijbregths, 1978: 307, Christakos, 1992: 351, Isak y Srivastava, 1989, Rondón, s.f.):

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Lambda} = \mathbf{M}$$

Que corresponde a:

$$a: \begin{bmatrix} C(\mathbf{h}_{11}) & \dots & C(\mathbf{h}_{1j}) & \dots & C(\mathbf{h}_{1n}) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{h}_{i1}) & \dots & C(\mathbf{h}_{ij}) & \dots & C(\mathbf{h}_{in}) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C(\mathbf{h}_{n1}) & \dots & C(\mathbf{h}_{nj}) & \dots & C(\mathbf{h}_{nn}) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(\mathbf{h}_{1v}) \\ \vdots \\ C(\mathbf{h}_{iv}) \\ \vdots \\ C(\mathbf{h}_{nv}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Con los semivariogramas se puede utilizar la siguiente ecuación matricial derivada de

Rondón (s.f.):

$$\begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{11}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{1j}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{1n}) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{i1}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{ij}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{in}) & 1 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{n1}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{nj}) & \dots & \gamma(\mathbf{h}_{nn}) & 1 \\ 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{h}_{1v}) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{iv}) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{h}_{nv}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Siendo el vector de solución de la ponderación:

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{M}$$

2.3.17 Criterios Geoestadísticos de Categorización

Los esquemas de clasificación de reservas basados en medidas reales de la dispersión son más confiables pues reflejan, sobretodo, la cantidad y la calidad de la información empleada para evaluar las reservas. Estos esquemas fueron denominados genéricamente clasificaciones geoestadísticas pues se basan en la varianza del kriging.

En este sentido, se recomienda la Geoestadística como procedimiento válido y confiable en la mayoría de los sistemas de clasificación, convirtiéndose en un estándar en la estimación de recursos minerales.

El código propuesto por la ONU, por ejemplo, propone el uso de la Geoestadística para clasificar los recursos pues permite de forma rápida y sin ambigüedad identificar las categorías de recursos y reservas minerales. Algunos de los principales criterios geoestadísticos que han sido empleados o propuestos para la clasificación de recursos se explican a continuación.

2.3.17.1 Varianza Kriging

El kriging permite obtener además de la estimación del valor de un bloque, una indicación de la precisión local a través de la varianza Kriging (V_k). Desde el inicio del desarrollo del Kriging la V_k ha sido empleada para determinar los intervalos de confianza de las estimaciones. Para esto es necesario asumir que esta se ajusta a un modelo normal o lognormal. Sin embargo, en la práctica es raro que los errores de estimación se distribuyan normalmente o de forma lognormal.

Como para el cálculo de la varianza kriging se emplea solamente la configuración de las muestras en el espacio y no sus valores locales, esta no debe ser interpretada como una medida de la variabilidad local. Por otra parte como V_k es calculado a partir del variograma

medio del yacimiento no es solo un índice de la disposición espacial de las muestras sino también caracteriza las varianzas medias globales permitiendo la discriminación entre las clases de recursos.

Este enfoque no es reciente y ha sido utilizado a lo largo de muchas décadas, como se puede constatar en la figura 26 que resume las categorías de la clasificación sugerida por Diehl y David (1982) y Wellmer (1983), basadas en la cuantificación del error utilizando la desviación estándar Kriging.

Autores	Probada	Probable	Posible	Inferida
Diehl & David (1982)	Erro: ± 10% Conf.: > 80%	Erro: ± 20% Conf.: > 60-80%	Erro: ± 40% Conf.: > 40-60%	Erro: ± 60% Conf.: > 20-40%
Wellmer (1983)	Erro: ± 10% Conf.: > 90%	Erro: ± 20% Conf.: > 90%	Erro: ± 30% Conf.: > 90%	Erro: ± 50% Conf.: > 90%

Figura 26. Categorización de reservas según los autores: Diehl & David y Según Wellmer

El método propuesto por Diehl y David (1982) se basa en definir niveles de confianza y de precisión (error): la precisión se expresa en función de la desviación estándar kriging y el valor estimado kriging

$$\text{Precisión} = (\sigma_k \times 100 \times Z_{1-\alpha}) / tk_i \quad (1)$$

Donde

σ_k : es la desviación estándar kriging

tk_i : Valor del bloque estimado por kriging

$Z_{1-\alpha}$: Valor de la variable estandarizada distribuida normalmente con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$

Si fijamos la precisión en 10 % (reservas probadas o recursos medidos) entonces podemos determinar la razón σ_k / tk_i que divide las reservas probadas de las probables

$$10 = (\sigma_k \times 100 \times Z_{80}) / tk_i$$

$$\sigma_k / tk_i = 10 / (100 \times 1.282) = 0.078 \quad (2)$$

Es bueno señalar que no existe consenso internacional sobre los niveles de confianza y precisión que deben tener las distintas categorías de reservas.

El segundo método para categorizar los recursos se basa en la construcción de la función de densidad de probabilidades o el histograma de las varianzas kriging (Annels, 1991). El histograma se examina para detectar evidencias de poblaciones complejas que pueden representar tres (3) poblaciones superpuestas (medidos, indicados e inferidos). Esta situación se refleja en la figura 27.

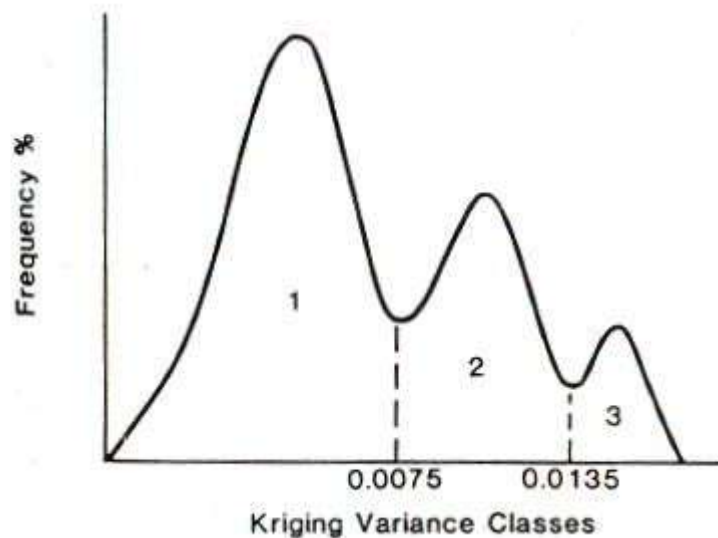


Figura 27. Histograma de las varianzas kriging (V_k) segmentado en 3 poblaciones: 1) 0-0.0075 –Recursos medidos 2) 0.0075-0.0135 –Recursos indicados 3) > 0.0135 –Recursos inferidos (Annels, 1991)

2.3.17.2 Método del Error Porcentual de la Estimación de la Media

El error porcentual de la estimación de la media, para un conjunto de n bloques estimados para un 95 % de probabilidad se puede calcular por la expresión:

$$\bar{\epsilon}_k = 200 \times \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{ki}^2}}{\sum_{i=1}^n t_{ki}} \quad (3)$$

Donde, t_{ki} y $\sigma^2 k_i$ son los valores estimados por Kriging y la varianza Kriging de cada uno de los bloques.

La utilización de este error para la clasificación de recursos y reservas fue recomendado por la ONU a las instituciones internacionales de financiamiento (Valente, 1982).

La tabla 4. Representa las 3 categorías de reservas clasificadas según el error kriging de la media para un nivel de probabilidad del 95 %.

Reserva	Error kriging de la media
Medida	< 20 %
Indicada	20 % -50 %
Inferida	>50 %

Tabla 4. Clasificación de reservas a partir de la utilización del error Kriging de la media.

También existen otros criterios y métodos que no serán abordados en este trabajo como son la simulación condicional para construir modelos de incertidumbre, la medida de eficiencia de los bloques y la desviación estándar de la interpolación entre otros.

2.3.18 Software

Probablemente la definición más formal de software es la atribuida a la IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), en su estándar 729: la suma total de los programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema de cómputo. Bajo esta definición el concepto de software va más allá de los programas de cómputo en sus distintas formas: código fuente, binario o código ejecutable, además de su documentación. Es decir, el software es todo lo intangible. Software es también conocido como programático o equipamiento lógico, esto es el conjunto de programas que puede ejecutar el hardware para la realización de las tareas de computación a las que se destina. Se trata del conjunto de instrucciones que permite la utilización del ordenador o computador (PC, personal computer). El software es la parte intangible de la computadora, es decir, programas, aplicaciones, etc.

2.3.18.1 Software Libre

El software libre es aquel que puede ser distribuido, modificado, copiado y usado; por lo tanto, debe venir acompañado del código fuente para hacer efectivas las libertades que lo caracterizan. Dentro de software libre hay, a su vez, matices que es necesario tener en cuenta. Por ejemplo, el software de dominio público significa que no está protegido por el copyright (licencias), por lo tanto, podrían generarse versiones no libres del mismo, en cambio el software libre protegido con copyleft impide a los redistribuidores incluir algún tipo de restricción a las libertades propias del software así concebido, es decir, garantiza que las modificaciones seguirán siendo software libre. También es conveniente no confundir el

software libre con el software gratuito, este no cuesta nada, hecho que no lo convierte en software libre, porque no es una cuestión de precio, sino de libertad. Para Richard Stallman el software libre es una cuestión de libertad, no de precio. Para comprender este concepto, debemos pensar en la acepción de libre como en “libertad de expresión”. En términos del citado autor el software libre se refiere a la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, cambiar y mejorar el software.

2.3.18.2 Software Propietario

El software no libre también es llamado software propietario, software privativo, software privado o software con propietario. Se refiere a cualquier programa informático en el que los usuarios tienen limitadas las posibilidades de usarlo, modificarlo o redistribuirlo (con o sin modificaciones), o que su código fuente no está disponible o el acceso a éste se encuentra restringido. En el software no libre una persona física o jurídica (por nombrar algunos: compañía, corporación, fundación) posee los derechos de autor sobre un software negando o no otorgando, al mismo tiempo, los derechos de usar el programa con cualquier propósito; de estudiar cómo funciona el programa y adaptarlo a las propias necesidades (donde el acceso al código fuente es una condición previa); de distribuir copias; o de mejorar el programa y hacer públicas las mejoras (para esto el acceso al código fuente es un requisito previo). De esta manera, un software sigue siendo no libre aún si el código fuente es hecho público, cuando se mantiene la reserva de derechos sobre el uso, modificación o distribución (por ejemplo, el programa de licencias shared source de Microsoft). No existe consenso sobre el término a utilizar para referirse al opuesto del software libre.

2.3.18.3 Software Minero

Las aplicaciones de la informática a la evaluación de recursos y reservas minerales son muchas y muy variadas. Si hubiese que establecer una primera jerarquización de los

diferentes programas existentes en el mercado con aplicación a la citada temática, creemos que su aplicación parcial o total de sus herramientas y además el precio de adquirirlos sería el mejor parámetro a considerar. Así se podría hablar de dos grupos de programas:

2.3.19 Herramientas informáticas utilizadas para el procesamiento de datos

2.3.19.1 Hojas de cálculo

Una de la más conocida y utilizada por cualquier usuario tenemos a la hoja Excel, lo cual es imprescindible, que a su vez sirve para almacenar datos. En exploración minera se almacenan los datos que se reportan de los sondeos de exploración ya perforados.

Tales como:

- a) Posición (X, Y y Z) del sondeo efectuado.
- b) Discontinuidades presentes a lo largo de cada sondeo.
- c) Potencia de dicho nivel.
- d) Ley/calidad/etc. obtenida en el nivel
- e) Otros aspectos a considerar, según el tipo de yacimiento como la litología, alteración, etc.

La hoja de cálculo, una vez establecida de esta forma, podrá ser importada, por los diferentes programas mineros, los cuales llevaran a cabo las operaciones deseadas (si, por ejemplo, se trata de un paquete de software minero realizara, entre otras cosas la cubicación del yacimiento).

2.3.19.2 Geostatistical Software Library (GSLIB)

Es una colección de programas geoestadísticos desarrollados por la Universidad de

Stanford en los últimos 15 años. El GSLIB original fue inspirado por el artículo Colección de Programas Geoestadísticos y guía del usuario por Clayton Deutsch y André Journel durante 1990.

2.3.19.2.1 Funciones principales de GSLIB

Respecto a estadística los programas de GSLIB permiten realizar un análisis clásico de los datos considerados mediante histogramas, gráficas con distribuciones estadísticas de otras muestras, gráficos QQ y PP. Cuenta con programas de utilidad como desagrupamiento de celdas, transformación de los datos, manipulación IK como relación de orden, soporte de cambios, valores de cuartiles y percentiles, estimaciones tipo *E*, Indicadores teóricos de variogramas. Sus códigos ejecutan variogramas directos o cruzados de cualquier número de variables para datos regulares o irregularmente espaciados en dominios de una, dos o tres dimensiones, al igual que diversos tipos de variogramas como tradicional, covarianza, correlograma, variogramas relativo, madograma, rodograma y variograma indicador. GSLIB ofrece la posibilidad de realizar estimaciones de diferentes propiedades para los diferentes tipos de kriging en los dominios de una, dos o tres dimensiones: kriging simple (SK), ordinario (OK), universal (UK), con deriva externa (KED), cokriging y kriging indicador.

2.3.19.3 Software minero RECMIN

Por sus siglas en español Recursos Mineros. Es un software gratuito que se puede descargar libremente de internet que ha sido desarrollado precisamente para la gestión de recursos minerales, ha sido patentado por su autor Cesar Castañón Fernández, profesor principal de Ing. De minas la Universidad de Oviedo y fundador también de la empresa RPTec (servicios y consultoría minera). Para demostrar el método pentaédrico que ha sido sustentado en su tesis doctoral.

Se fundamenta en la experiencia de su autor a lo largo de más 24 años, de experiencia en el campo de la minería.

Se creó a partir del año 1992 como software privado para las operaciones mineras en España de la empresa minera canadiense Rio Narcea Gold Mines S.A. Su autor (Dr. César Castañón Fernández) agregó las opciones de gestión de información topográfica, edición de sondajes, modelamiento geológico, modelo de bloques y estimación de leyes por el método del inverso de la distancia.

2.3.19.3.1 Ventajas y Desventajas

Ventajas

- Gratuito, libre.
- Está en idioma español,
- Contiene herramientas para:
 - Importación de muestras de sondajes, producto de campaña de exploración.
 - Herramientas para validar los datos producto de la campaña de exploración.
 - Herramientas para gestionar superficies topográficas (Importar coordenadas de puntos y generar curvas de nivel o importar superficies en formato *.DXF, que hayan sido elaboradas en otros paquetes de software minero como el CAD.
 - Herramientas para visualizar gráficamente en 3D los objetos diseñados.
 - Herramientas para integrar y realizar la interpretación geológica.
 - Herramientas para realizar un modelo geométrico, de bloques al modelo geológico.
 - Herramientas para interpolar las leyes de cada bloque, usando el algoritmo del inverso de la distancia.
 - Herramientas para exportar, datos de muestras y tablas de bloques.
 - Optimizador de PIT (cono flotante).

- Y más herramientas diversas personalizadas.

Desventajas

- No contiene herramientas geoestadísticas, para estimar por kriging un modelo de bloques

2.3.19.4 Software SGeMS

Por sus sigla en Inglés (The Stanford Geostatistical Modeling Software), es un programa informático de libre descarga, uso y aplicación que cuenta con potentes herramientas geoestadísticas, creado por Nicolás Remy de la universidad de Stanford y complementado por Alexandre Boucher y Jianbing Wu, ofrece una interfaz en 3D, contiene casi todas las herramientas de estimación por kriging, y simulación geoestadística. Su uso y aceptación ya es casi a nivel global por usuarios de minería y geología. Está en idioma español.

2.3.19.4.1 Ventajas y Desventajas

Ventajas

- Libre, gratuito, interfaz 3D. Permite introducir nuestro propio algoritmo de indicaciones de estimación (para los que entienden de programación).
- Permite realizar un estudio estadístico a las muestras, hacer un análisis de histogramas, calcular la regresión lineal, etc.

Desventajas

- No contiene herramientas para el modelamiento geológico previo a la estimación de recursos: no es posible generar un modelo de bloques restringido a un cuerpo geológico que presenta el depósito mineral. Está en idioma inglés.

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente TEG cuenta con una investigación de tipo Clardescriptiva, debido a que busca la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento de tipo espacial, además de la cuantificación de las reservas pertenecientes en el mismo.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo no experimental – transaccional, debido a que no se realiza la manipulación de variables, se observa los fenómenos en base a una base de datos obtenida de un ambiente natural para ser posteriormente analizarlos. De igual forma, estos datos previamente suministrados y recolectados, son tomados en un solo instante de tiempo, para poder describir las variables y analizar su incidencia y distribución en un momento dado.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población estudiada corresponde 4 áreas comprendidas por yacimientos auríferos en la formación El Callao, estado Bolívar. Se obtuvo una data correspondiente a 4 áreas perforadas, entre las cuales se tomó como muestra el bloque A01, una extensión superficial al Este de la extensión mineralizada, contemplada por 190 perforaciones con información de la ubicación espacial de la perforación, la profundidad, orientación de los sondeos, su litología y consecuente a esto la concentración de oro presente en estos puntos.

3.4 TÉCNICAS Y MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

Los métodos y técnicas para la puesta en marcha de las actividades son principalmente los análisis del proceso geoestadístico asistido por una herramienta informática llamada SGEMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) , desarrollada por la Universidad de Stanford, como un Software de modelamiento geoestadístico, la cual permite el filtrado de la base de datos permitiendo una visión espacial más clara, y además admite los estudio de histogramas, variogramas y diversos cálculos que permitieron estimar por medio del diseño de un Kriging el comportamiento espacial de la variable tenor. Además, se incorporo la herramienta informática RecMin (Recursos Mineros) para la caracterización geológica de los cuerpos minerales encontrados en el área de estudio, seguido de una hoja de cálculo para categorizar y posteriormente mediante RecMin, cuantificar los recursos presentes en los cuerpos minerales según su categoría y litología.

3.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS E INTERPRETACIÓN.

Se entiende que para realizar una estimación y categorización de recursos, muchos especialistas optan por utilizar la Geoestadística, por las ventajas evidentes que exponen dichos métodos con respecto a los métodos clásicos para cuantificar recursos. Para la puesta en marcha de los estudios pertinentes se necesita una interacción de diversas herramientas informáticas por separadas en cada una de las etapas del desarrollo de los objetivos planteados, aprovechando sus ventajas y bondades.

En primer lugar se necesita de una validación y ordenamiento de la base de dato suministrada para posteriormente ser cargadas a las diversas herramientas informáticas para

el análisis y simulaciones pertinentes. Cada uno de los programas posee piezas claves para alcanzar cada uno de las tareas en la etapa de análisis geoestadístico.

RecMin cuenta con los módulos necesarios para la visualización de los sondeos, la superficie topográfica, la caracterización geológica de los cuerpos minerales correspondientes al volumen de la zona de estudio, la definición de un modelo de bloques con dimensiones acordes a la separación entre sondeos y un generador de reportes para obtener un resultado final de los tonelajes de roca y la concentración del mineral en cada una de las categorías de recursos, pero admite exclusivamente el método de estimación del inverso de la distancia; A su vez el programa SGeMS cuenta con potentes herramientas que permitieron los análisis de estadística descriptiva, el análisis de variogramas principales, secundarios y verticales, el módulo para realizar el ajuste a un modelo matemático (exponencial o gauseano del mineral en estudio) de cada variograma experimental y la estimación por medio de diversos tipos de Kriging (en el caso de esta investigación correspondió a Kriging Ordinario) de cada uno de los cuerpos minerales previamente definidos, aunque no puede generar un mapa de variogramas para determinar la dirección principal de mayor continuidad espacial de manera visual. Para ello se cuenta con el software libre Gslib (Geostatistical Software Library), el cual facilitó las tareas para realizar un mapeo de variogramas y siendo visualizado en 2 planos para cada cuerpo mineral correspondiente al bloque A01, permitiendo determinar las direcciones preferenciales para realizar los variogramas.

De forma que esta interacción entre los software principales se ve reflejada por el siguiente esquema ilustrativo del proceso metodológico utilizado, dividido en 5 etapas fundamentales (véase figura 28), en las cuales se llevó a cabo la caracterización geológica, el estudio geoestadístico y posterior categorización y cuantificación de los recursos minerales de interés en el bloque previamente definido.



Figura 28. Esquema de las etapas de la investigación y herramientas informáticas utilizadas

3.6 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación se describen las etapas correspondientes a la investigación:

3.6.1 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

Para la puesta en marcha de la investigación fue de vital relevancia la adecuación de la base de datos, mediante la herramienta informática de hoja de cálculo a través de EXCEL, se procedió a ordenar y darle el formato necesario para ser admitidos como archivos de ingreso para cada uno de los softwares a utilizar. Para ser admitidos por RecMin, una vez seleccionadas las variables de interés, se preparan cuatro archivos de texto llamados collar, desviaciones, litología y muestras (figura 29), delimitados por tabulador, los cuales contienen información de ubicación espacial, inclinación y orientación de los sondeos, profundidad, litología, concentración de mineral, entre otros parámetros necesarios para ser representados como datos de sondeos por dicha herramienta informática.

COLLAR	15/02/2018 12:25	Documento de texto
DESVIACIONES	15/02/2018 12:25	Documento de texto
LITOLOGIA	15/02/2018 12:25	Documento de texto
MUESTRAS	15/02/2018 12:26	Documento de texto

Figura 29. Archivos para la carga de sondeos

Fue pertinente para la interpretación geológica de los cuerpos minerales importar la topografía de la zona, para ello, al no contarse con información proveniente de la empresa se procedió a utilizar una herramienta de dominio público (Google Maps) para buscar la zona de estudio con las coordenadas pertenecientes a la zona explorada y cargada en un formato universal a RecMin, a su vez fue suministrada la superficie correspondiente a los cuerpos mineralizados, dicha información fue de vital importancia para caracterizar geológicamente cada uno de los cuerpos minerales contemplados en el bloque A01.

Se procedió a cargar los sondeos por medio de los archivos de texto: COLLAR, DESVIACIONES, LITOLOGIA y MUESTRAS, previamente preparados para ser admitidos por el software RecMin, además de la superficie que contempla los cuerpos mineralizados; gracias a estos se logra definir un modelo geológico por medio de secciones equidistantes en el plano XZ o plano frontal y uniéndolas mediante la herramienta de triangulación para darle un efecto de sólido, comprendiendo un total de 9 cuerpos minerales vetiformes definiendo la morfología del yacimiento como un yacimiento de tipo vetiforme, característico de la zona. A su vez, también se realizó una caracterización litológica a partir de los datos provenientes de los sondeos, definiendo las zonas de contacto y las litologías presentes en el bloque de vetas a estudiar.

Una vez finalizado el modelo geológico se procedió a definir una base de datos de bloques que comprenda cada una de las vetillas delimitadas por el sólido generado de cada una de ellas y la topografía, con características bien definidas de las dimensiones de cada uno de los bloques, conteniendo además la información que se utilizó para la evaluación como litología, la densidad de cada tipo de roca y una variable extra llamada categorización para definir posteriormente el tipo de recurso a evaluar en cada uno de los 9 cuerpos minerales previamente identificados.

3.6.2 ESTADISTICA DESCRIPTIVA

Para la realización de esta etapa se extrajeron los datos espaciales de los puntos dentro de cada uno de los cuerpos minerales, en el caso de Gslib y SGeMS los datos deben ser ordenados con un formato de archivo de texto como se observa en la figura 30. En donde se aprecia en la primera fila el nombre de la base de datos, en la segunda fila el número de variables que contiene la base de datos, a continuación el nombre de las variables y posteriormente las variables antes mencionadas ordenadas en forma de columnas, delimitadas por tabulación, una por cada variable antes mencionada, en este caso se cuentan con 5 variables, las que corresponden a la ubicación espacial (posición en X, posición en Y y posición en Z), la concentración de oro en cada uno de esos puntos (tenor) y el cuerpo mineral en el cual encontramos los datos (cuerpo).

```

Perforaciones
5
Posicion X
Posicion Y
Posicion Z
Tenor
Cuerpo
xxxxxx.6485      xxxxxx.5265      88.35006125      0.76700002      1
xxxxxx.6211      xxxxxx.0042      87.7725437       0.067000002     1
xxxxxx.602       xxxxxx.3387      87.36836998      0.666999996     1
xxxxxx.5746      xxxxxx.8168      86.79110882      0.432999998     1
xxxxx2.5381      xxxxxx.4544      86.02166179      0.367000014     1

```

Figura 30. Formato de entrada de datos para Sgems y Gslib

Posteriormente de ser cargada la base de datos correspondiente se obtiene una vista previa de la distribución espacial de las perforaciones gracias al visor 3D de SGeMS como se observa en la figura 31.

Utilizando los módulos del programa se realizó estudio descriptivo de los datos de sondeo, visualizando los histogramas y gráficos de probabilidad acumulada teniendo en cuenta como variable única la concentración de oro presente en cada uno de los puntos cargados, observando las distribuciones de los valores correspondientes a los tenores

presentes, siendo necesario definir un valor umbral o *capping* para los valores correspondientes al 99% de los datos contemplados en cada cuerpo mineral, estableciendo este valor como el percentil 99 de la población total de muestras contempladas en cada cuerpo mineral mediante una hoja de cálculo para tener mayor precisión, además de ello se obtuvo por medio de SGeMS los valores de varianza, media, concentración máxima, concentración mínima y mediana, de igual manera fueron determinados por medio de una hoja de cálculo el coeficiente de variación, la curtosis y el coeficiente de asimetría para completar las características básicas que posee una descripción de estadística descriptiva de una base de datos de este tipo.

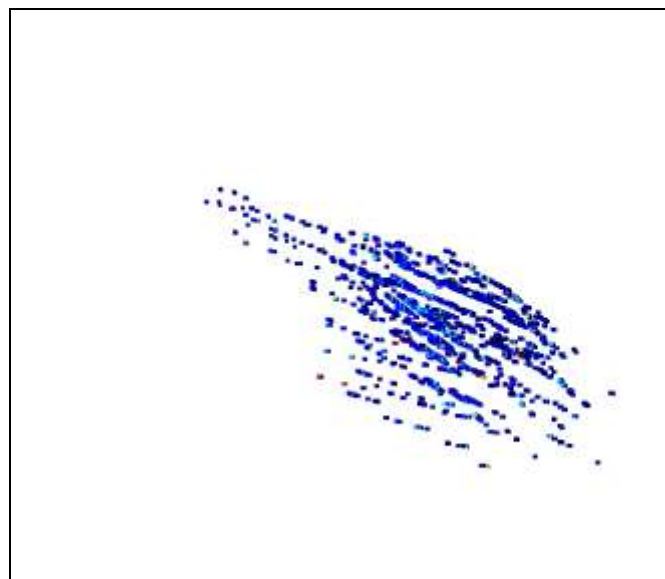


Figura 31. Vista en el visor 3D de SGeMS de los puntos correspondientes a las vetas.

III ESTUDIO VARIOGRAFICO

Para la realización del estudio variográfico es preciso utilizar el programa Gslib, para ello se debe asignar un archivo que contenga la base de datos, en este caso debe ser un archivo que posea las características antes mencionadas con la excepción de que debe poseer una extensión de archivo .DAT, el acceso a los programas de Gslib debe realizarse por medio

de la consola de símbolo de sistemas, como se observa en la figura 32, para realizar el mapa de variogramas se utilizan los ejecutables “varmap.exe” y “pixelplt.exe”, los cuales crean .

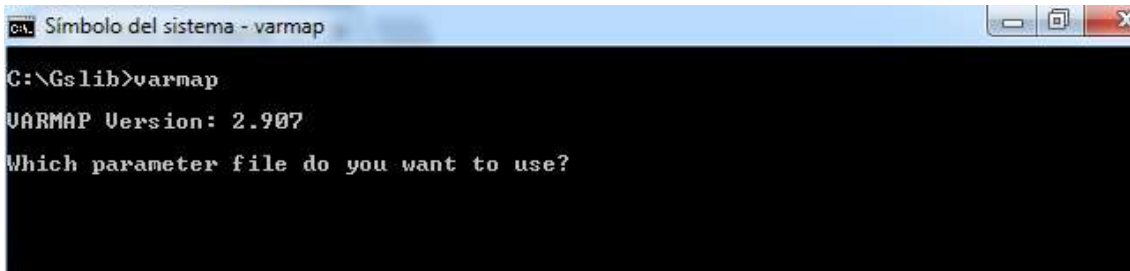


Figura 32. Consola de símbolo de sistemas a punto de ejecutar el programa “varmap.exe”

Cada uno de estos programas demanda archivos de parámetros, los cuales contienen la configuración que brinda los lineamientos de los programas, se debe suministrar, para el caso de “varmap.exe”, la información del archivo del cual leerá la base de datos, del número de variables, si son datos ordenados en una superficie regular o se trata de datos dispersos, la dimensión de los saltos en cada dirección espacial, el número de saltos para cada una de ellas y el tipo de variogramas que se realizará, el cual en este caso se trata de semivariogramas tradicionales como se observa en la figura 33.

```

Parameters for VARMAP
*****

START OF PARAMETERS:
../data/cluster.dat      -file with data
1 3                      - number of variables: column
numbers
-1.0e21 1.0e21          - trimming limits
0                        -1=regular grid, 0=scattered values
50 50 1                 -if =1: nx, ny, nz
1.0 1.0 1.0             - xsiz, ysiz, zsiz
1 2 0                   -if =0: columns for x,y, z
coordinates
varmap.out              -file for variogram output
10 10 0                 -nxlag, nylag, nzlag
5.0 5.0 1.0            -dxlag, dylag, dzlag
5                        -minimum number of pairs
1                        -standardize sill? (0=no, 1=yes)
1                        -number of variograms
1 1 1                   -tail, head, variogram type

1 = traditional semivariogram
2 = traditional cross semivariogram
3 = covariance
4 = correlogram
5 = general relative semivariogram
6 = pairwise relative semivariogram
7 = semivariogram of logarithms
8 = semimadogram

```

Figura 33. Archivo de parámetros para “varmap.exe”

De igual manera se ejecuta el programa “pixelplt.exe”, el cual cumple la función de graficar la base de datos generada por el programa “varmap.exe” como una representación de píxeles, los cuales facilitan la apreciación de las direcciones de interés. El programa “pixelplt.exe” demanda como parámetros básicos la orientación del variograma, que para este caso de estudio se requieren 2 direcciones como mínimo para definir la dirección de mayor anisotropía o mayor continuidad espacial, el número de slice en el cual se visualiza el corte del mapa, tomando el slice central de ambas direcciones (XY y XZ), las dimensiones de los píxeles y el incremento de la escala apreciando el mapa de variogramas.

Por medio de la apreciación visual se determina una orientación o azimut (en el plano XY) y un buzamiento o dip (en el plano XZ) los cuales permiten determinar la dirección principal de anisotropía, es imperante determinar 3 direcciones, la dirección principal, secundaria y vertical, se define la dirección principal como la dirección de mayor continuidad espacial a partir del origen (respecto al mapa variográfico), perpendicular a esta dirección se obtiene la dirección secundaria y por último se observa en el plano frontal el buzamiento que coincide con la dirección vertical de mayor anisotropía para definir la tercera y última dirección, la dirección vertical.

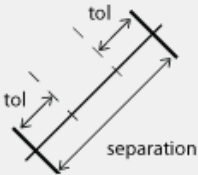
Una vez con las coordenadas principal, secundaria y vertical antes mencionadas se procede a utilizar el programa SGeMS, realizando 3 variogramas experimentales como se aprecia en la figura 34, uno para cada dirección, determinando el modelo de mejor ajuste a dicha estructura espacial, el aporte del modelo, el efecto pepita o nugget y el rango máximo medio y mínimo del modelo de variograma.

Lags

Number of lags

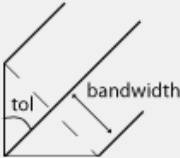
Lag separation

Lag tolerance



Directions

Number of directions



*Angles are in degrees.
Use a tolerance tol > 90 to indicate an omni-direction.*

	azimuth	dip	tolerance	bandwidth	measure type	head indic. cutoff	tail indic. cutoff
1	xx	xx	xx	xx	variogram		
2	xx	xx	xx	xx	variogram		
3	xx	xx	xx	xx	variogram		

Figura 34. Creación de los variogramas experimentales por medio de SGeMS.

IV ESTIMACIÓN

Luego de asignar todas las propiedades necesarias para el modelo de bloques para cada cuerpo mineral, son exportados a SGeMS para realizar la estimación mediante el método geoestadístico de Kriging Ordinario, en el cual se realizó la estimación por medio de kriging de bloques discretizando las variables espaciales generando subbloques, utilizando el valor máximo, medio y mínimo para definir los parámetros del elipsoide de búsqueda y cargando el modelo de los variogramas experimentales antes definidos para cada uno de los cuerpos minerales por separado. Al ejecutar los algoritmos del kriging se generaron 2

resultados relevantes para esta investigación, el primero de ellos la base de datos de los valores estimados bloque por bloque y en segundo lugar la varianza de cada uno de los bloques estimados, los cuales fueron adecuados en un archivo de texto que contenga lo antes mencionado adjunto a la ubicación espacial de cada uno de dichos bloques.

V CATEGORIZACION Y CUANTIFICACIÓN

Para realizar una cuantificación de los recursos es necesario categorizarlos, para ello se utiliza la información proveniente de las bases de datos de los bloques estimados y la varianza en cada uno de ellos, con la ayuda de una hoja de cálculo se clasifican los recursos según cada criterio expuesto con anterioridad, la base de datos de valores estimados es importada por RecMin, actualizando los valores anteriores de los modelos de bloques, con un atributo extra que se denomina “categoría” en el cual se denota el tipo de recurso estimado en cada uno de los cuerpos mineralizados previamente definidos.

Para finalizar se realiza el reporte tanto para la totalidad de los bloques estimados como para los bloques que se encuentren por encima de una ley de corte de 0,5 g/ton, dicho reporte cuenta con la información en peso de cuanto mineral se tiene en cada una de las categorías y el tenor promedio entre todos los bloques que cumplen con dichas restricciones, generando una tabla final con una estimación y categorización de recursos según el criterio implementado.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOLOGICA

4.1.1 Generalidades de la campaña de sondeos del Bloque A01

Se define como Bloque A01 a un grupo comprendido por 190 sondeos, con separaciones variables, en un principio se contaba con un espaciamiento en una malla de 50x50 metros y luego dicha malla fue cerrada con una configuración similar pero con un espaciamiento de 25x25 metros entre cada sondeo, con una totalidad de 32476 metros perforados en un área comprendida por aproximadamente 385.000 m² (véase figura 35 y 36). La información de los sondeos fue suministrada en una hoja de cálculos, bajo la condición de un acuerdo de confidencialidad entre la fuente y el departamento de minas de la facultad de ingeniería, por ello no se muestra la información de la ubicación de la campaña de sondeos correspondientes al Bloque A01.

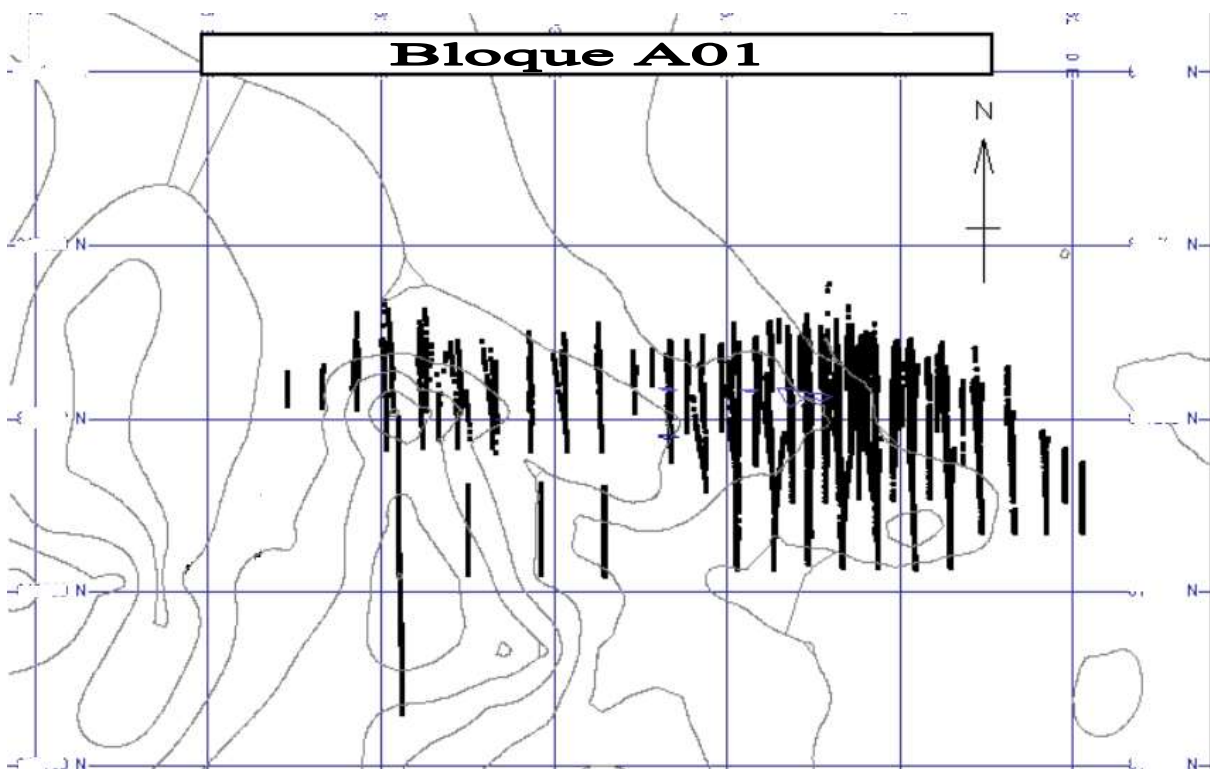


Figura 35. Mapa vista de planta de los sondeos pertenecientes al Bloque A01 generado a través de Datamine.

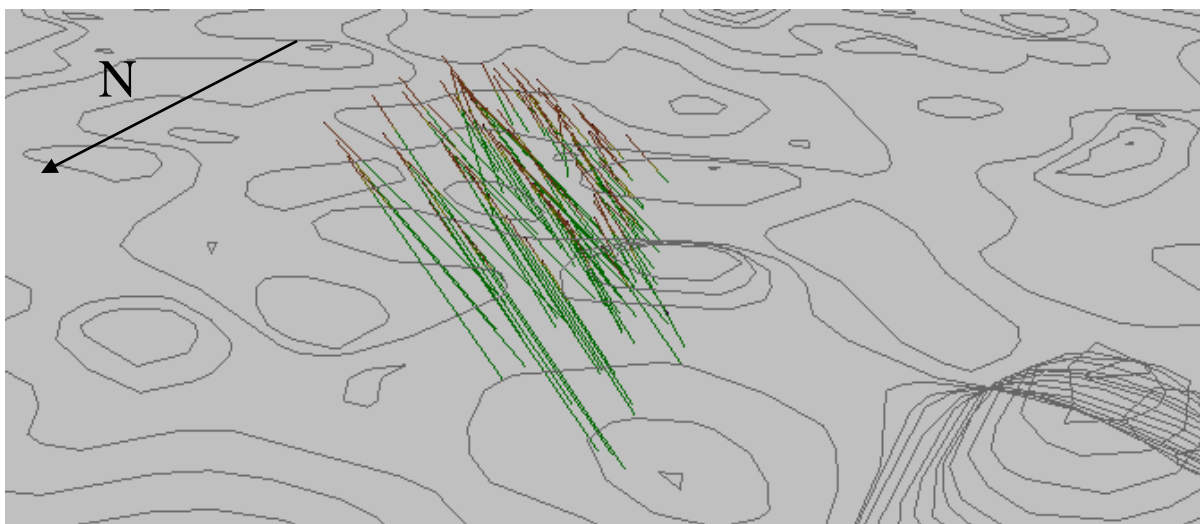


Figura 36. Vista en 3D de los sondeos pertenecientes al Bloque A01 generado a través de RecMin.

La topografía fue obtenida a través de GOOGLE MAPS y luego cargada a RecMin, observando las isolíneas de nivel a través del visor 3D de dicha herramienta informática como se observa en la figura 36.

4.1.2 Definición de los cuerpos minerales presentes

Para la definición de los cuerpos minerales se precisó del uso de RecMin como herramienta fundamental de visualización y modelaje, para ello se cargaron los archivos COLLAR, DESVIACIONES, LITOLOGIA y MUESTRAS (figura 37) previamente preparados para ser admitidos por el software.

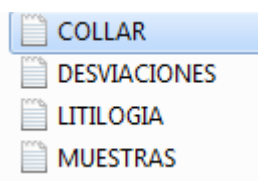


Figura 37. Archivos de entrada de sondeos para RecMin

Posteriormente, los sondeos son visualizados observando la diferencia litológica presente entre los datos de sondeos (ver figura 38), en las cuales se observa 3 cuerpos litológicos, definiendo la geología local de la zona de estudio, el primero corresponde a un

saprolito (OX) con una densidad de 1,7 Kg/m³, luego zona de transición (TR) entre el saprolito y la roca fresca con densidad de 2 Kg/m³ y por ultimo una roca fresca para efectos de la leyenda (FR) representada por una andesita con una densidad de 2,7 Kg/m³.

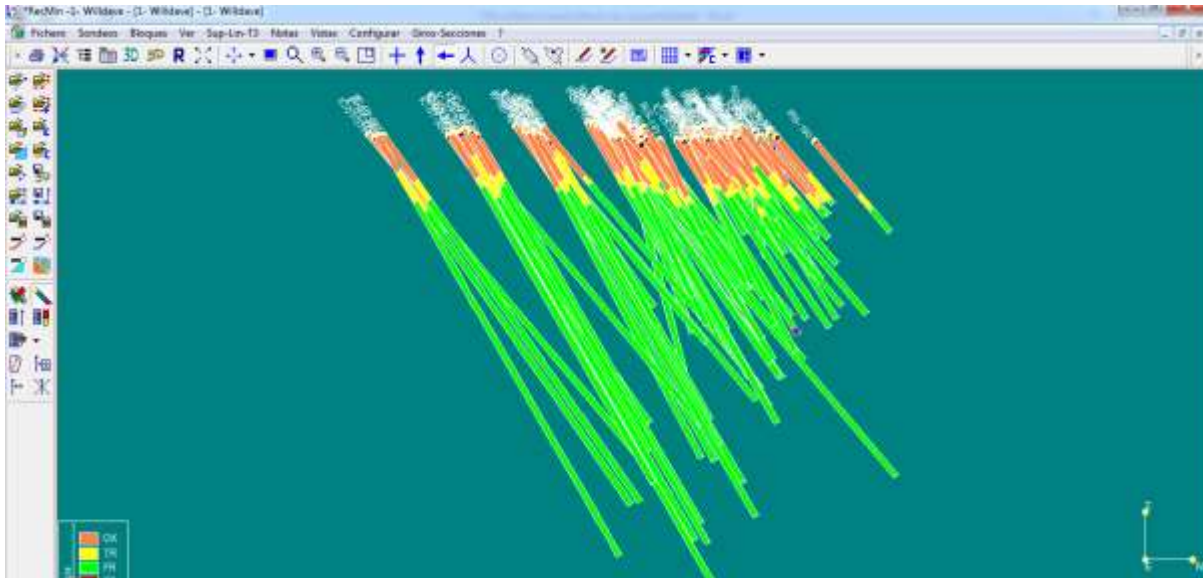


Figura 38. Vista lateral de los sondeos pertenecientes al Bloque A01, categorizados según su litología

Es pertinente la caracterización completa de los cuerpos minerales presentes en el Bloque A01, para ellos se realizan las definiciones de los 3 grupos litológicos en superficies cerradas que contengan dicha propiedad, como se observa en la figura 39.

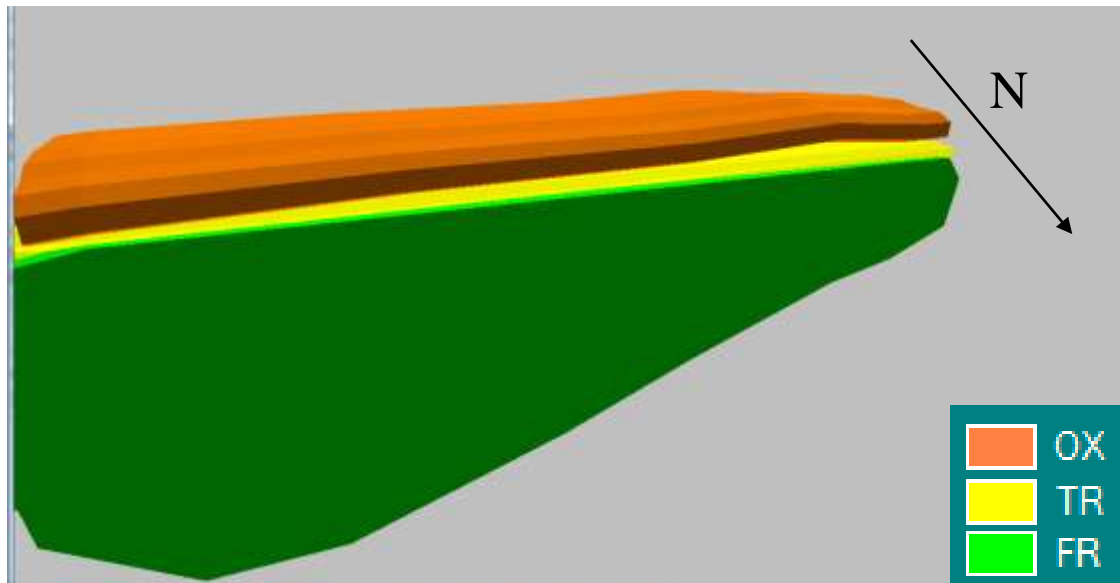


Figura 39. Superficies cerradas para cada grupo litológico presente en el Bloque A01

4.1.3 Modelamiento de bloques correspondientes a los cuerpos mineralizados

El modelo de bloques correspondiente a las estructuras mineralizadas es importado a RecMin, para obtener información más precisa de la morfología de los cuerpos minerales presentes, como se puede visualizar en la figura 40.

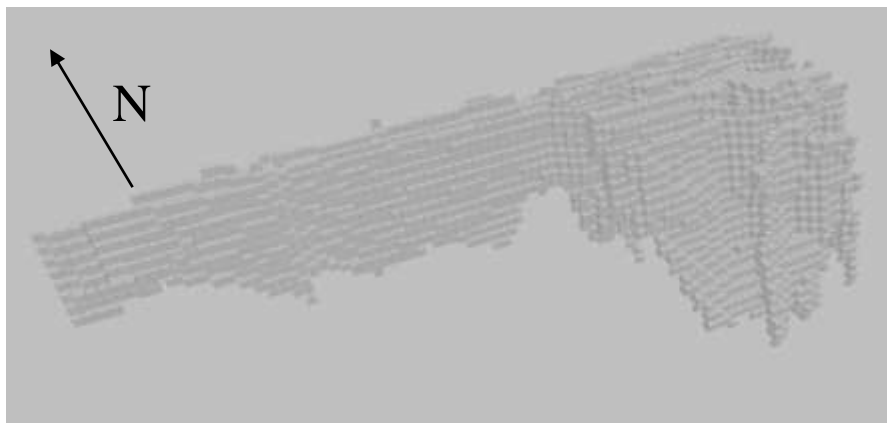


Figura 40. Modelo de bloques correspondiente a los cuerpos mineralizados.

Encontrando la presencia de 9 cuerpos mineralizados vetiformes los cuales están definidos por bloques de 10 metros en la coordenada X, 5 metros en la coordenada Y y 10 metros en la coordenada Z. Estos cuerpos mineralizados se identificaron con la letra “V” y

los números del “1” al “9”, a los cuales además de esto se les asigno la litología presente en cada uno de ellos, además de la densidad del material presente y el peso de cada bloque, así definiendo por completo el modelo geológico de bloques, como se observa en la figura 41.

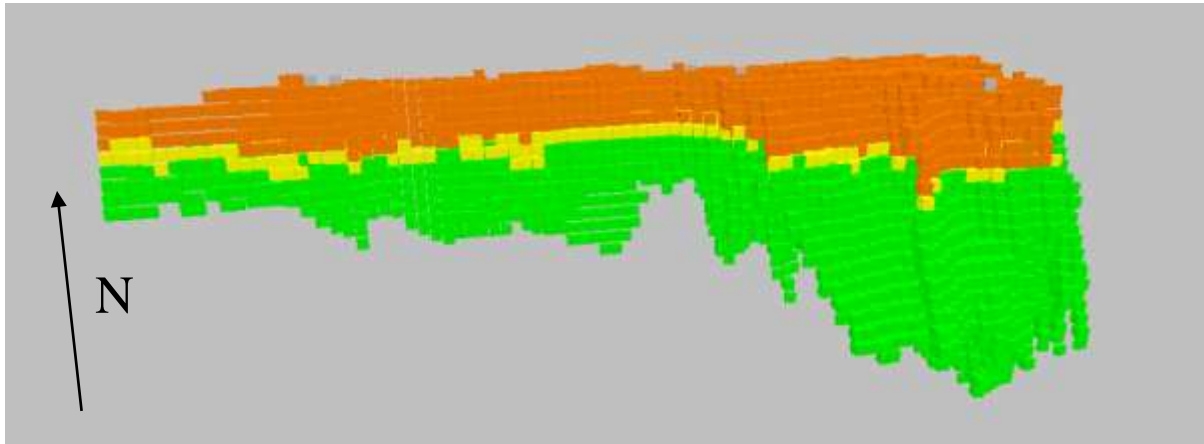


Figura 41. Modelo geológico de bloques correspondiente a los cuerpos mineralizados.

4.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

4.2.1 Histogramas y curvas de probabilidad acumulada

Para los cuerpos minerales previamente identificados es pertinente realizar una descripción por medio de histogramas y curvas de probabilidad acumulada para la identificar las características que puedan afectar de manera negativa el estudio variográfico. Para ello se utiliza el Software SGeMS, realizando un estudio para los datos de los sondeos presentes en cada cuerpo mineral, es decir la intersección de los sondeos con el modelo geológico de bloques de cada cuerpo mineralizado presente, como se observa en la figura 42. En donde se aprecia la intersección de los datos de sondeos con el cuerpo mineralizado V4.

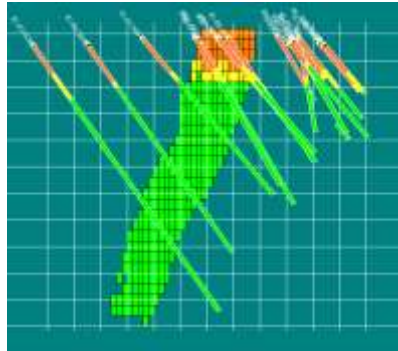


Figura 42. Vista de perfil de la intersección del cuerpo mineralizado V4 con sondeos.

4.2.1.1 Importación de datos a SGeMS

El estudio descriptivo se realiza en base a los cuerpos minerales presentes y no de la totalidad de los sondeos, para ello se exporta exclusivamente los datos presentes dentro de la intersección antes mostrada en la figura 42, siendo ordenados y presentados en un formato de texto separados por tabulador y un encabezado reconocible por esta potente herramienta informática como se observa en la figura 43.

Posicion Y	Posicion Z	Tenor	Cuerpo	
xxxxx7.423	xxxxx6.6764	133.2225075	0.519999981	6
xxxxx7.423	xxxxx7.31	132.4489259	0.280000001	6
xxxxx7.423	xxxxx7.9434	131.6752004	0.067000002	6
xxxxx7.423	xxxxx8.5767	130.9013311	0.067000002	6

Figura 43. Datos de entrada del cuerpo mineral para SGeMS

4.2.1.2 Histogramas para datos de cada cuerpo mineral

Los histogramas fueron generados para cada cuerpo mineralizado, combinados a su vez con los gráficos de probabilidad acumulada de los datos presentes en cada cuerpo mineral, como se presenta a continuación:

Histograma para el cuerpo mineralizado V1

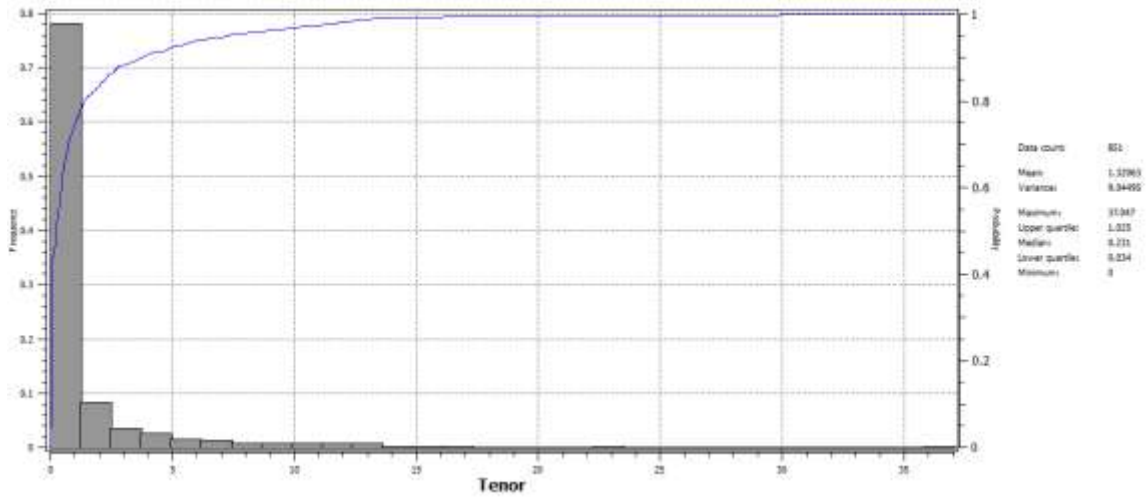


Figura 44. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V1

Histograma para el cuerpo mineralizado V2

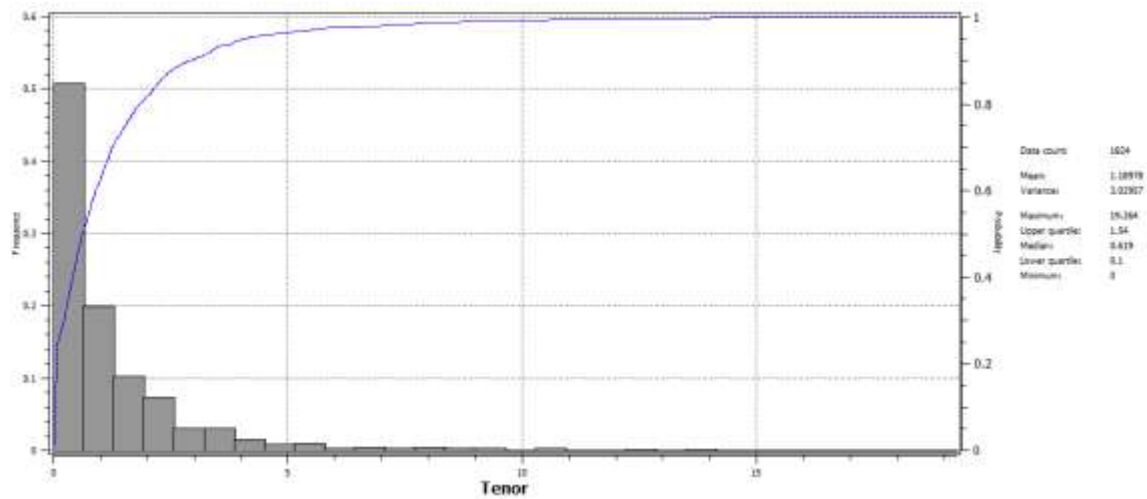


Figura 45. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V2

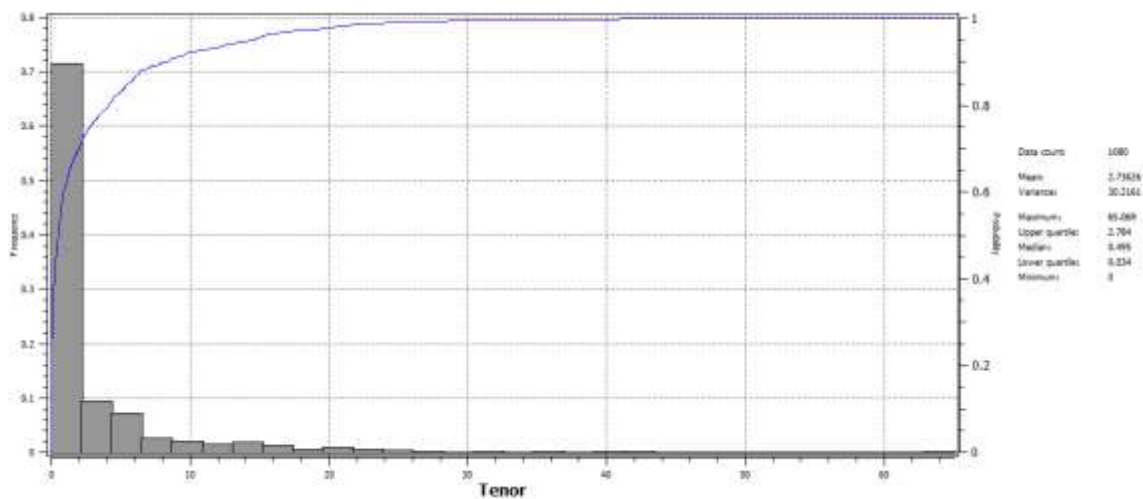


Figura 46. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V3

Histograma para el cuerpo mineralizado V4

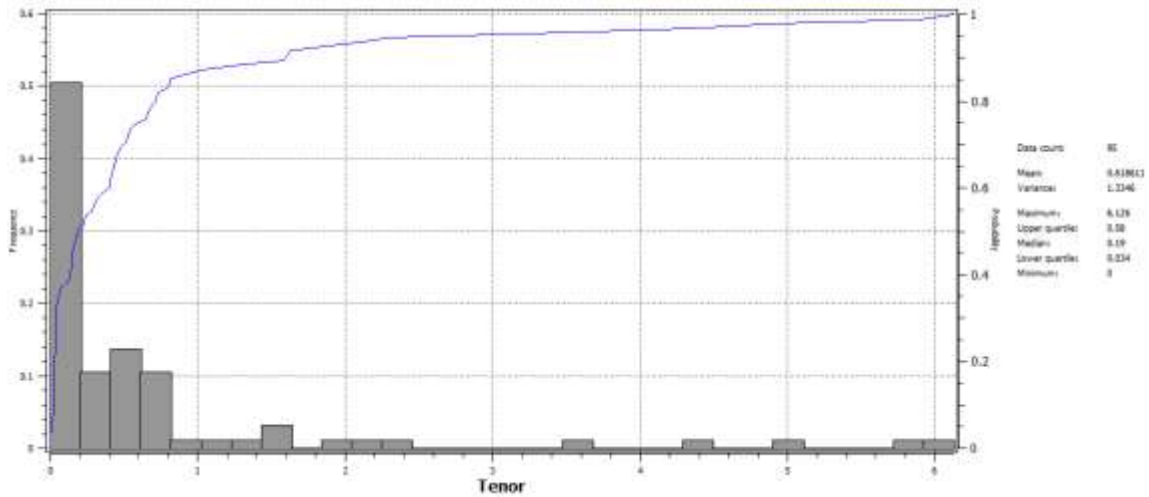
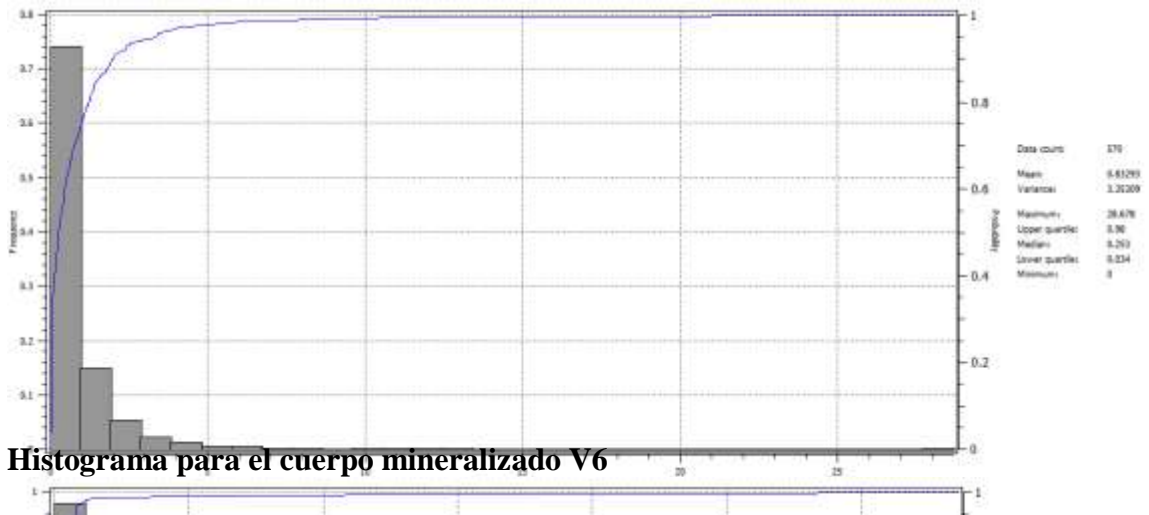


Figura 47. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V4

Histograma para el cuerpo mineralizado V5



Histograma para el cuerpo mineralizado V6

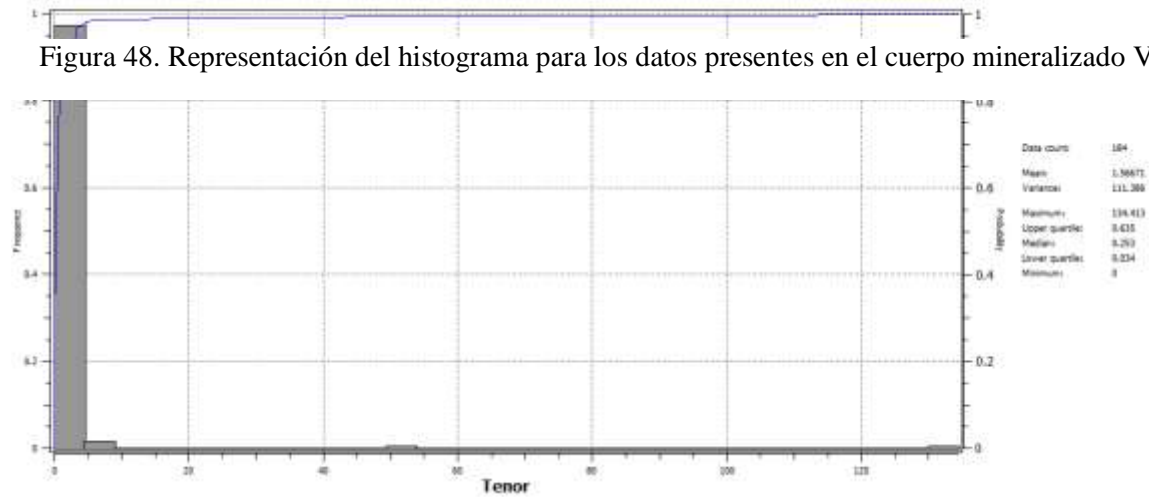


Figura 49. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V6

Histograma para el cuerpo mineralizado V7

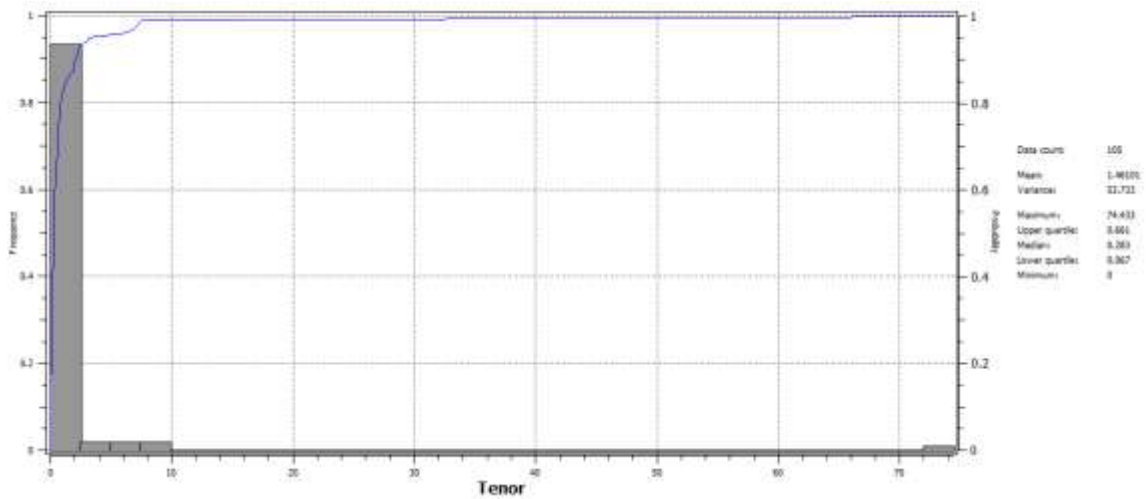
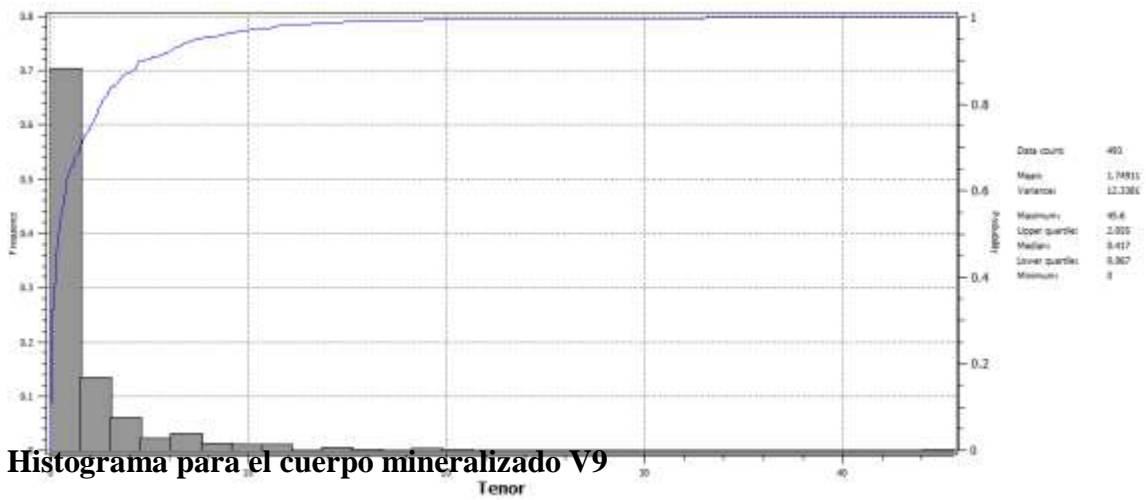


Figura 50. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V7

Histograma para el cuerpo mineralizado V8



Histograma para el cuerpo mineralizado V9

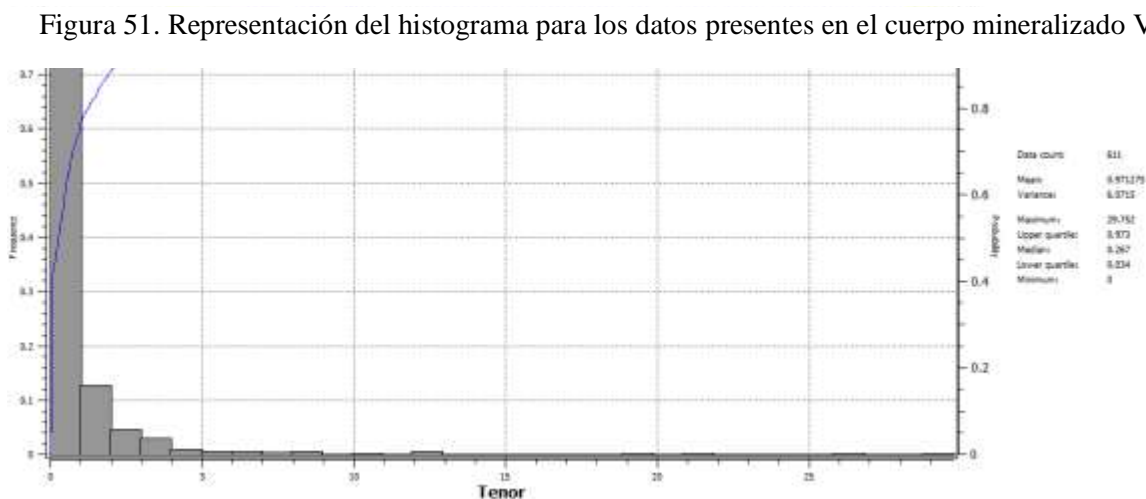


Figura 52. Representación del histograma para los datos presentes en el cuerpo mineralizado V9

Para los casos anteriores se observan histogramas con un comportamiento en su totalidad sesgado hacia los valores de bajo valor de tenor, como es característico en yacimientos auríferos, debido a que es conocido que los valores de concentración son muy bajos, además de ello se observan valores extraordinarios de concentración aurífera, lo cual es reflejado en las curvas de probabilidad acumulada, alcanzando estas el 100% justamente en dichos valores extremos, siendo evidentemente reflejados debido a que son valores que alteran la curva de probabilidad acumulada pero con una frecuencia que tiende a ser casi imperceptible en los histogramas.

4.2.1.3 Valores umbrales para cada cuerpo mineral

Es importante recordar que el estudio geoestadístico es sensible ante los cambios bruscos producidos por valores extremos en una población de datos, para mitigar las alteraciones que pudieran producirse por los valores extremos presentes en la base de datos es necesario establecer un valor umbral o capping para los datos presentes en cada uno de los cuerpos minerales. Dicho valor capping se establece para un valor de probabilidad acumulada de 99% o lo que es igual el percentil 99 de la población muestral, en este caso se estableció por medio de una hoja de cálculo para cada uno de los cuerpos mineralizados, dando como resultado:

Valores umbrales (Capping) para cuerpos minerales del Bloque A01	
CUERPO MINERALIZADO	VALOR UMBRAL PARA EL TENOR (g/ton)
V1	12.01
V2	8.97
V3	24.8
V4	5.9
V5	7.7
V6	14.4
V7	7.48
V8	14.9
V9	12.23

Tabla 5. Valores umbrales de tenor establecidos para los cuerpos mineralizados en el Bloque A01

Con dicho valor umbral no se descartan los valores que superen el mismo, sino, que dichos valores al ser mayores cambian en la base de datos al valor del *capping* establecido se igualan a dicho valor, quedando de igual forma los variogramas y curvas de probabilidad acumulada con una mejor distribución como se presentan a continuación:

Histograma para el cuerpo mineralizado V1 con valor umbral 12.01 g/ton

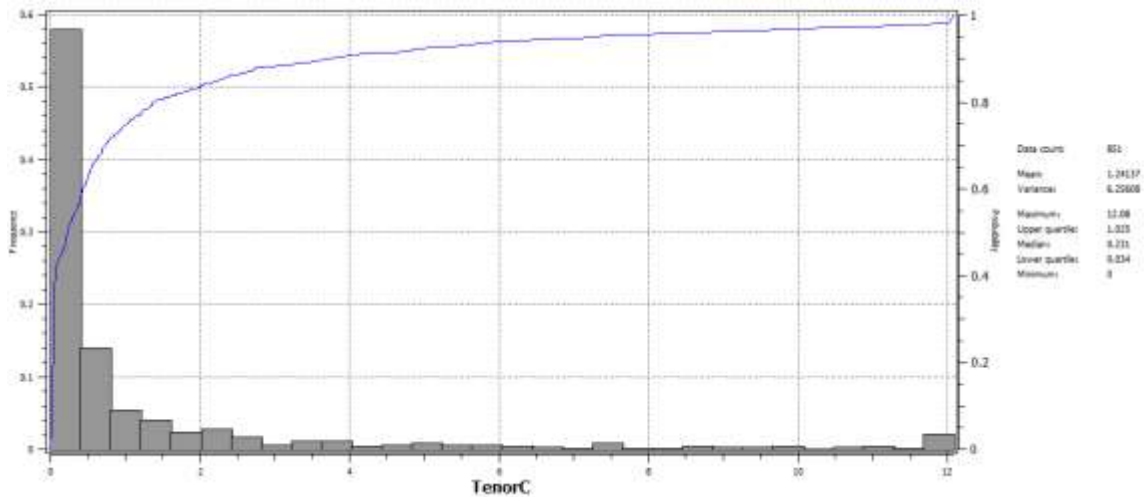


Figura 53. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V1

Histograma para el cuerpo mineralizado V2 con valor umbral 8.97 g/ton

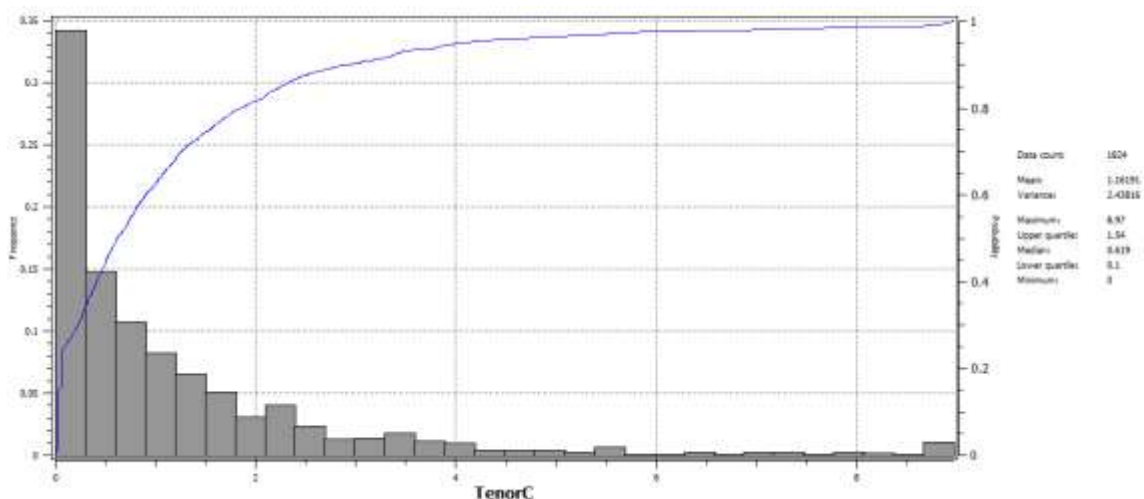


Figura 54. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V2

Histograma para el cuerpo mineralizado V3 con valor umbral 24.84 g/ton

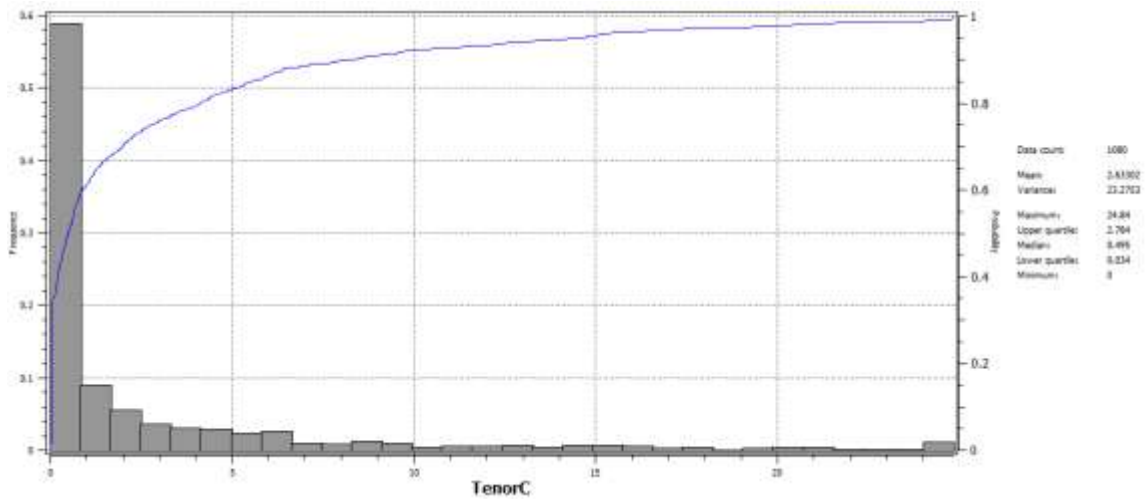


Figura 55. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V3

Histograma para el cuerpo mineralizado V4 con valor umbral 5.91 g/ton

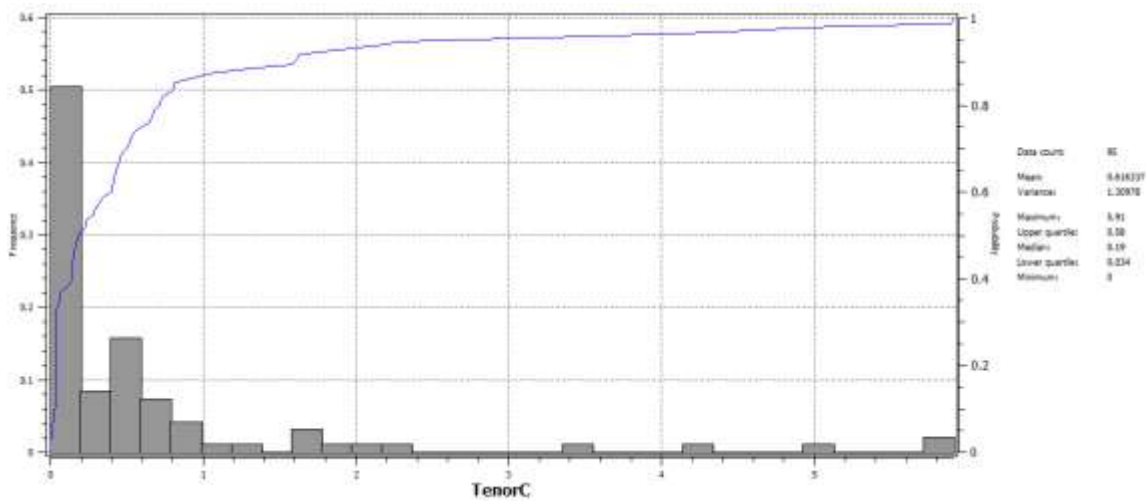


Figura 56. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V4

Histograma para el cuerpo mineralizado V5 con valor umbral 7.72 g/ton

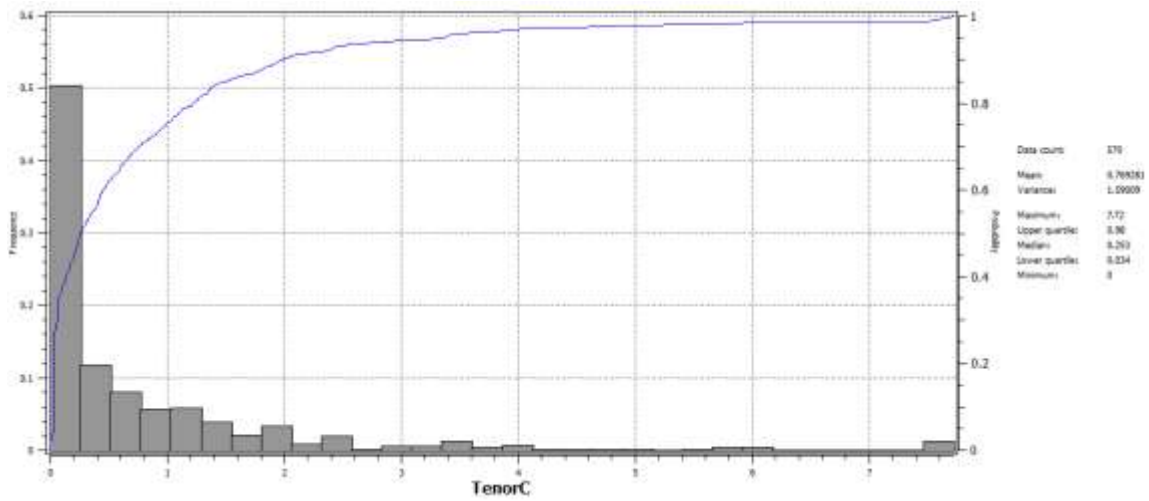


Figura 57. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V5

Histograma para el cuerpo mineralizado V6 con valor umbral 14.4 g/ton

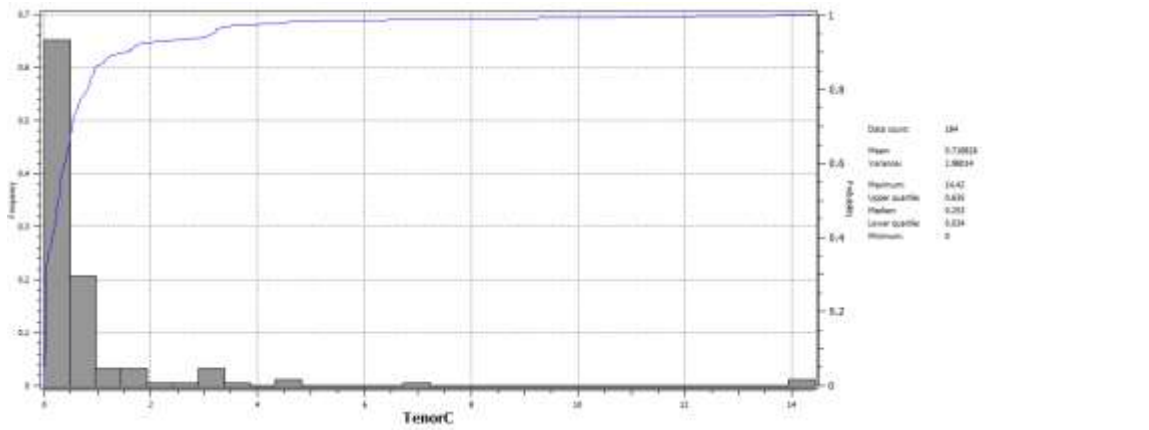


Figura 58. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V6

Histograma para el cuerpo mineralizado V7 con valor umbral 7.48 g/ton

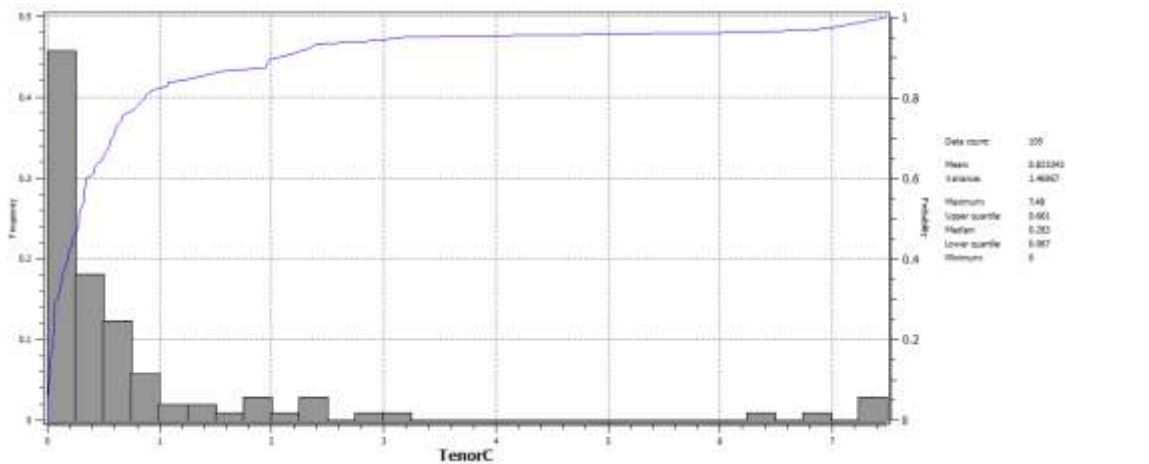


Figura 59. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V7

Histograma para el cuerpo mineralizado V8 con valor umbral 14.92 g/ton

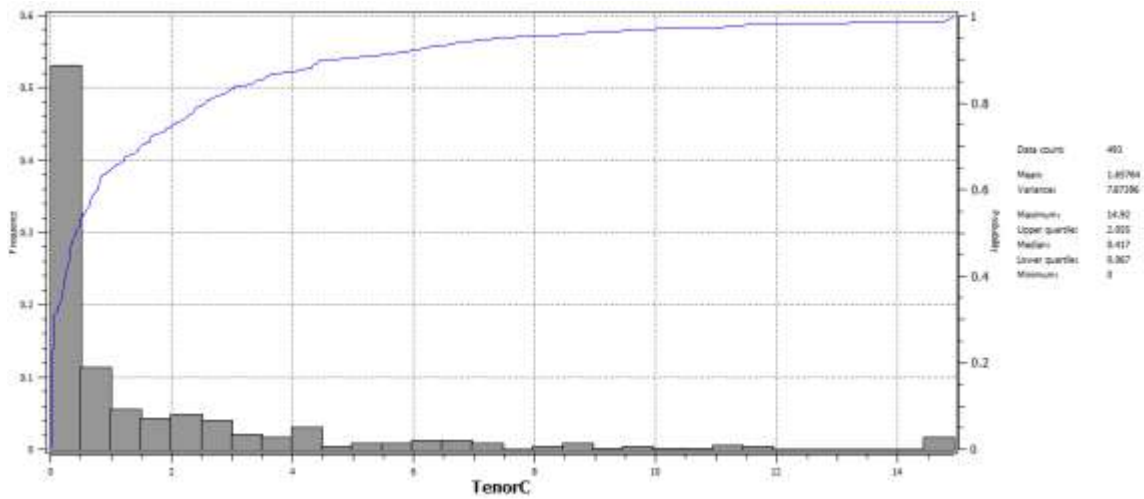


Figura 60. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V8

Histograma para el cuerpo mineralizado V9 con valor umbral 12.23 g/ton

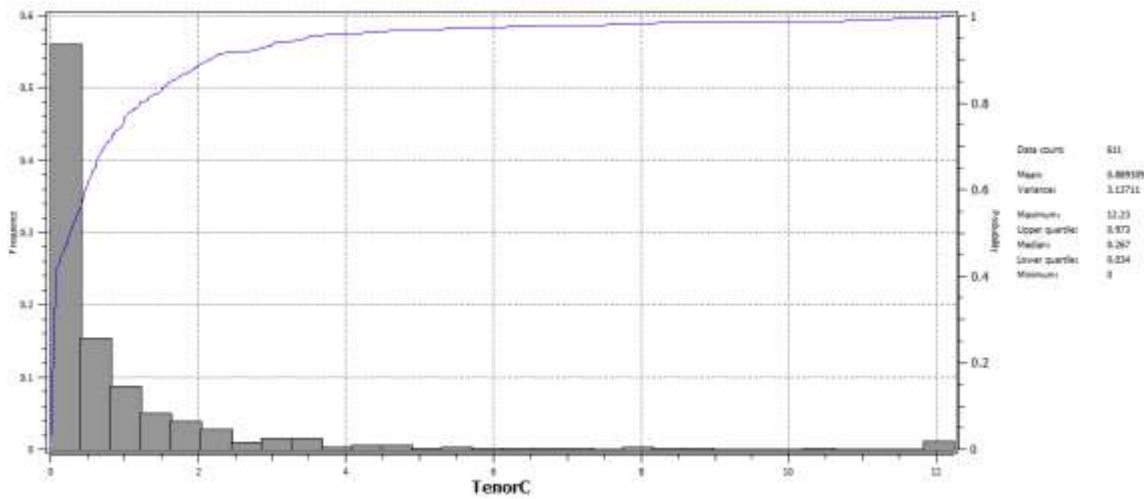


Figura 61. Histograma con valor umbral establecido para los datos en el cuerpo mineralizado V9

Observando un notable cambio en las gráficas de probabilidad y a su vez en un factor que evidencia la necesidad de establecer el valor umbral el cual es la varianza, existiendo casos como en el cuerpo mineralizado V6 en el cual el salto de la varianza de la población de muestras tuvo un cambio de 111.38 a 2.98, debido a la eliminación de los valores extremos que se encontraban en los datos analizados.

4.2.2 Tablas de estadística descriptiva por cada cuerpo mineralizado

ESTADISTICA DESCRIPTIVA PARA LOS CUERPOS MINERALES V1, V2 Y V3			
	V1	V2	V3
Numero de datos	851	1824	1080
Tenor Mínimo	0.000	0.000	0.000
Tenor Máximo	37.047	19.264	65.069
Media	1.320	1.189	2.730
Mediana	0.231	0.619	0.495
Varianza 1	9.040	3.029	30.216
Capping	12.010	8.970	24.840
Varianza 2	6.245	2.438	23.275

Tabla 6. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V1, V2 y V3.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA PARA LOS CUERPOS MINERALES V4, V5 Y V6			
	V4	V5	V6
Numero de datos	95	570	184
Tenor Mínimo	0.000	0.000	0.000
Tenor Máximo	6.126	28.678	134.413
Media	0.619	0.833	1.556
Mediana	0.190	0.253	0.253
Varianza 1	1.335	3.353	111.386
Capping	5.910	7.720	14.420
Varianza 2	1.309	1.590	2.980

Tabla 7. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V4, V5 y V6.

ESTADISTICA DESCRIPTIVA PARA LOS CUERPOS MINERALES V7, V8 Y V9			
	V7	V8	V9
Numero de datos	105	493	611
Tenor Mínimo	0.000	0.000	0.000
Tenor Máximo	74.433	45.600	29.752
Media	1.461	1.749	0.971
Mediana	0.283	0.417	0.267
Varianza 1	53.733	12.338	6.072
Capping	7.480	14.920	12.230
Varianza 2	2.469	7.873	3.137

Tabla 8. Estadística descriptiva para los cuerpos minerales V7, V8 y V9.

4.3 ESTUDIO VARIOGRÁFICO

4.3.1 Mapas de variogramas

Con respecto a los mapas de variogramas generados tras el uso de Gslib se obtuvo un variograma en la dirección XY para obtener la dirección principal y secundaria y otro variograma en la dirección XZ para contemplar el buzamiento de la dirección vertical, en este estudio no se observa una dirección principal ni secundaria muy clara, como se observa en la figuras 61 y figura 62, por ello en estos casos específicamente las direcciones se fueron ajustando siguiendo la tendencia de rumbo y buzamiento de los cuerpos mineralizados a estudiar.

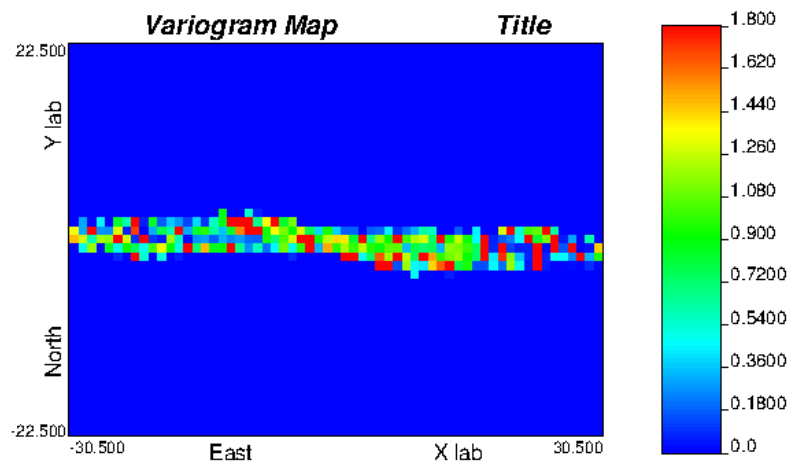


Figura 62. Mapa de variogramas para el cuerpo mineral V2 en dirección XY

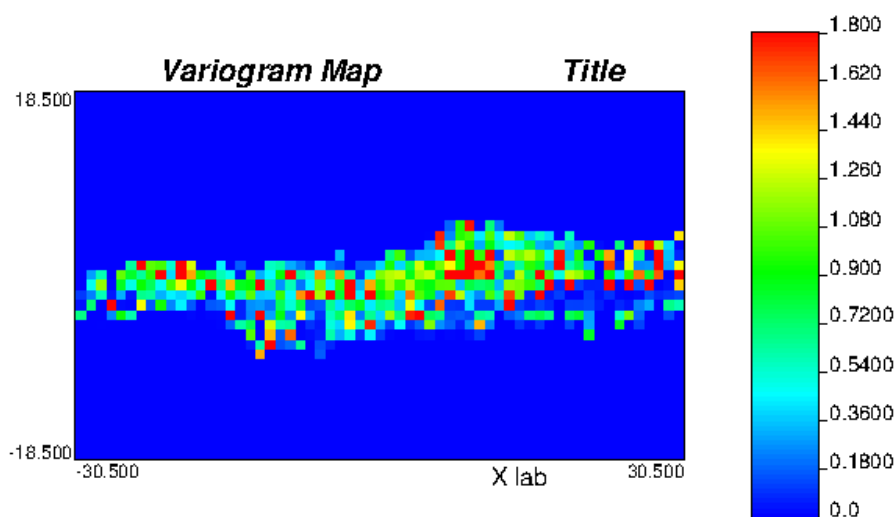


Figura 63. Mapa de variogramas para el cuerpo mineral V2 en dirección XZ

4.3.1.1 Tablas por cuerpo mineralizado de las direcciones de mayor continuidad espacial

Para cada cuerpo mineralizado por medio de los mapas de variogramas se determinaron las direcciones principal, secundaria y vertical de anisotropía, las cuales son reflejadas a continuación en la siguiente tabla:

	Direcciones preferenciales por cuerpo mineralizado					
	Dirección principal		Dirección Secundaria		Dirección Vertical	
	Azimut	Dip	Azimut	Dip	Azimut	Dip
V1	109	0	19	0	109	60
V2	109	0	19	0	109	50
V3	70	0	160	0	70	58
V4	70	0	160	0	70	60
V5	65	0	155	0	65	50
V6	60	0	150	0	60	60
V7	65	0	155	0	65	60
V9	70	0	160	0	70	58
V9	75	0	165	0	75	58

Tabla 9. Direcciones Preferenciales por cuerpo mineralizado.

4.3.2 Variogramas Experimentales

Los variogramas experimentales se hicieron con relación a las 3 direcciones preferenciales de cada cuerpo mineral, como se definieron previamente, Principal, Secundaria y Vertical. Ajustando a un modelo matemático, en este caso exponencial, los valores de los variogramas en las 3 direcciones de anisotropía, lo cual permitió establecer los rangos medio mínimo y máximo de ajuste (véase figura 63), los cuales coinciden con los valores de búsqueda del elipsoide en los pasos posteriores.

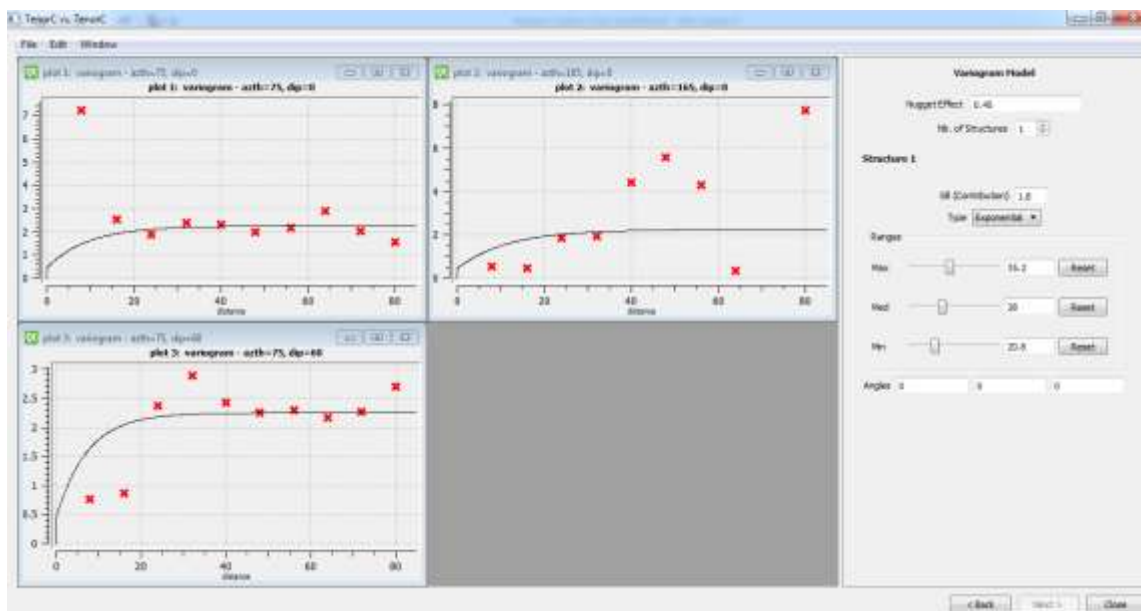


Figura 64. Ajuste del modelo de variogramas para el cuerpo mineral V4 en SGeMS.

4.3.2.1 Tablas por cuerpo mineralizado de propiedades de variogramas

Gracias a la realización de los variogramas experimentales en las 3 direcciones se logró establecer los rangos de ajuste y además el efecto pepita y la contribución del modelo al ajuste variográfico de los datos de cada cuerpo mineralizado a modelos exponenciales, lo cual da como resultado la siguiente tabla:

Propiedades de ajuste de los variogramas experimentales a modelo exponencial.

	Rangos			Nugget	Contribución Modelo
	Max	Med	Min		
V1	120	97	60	2.5	2
V2	155	86	59	3.2	1.5
V3	42	28	15	0.62	0.9
V4	35	28	20	0.45	1.8
V5	39	28	16	0.5	1.6
V6	53	35	22	0.46	1.7
V7	94	60	41	0.7	1.4
V9	75	30	18	0.4	1.9
V9	100	30	25	1	2.2

Tabla 10. Propiedades de ajuste del modelo exponencial al variograma experimental.

4.4 ESTIMACIÓN MEDIANTE KRIGING ORDINARIO

Para la estimación fue pertinente utilizar los rangos máximos, medios y mínimos determinados con anterioridad para definir el elipsoide de búsqueda, a su vez el valor del efecto pepita o nugget y la contribución del modelo fueron de igual manera necesarios, el tamaño de bloques original era de 10m x 5m x 10m (X.Y.Z), realizando una discretización, generando sub-bloques para una mejor estimación en bloques pequeños de 2x1x2, generando una discretización resultante: X=5, Y=5 y Z=5. En los valores condicionantes de datos se utilizó un número mínimo de muestras para la estimación de 2 y un número máximo de 100, lo que persigue evitar las restricciones y condicionantes de mínimos y máximos de datos en el volumen del elipsoide de búsqueda correspondiente a la estimación.

El algoritmo luego de ser ejecutado en SGeMS da como resultado una base de datos con parámetros relevantes, en primer lugar el contenido de oro por cada bloque y la varianza kriging de cada uno de ellos.

4.5 CATEGORIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RECURSOS

4.5.1 Categorización de bloques generados por el kriging

Es importante resaltar que se establece que la categorización parte por considerar un recurso mineral ya que no cuenta por al menos con un Estudio de Prefactibilidad. Este estudio debe incluir una adecuada información sobre la Minería, procesamiento, metalurgia, factores económicos, y otros factores relevantes que demuestren, al momento de la presentación del informe, que la extracción económica puede ser justificada. Una reserva minera incluye materiales diluyentes y provisiones por pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es extraído.

Se realizó la categorización de los bloques exportados desde SGeMS con 2 variables fundamentales, en primer lugar la concentración de mineral de interés, en nuestro caso de estudio, oro, en cada uno de los bloques estimados mediante Kriging ordinario y además de ello la varianza de Kriging de cada uno de los bloques estimados, mediante el criterio de categorización de la varianza del Kriging se estableció el criterio de clasificación, permitiendo establecer una categorización del tipo de recurso al cual pertenece cada bloque previamente estimado, identificándolos como inferidos, indicados y medidos, según el grado de confianza en el cual se apoya cada bloque estimado, como se puede apreciar en la figura 64.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	modelo10								
2		6							
3	X								
4	Y								
5	Z								
6	Cuerpo								
7	Tenor								
8	Tenor krig var								
9									CATEGORIA
10	XXXXXX	XXXXXX	165.00	6	3.99941	0.00230332	0.04799292	0.012	Indicado
11	XXXXXX	XXXXXX	134.75	6	0.99853	0.02010476	0.14179126	0.142	Inferido
12	XXXXXX	XXXXXX	138.75	6	1.99853	0.04155485	0.20385006	0.102	Inferido
13	XXXXXX	XXXXXX	138.00	6	5.996874	0.00345384	0.058769365	0.0098	Indicado
14	XXXXXX	XXXXXX	145.00	6	4.991926	0.00043958	0.020966089	0.0042	Indicado
15	XXXXXX	XXXXXX	121.00	6	2.990892	0.15210961	0.390012317	0.1304	Inferido

Figura 65. Categorización de bloques por medio del método de la varianza del kriging.

Las tablas de bloques fueron importadas a RecMin, con el nuevo parámetro establecido como CATEGORIA, y solamente los valores de tenor, omitiendo los valores de varianza del kriging de cada bloque estimado. Permitiendo visualizar el modelo de bloques previamente definido por concentraciones, determinando las zonas de mayor interés según la ley de corte, que en este caso es de 0,5 g/ton. Clasificando en una escala de colores partiendo desde un color blanco para los bloques que no cumplen con la ley de corte y una escala que a desde el color amarillo para los bloques de tenores menores pero que superan la ley de corte haciéndose rojos hasta los bloques con mayor contenido aurífero y por ende mucho más rentable, como se observa en la figura 66.

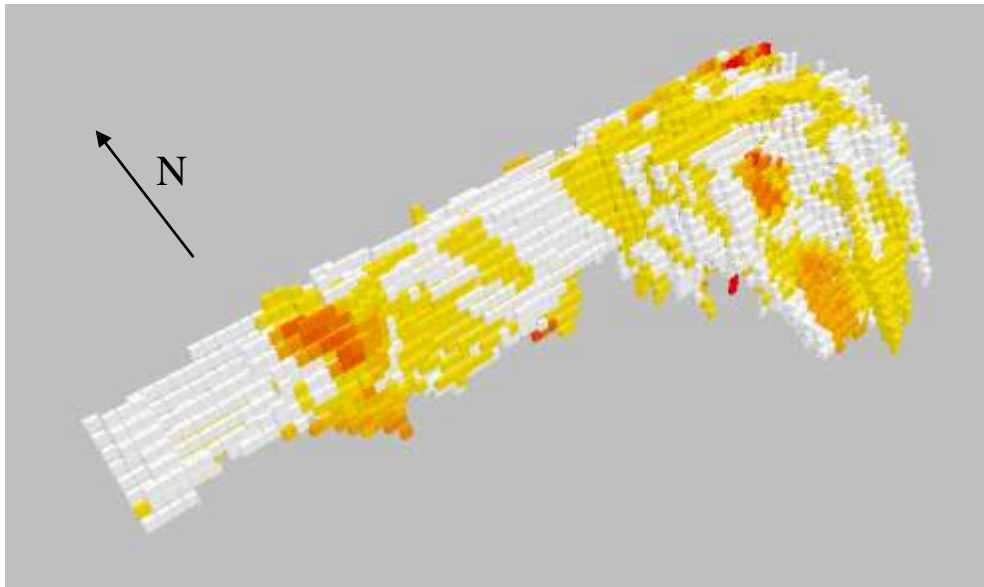


Figura 67. Concentración aurífera del Bloque A01 delimitando sub-bloques con ley de corte

4.5.2 Reportes

Los valores correspondientes a cada bloque del modelo geológico, son procesados por medio de un módulo adicional de RecMin, denominado BLKs Reports, en el cual se generó la siguiente secuencia de reportes:

Tabla 11. Reporte General de Cuerpos Minerales del Bloque A01

Cuerpo mineral	Categoría	Peso (Kg)	Tenor Promedio g/Ton
1		523.100	0,67
	inferido	523.100	0,67
2		941.350	1,19
	inferido	941.350	1,19
3		1.085.062	0,67
	indicado	42.350	1,00
	inferido	1.042.712	0,66
4		3.411.630	1,16
	indicado	3.247.090	1,19
	inferido	164.540	0,66
5		1.704.352	1,03
	indicado	1.148.245	0,94
	inferido	556.106	1,20

6		1.446.734	0,72
	indicado	833.271	0,74
	inferido	613.463	0,69
7		1.666.387	0,75
	indicado	622.601	1,21
	inferido	1.043.786	0,48
8		1.297.093	2,19
	indicado	874.407	2,44
	inferido	422.686	1,67
9		972.745	1,26
	indicado	651.680	1,77
	inferido	321.066	0,23
	Total =	13.048.454	

En este reporte se observa cómo se desglosa por cuerpo mineral la totalidad de material en peso, además del tenor promedio y categoría en la cual se encuentran los valores por categoría y totales.

Para este yacimiento se cuenta con una ley de corte de 0,5 g/ton, para ello se realiza un reporte idéntico al presentado anteriormente, pero con la restricción de que se use para dicho reporte los bloques que tengan un valor mayor o igual a 0,5 g/ton en su parámetro Au, correspondiente al tenor de oro presente en dicho bloque.

Tabla 12. Reporte de Cuerpos Minerales del Bloque A01 con una ley de corte de 0.5 g/ton

Cuerpo mineral	Categoría	Peso (Kg)	Tenor Promedio g/Ton
1		312.250	0,88
	Inferido	312.250	0,88
2		487.600	2,14
	Inferido	487.600	2,14
3		472.383	1,31
	Indicado	32.350	1,19
	Inferido	440.033	1,32
4		2.910.914	1,31
	Indicado	2.838.264	1,32
	Inferido	72.650	1,20

5		1.175.072	1,38
	Indicado	859.961	1,15
	Inferido	315.112	1,99
6		694.450	1,21
	Indicado	437.081	1,11
	Inferido	257.369	1,37
7		808.817	1,36
	indicado	424.262	1,65
	inferido	384.556	1,04
8		979.433	2,82
	indicado	745.666	2,81
	inferido	233.767	2,87
9		637.609	1,87
	indicado	600.135	1,90
	inferido	37.475	1,29
	Total =	8.478.527	1,57

A su vez, también se consideró realizar un reporte que clasifique los resultados por categorías y desglosando en cada una de ellas la cantidad de material que contiene cada cuerpo mineralizado en dicha categoría y mostrando como en los casos anteriores los tenores o leyes promedios del mineral en ese cuerpo mineralizado, destacando que este reporte fue realizado de igual manera para los bloques que se consideraron rentables (ley de corte mayor a 0,5g/ton).

Tabla 13. Reporte de clasificación de recursos presentes en el Bloque A01.

Categoría	Cuerpo mineral	Peso Kg	Tenor Promedio g/Ton
indicado		5.937.717	1,55
	3	32.350	1,19
	4	2.838.264	1,32
	5	859.961	1,15
	6	437.081	1,11
	7	424.262	1,65
	8	745.666	2,81
	9	600.135	1,90
inferido		2.540.810	1,61
	1	312.250	0,88
	2	487.600	2,14
	3	440.033	1,32
	4	72.650	1,20
	5	315.112	1,99
	6	257.369	1,37
	7	384.556	1,04
	8	233.767	2,87
	9	37.475	1,29
	Total =	8.478.527	1,57

Obteniendo por ultimo un reporte final en el cual se realizaron los cálculos pertinentes para determinar la cantidad de onzas de oro presentes en el yacimiento categorizándolas por el nivel de confianza, es importante resaltar que las onzas estimadas son onzas troy (31,1gr/Oz), teniendo la totalidad de recursos estimados para el Bloque A01.

Tabla 14. Reporte total de oro en onzas troy presente en el Bloque A01

Categoría	Peso Kg	Tenor Promedio g/Ton	Total Metal (Oz)
INDICADO	5.937.717	1,55	295,44
INFERIDO	2.540.810	1,61	131,30
TOTAL	8.478.527	1,57	426,74

CONCLUSIONES

Caracterización Geológica

Se definió el Bloque A01 como el volumen comprendido por 190 sondeos ubicados en el distrito minero El Callao, descrito como un yacimiento de morfología tabular, comprendida específicamente por cuerpos mineralizados de tipo vetas con 3 litologías claramente definidas, comprendidas por un saprolito de densidad de 1,7 Kg/m³, luego zona de transición entre el saprolito y la roca fresca con densidad de 2 Kg/m³ y por último una roca fresca representada por una andesita con una densidad de 2,7 Kg/m³, lo que permitió definir el modelo geológico de bloques para todos los cuerpos mineralizados, con sub-bloques de dimensiones de 10m x 5m x 10m, con características litológicas y espaciales definidas.

Estadística descriptiva

A partir de los histogramas se observaron las irregularidades de los datos contemplados en cada uno de los cuerpos vetiformes, para los cuales fueron definidos evidentemente los valores de *capping* o valor umbral para cada uno de los mismos, apuntando a una mejor estimación mitigando los valores extremos a los cuales en sensible el estudio geoestadístico, teniendo como consecuencia una reducción de la varianza en cada uno de los casos de estudio.

Estudio variográfico

Respecto al estudio variográfico las direcciones anisotrópicas no fueron visualizadas en su totalidad con mucha claridad, es pertinente mencionar que este tipo de estudio dependen de la apreciación y la experiencia del observador, por ende se utilizó en los casos poco apreciables una dirección preferencial que coincidiera o persiguiera la tendencia de la orientación de los cuerpos mineralizados.

Estimación, categorización y cuantificación de los recursos

Los elementos presentes en el yacimiento mineral denominado Bloque A01 se clasifican inicialmente como recursos minerales debido a la carencia de un estudio de prefactibilidad. A su vez se estimó por medio de Kriging ordinario los tenores auríferos de cada uno de los cuerpos minerales además de la varianza del kriging de cada sub-bloque estimado permitiendo establecer categorías de fiabilidad en base a esta última propiedad. Se estimaron 5937 Ton de recursos indicados con 295,44 Oz de oro, por su parte 2540 Ton de recursos se categorizaron como inferidos comprendiendo 131,3 Oz de oro, con un total de 426,74 Oz para los cuerpos mineralizados identificados en el Bloque A01.

RECOMENDACIONES

Realizar una validación del modelo geológico propuesto y la dirección de los cuerpos mineralizados, con datos de geofísica en campo, además de ello comprobar la dirección de dichos cuerpos a medida que se avance en las etapas de la explotación.

Se sugiere la realización de otros ajustes variográficos para cada uno de los cuerpos mineralizados con la finalidad de comparar y buscar el modelo matemático que mejor se ajuste a la variabilidad espacial del yacimiento, aplicando un cross-validation o validación cruzada a los diversos modelos propuestos para dichos cuerpos.

Se propone la realización de transformaciones matemáticas a la base de datos, normalización, cuadrado, raíz cuadrada, persiguiendo una mejor visualización de las características de variabilidad espacial.

Realizar un estudio de prefactibilidad permitiendo la posibilidad de otorgar la etiqueta de reserva mineral al Bloque A01.

Realizar una categorización tomando en cuenta el método del error porcentual de la estimación de la media u otros métodos, que permitan establecer comparaciones con la estimación propuesta con este estudio.

Se sugiere no realizar actividad minera en el área, debido a que la extensión territorial de la zona es demasiado grande para los recursos minerales encontrados en la misma, el impacto de dicha actividad minera no sería justificado debido a la utilización de los recursos naturales en el área para la extracción del mineral de interés.

Continuar con la línea de investigación en el área de evaluación de yacimientos por medio de métodos geoestadísticos, permitiendo una caracterización mucho más fiable y comprobable para diversas formaciones geológicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Pizarro S. “*MODELAMIENTO GEOESTADISTICO DE LEYES DE COBRE TOTAL Y SOLUBLE*” Tesis para optar al grado de magister en minería, Santiago de Chile, 2011.

Rojas Carlos E. “*MODELADO GEOESTADISTICO PARA LAS UNIDADES PRODUCTORAS 5PS20 Y 4PS30 DE CRUDO EXTRAPESADO DEL ÁREA RESERVADA DEL DISTRITO CABRUTICA, CAMPO ZUATA PRINCIPAL, DE LA FAJA PETROLIFERA DEL ORINOCO*” TESIS. Caracas, 2015.

Chica Olmo M (1987) “*ANALISIS GEOESTADISTICO EN EL ESTUDIO DE LA EXPLOTACION DE RECURSOS MINERALES*” Tesis Doctoral. Granada, 1987.

Torres Julieta, Cruz Israel (2004) "MODELOS GEOESTADÍSTICOS DE LA CONCENTRACIÓN DEL NI EN EL DOMINIO 7 DEL YACIMIENTO PUNTA GORDA". Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba

JORC (2001) "CÓDIGO DE AUSTRALASIA PARA INFORMAR SOBRE RECURSOS MINERALES Y RESERVAS DE MENA". Australia.

Journel y Huijbregts, (1978) “MINING GEOSTATISTIC”.

Matheron, G. (1962). "PRINCIPLES OF GEOSTATISTICS" Economic Geology

Deutsch, C. y Journel, A. (1998). “GSLIB: GEOSTATISTICAL SOFTWARE LIBRARY AND USER’S GUIDE (2ª ED.)”. Oxford University Press: New York.

María Artigas (2011) “DISEÑO DE PATRONES DE PERFORACIÓN Y VOLADURA, PARA NORMALIZAR LA FRAGMENTACIÓN DEL MATERIAL RESULTANTE DE LA MINA CHOCO 10 EMPRESA PMG S. A. EL CALLAO, ESTADO BOLÍVAR”. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas – Venezuela.

José Quintín Cuador-Gil y Arelys Quintero-Silverio (2001).”SIMULACIÓN
CONDICIONAL DE VARIABLES REGIONALIZADAS Y SU APLICACIÓN AL
COMPORTAMIENTO DE LA POROSIDAD EFECTIVA EN UN YACIMIENTO
FRACTURADO-POROSO”. Universidad Pinar del Rio. Cuba.