

**ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y  
RESERVAS MINERALES:  
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO  
APLICADO PARA ESTUDIANTES  
UNIVERSITARIOS**

**Alfonso Alberto Romero Baylón  
Jaime Cesar Mayorga Rojas  
Carlos Del Valle Jurado  
Walter Javier Diaz Cartagena  
Johnny Henry Ccatamayo Barrios**



**ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES: ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO  
APLICADO PARA ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS**

**AUTORES:**

Alfonso Alberto Romero Baylón

Jaime Cesar Mayorga Rojas

Carlos Del Valle Jurado

Walter Javier Diaz Cartagena

Johnny Henry Ccatamayo Barrios

**2024**

La presente obra fue revisada por 2 pares académicos externos ciegos conforme al proceso editorial del Centro de Investigación Latinoamericano para el Desarrollo e Innovación CILADI.

Los rigurosos procedimientos editoriales de CILADI garantizan la selección de manuscritos por sus aportes significativos al conocimiento y cualidades científicas.

Todas las obras publicadas por CILADI cuentan con ISBN y se encuentran disponibles en la web ([www.ciladi.org](http://www.ciladi.org))



Centro de Investigación Latinoamericano

para el Desarrollo e Innovación

Guayaquil- Ecuador

<https://ciladi.org/>

AÑO 2024

Copyright © 2024

Todos los derechos reservados.

ISBN: 978-9942-7239-9-4

## Resumen

El presente proyecto da a conocer la evaluación de un yacimiento que contiene oro como metal recuperable, sobre una base de datos de 11699 muestras, asociadas a 114 sondajes.

En primer lugar se realizó el análisis exploratorio de datos, consistente en efectuar un despliegue de datos en 2D y 3D a fin de familiarizarse con el depósito y visualizar la distribución de leyes y zonificación geológica (categorías de óxidos y sulfuros). Adicionalmente se obtuvieron las estadísticas básicas, como histogramas, gráficos de probabilidad, qq-plot, diagramas de dispersión y box-plot, con el fin de determinar las características de las distribuciones de los datos de manera de poder identificar el comportamiento de estos, además de establecer la presencia de datos extremos o outliers y su tratamiento respectivo conforme se realiza en la industria. Paralelamente, aprovechando estos reportes se efectuó el análisis del efecto de soporte ocasionado al generar compósitos de diferente volumen.

De igual forma, se realizaron análisis de deriva para determinar el comportamiento de la media condicional de los datos y determinar a posteriori los cuidados que se deben tener en la estimación. Se analizaron también, las unidades de estimación (objetivo de primer orden de un análisis exploratorio de datos); y el tamaño óptimo de los compósitos deduciéndose que de acuerdo al tamaño de las muestras, 2 metros representa un compósito adecuado para el proyecto; con posibilidades de compositar en valores múltiplos de este valor (4 metros que a la postre corresponderá al tamaño de compósitos para efectuar la estimación). Luego se realizó un capping de los datos compositados a 4 metros puesto que la compositación por sí sola podía regularizar los valores de leyes demasiado altas, pero como no fue el caso, los datos considerados outliers fueron transformados a valores cercanos al percentil 99.8%.

También se desarrolló un análisis de representatividad de las muestras conforme a su distribución espacial a fin de determinar muestreos regulares o preferentes. Dado la existencia de estos últimos se procedió a obtener, mediante técnicas de desagrupamiento, estadísticas más representativas de los datos.

Con todo el análisis exploratorio de datos efectuado, y la selección del compósito de 4 m, se procedió a efectuar un análisis variográfico. Este permite conocer el comportamiento

espacial de las leyes de Oro, se realiza la configuración de los parámetros de los variogramas experimentales para cada uno de los dominios de estimación, se evalúa la anisotropía (direcciones preferenciales de mineralización) sabiendo que el variograma experimental es imperfecto (obtenidos con imprecisiones de los datos disponibles) e incompletos (solo a determinadas distancias y ciertas direcciones), requiere ser modelado el cual se utiliza para la estimación de las leyes.

Para el proceso de establecer y obtener el variograma modelado, es necesario ajustar un modelo de variograma en todas las direcciones del espacio y para todas las distancias, en torno al variograma experimental calculado. Este modelo de variograma será el que posteriormente se empleará en la estimación mediante Kriging Ordinario para cada dominio geológico (óxidos y sulfuros). Sin embargo, para efectuar la estimación se evalúan diferentes planes de kriging (diferentes vecindades de búsqueda para calcular un bloque), los cuales son posteriormente evaluados y comparados mediante la técnica de validación cruzada, teniendo en cuenta criterios de insesgo global, insesgo condicional, coeficiente de correlación y varianza mínima del error. A partir de dichos criterios se selecciona el mejor plan, tanto para óxidos, como para sulfuros, y se efectúa la estimación mediante kriging ordinario para obtener un modelo de bloques con leyes estimadas y varianzas de kriging.

Con los resultados del modelo de bloques se analizó el efecto de suavizamiento del kriging y del sesgo condicional para cuando se evalúa una función de transferencia como lo es el caso del tonelaje y la ley media. Adicionalmente el modelo de bloques permite determinar un inventario de recursos, los cuales son categorizados mediante la técnica de la varianza relativa del kriging. Se clasifican en recursos medidos, indicados e inferidos y se efectúa el reporte correspondiente en el presente informe.

## Índice de Contenidos

1.	Origen y propósito .....	15
1.1	Introducción .....	15
1.2	Objetivos generales del proyecto .....	17
1.3	Objetivos específicos del proyecto .....	17
2.	Antecedentes .....	18
2.1	Descripción General del Yacimiento.....	18
3.	Presentación del proyecto .....	18
4.	Análisis exploratorio de datos.....	23
4.1	Verificación de base de datos .....	23
4.2	Estadísticas de datos suministrados .....	24
4.3	Composición .....	27
4.3.1	Estadísticas de compósitos .....	28
4.3.2	Efecto Soporte .....	29
4.3.3	Justificación de compósitos de 4 m.....	31
4.3.4	Análisis de colas de compósitos.....	32
4.4	Unidades de Estimación.....	34
4.4.1	Análisis de deriva .....	38
4.4.2	Estadísticas por unidades de estimación.....	42
4.4.3	Análisis de contactos.....	44
4.5	Análisis de outliers .....	45
4.6	Desagrupamiento.....	49
4.6.1	Definición del tamaño de celda .....	50

4.6.2	Estadísticas de datos desagrupados.....	50
4.7	Nubes de correlación diferida.....	53
4.8	Resumen de estadísticas compósito 4 m .....	55
5.	Variografía y validación cruzada.....	59
5.1	Mapas Variográficos.....	60
5.2	Variogramas experimentales.....	66
5.3	Variogramas modelados .....	69
5.4	Planes de Kriging - Validación cruzada .....	71
5.4.1	Planes de Kriging .....	72
5.4.2	Validación cruzada.....	74
6.	Estimación - Kriging .....	78
6.1	Modelo de bloques.....	78
6.2	Parámetros de Kriging.....	80
6.3	Resultados de Kriging .....	81
7.	Categorización de Recursos .....	89
7.1	Inventario de recursos.....	92
7.2	Curvas tonelaje-ley .....	93
7.3	Despliegue gráfico de categorización de recursos .....	95
8.	Conclusiones.....	98
9.	Bibliografía .....	102
10.	Anexos.....	103
10.1	Histogramas de óxidos y sulfuros.....	103
10.2	Análisis de deriva para compósitos de 2 y 7 m.....	105

10.3	Gráficos de dispersión para los planes de kriging. ....	108
10.4	Parámetros para determinar varianzas de corte.....	114

**Índice de Figuras**

Figura 1.	Sondajes y superficies de referencia. ....	16
Figura 2.	Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes. ....	19
Figura 3.	Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes ....	19
Figura 4.	Vista en planta del yacimiento con la disposición de los sondajes y ley de oro. .....	20
Figura 5.	Vista en planta (corte en la cota 2085) .....	21
Figura 6.	Vista en planta (corte en la cota 2169) .....	21
Figura 7.	Vista en corte vertical (Plano ZY – Corte en coordenada Este 96966). ....	22
Figura 8.	Isométrico del yacimiento con disposición de los sondajes .....	22
Figura 9.	Histograma normal de ley de oro, datos originales.....	25
Figura 10.	Histograma acumulado de ley de oro, daros originales.....	25
Figura 11.	Probability plot de ley de oro, datos originales (escalas normales). ....	26
Figura 12.	Probability plot de ley de oro, datos originales (escala logarítmica). ....	26
Figura 13.	Comparación de sondajes compositados. ....	28
Figura 14.	Comparación de histogramas luego de compositar. ....	30
Figura 15.	Diagrama de dispersión de largo de muestra vs. ley de oro.....	31
Figura 16.	Histograma acumulado de largo de muestra.....	32
Figura 17.	Diagramas de dispersión para análisis de colas.....	33
Figura 18.	Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes y superficie.....	34
Figura 19.	Vista en corte vertical (Plano ZX – Corte en coordenada Norte 87821)*.....	35

Figura 20. Vista en corte vertical (Plano ZX – Corte en coordenada Norte 87960).	35
Figura 21. Box plot por categorías y global.	36
Figura 22. QQ plot por categorías y global.	37
Figura 23. Gráfico de probabilidad (análisis de poblaciones).	37
Figura 24. Media condicional ley de oro vs. coordenadas este (sin compositar).	39
Figura 25. Media condicional ley de oro vs. coordenadas norte (sin compositar).	39
Figura 26. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (sin compositar).	39
Figura 27. Media condicional ley de oro vs. coordenadas este (Comp. 4 m).	40
Figura 28. Media condicional ley de oro vs. coordenadas norte (Comp. 4 m).	40
Figura 29. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 4 m).	41
Figura 30. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 4 m).	42
Figura 31. Gráficos de medias condicionales en función de distancia a zona.	44
Figura 32. Correlograma de leyes de oro en función a distancia de superficie.	45
Figura 33. Gráfico de probabilidad (Comp. 4 m).	45
Figura 34. Histograma (Comp. 4 m).	46
Figura 35. Gráfico de probabilidad para óxidos (Comp. 4 m).	47
Figura 36. Gráfico de probabilidad para sulfuros (Comp. 4 m).	48
Figura 37. Gráfico de probabilidad datos con capping (Comp. 4 m).	48
Figura 38. Pesos de desagrupamiento por el método de celdas (Comp. 2 m).	50
Figura 39. Comparativo de histogramas de datos sin compositar.	52
Figura 40. Comparativo de histogramas de datos Compósito 4 m.	52
Figura 41. Nubes de correlación diferida a 10, 50 y 200 m.	54

Figura 42. Histogramas de datos de compósitos de 4 m .	56
Figura 43. Gráficos de probabilidad compósito de 4 m (lineal y logarítmico).	56
Figura 44. Gráfico de dispersión y media condicional para eje Este.	57
Figura 45. Gráfico de dispersión y media condicional para eje norte.	57
Figura 46. Gráfico de dispersión y media condicional para eje elevación.	58
Figura 47. Curva tonelaje-ley compósito 4 m.	58
Figura 48. Q-Q plot Compósito 4 m vs Compósito 7 m y datos originales.	59
Figura 49. Mapa variográfico óxidos (Plano XY).	61
Figura 50. Mapa variográfico óxidos (Plano XZ).	61
Figura 51. Mapa variográfico óxidos (Plano YZ).	62
Figura 52. Mapa variográfico sulfuros (Plano XY).	63
Figura 53. Mapa variográfico sulfuros (Plano XZ).	63
Figura 54. Mapa variográfico sulfuros (Plano YZ).	64
Figura 55. Orientación de la malla de sondajes.	65
Figura 56. Sondajes en planta y mineralización.	65
Figura 57. Variograma experimental óxidos.	67
Figura 58. Variograma experimental sulfuros.	68
Figura 59. Variograma modelado óxidos.	70
Figura 60. Variograma modelado sulfuros.	71
Figura 61. Esquema 3D de elipsoide de búsqueda.	74
Figura 62. Gráfico de dispersión de valores estimados vs. reales (plan 1 – óxidos).	77
Figura 63. Gráfico de dispersión de valores estimados vs. reales (plan 1 – sulfuros).	77

Figura 64. Modelo geológico en 3D (óxidos y sulfuros).....	79
Figura 65. Sección Modelo geológico (óxidos y sulfuros). .....	80
Figura 66. Comparativo de histogramas Modelo de Bloques vs. Compósito 4 m. ....	82
Figura 67. Comparativo de Box-plot Modelo de Bloques vs. Compósito 4 m. ....	82
Figura 68. Gráficos de probabilidad datos modelo de bloques. ....	83
Figura 69. QQ plot compósito de 4 m vs. Modelo de bloques. ....	84
Figura 70. Curva tonelaje-ley para el modelo de bloques. ....	84
Figura 71. Despliegue gráfico del modelo de bloques en 3D (leyes de Au).....	85
Figura 72. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano XZ (leyes de Au).....	85
Figura 73. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano YZ (leyes de Au).....	86
Figura 74. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano XY (leyes de Au).....	87
Figura 75. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano XY . ....	87
Figura 76. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano YZ .....	88
Figura 77. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano XZ .....	88
Figura 78. Metodología para categorizar recursos. ....	91
Figura 79. Curva tonelaje-ley recursos medidos.....	93
Figura 80. Curva tonelaje-ley recursos indicados.....	94
Figura 81. Curva tonelaje-ley recursos inferidos.....	94
Figura 82. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques en 3D.....	95
Figura 83. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección XY. 96	
Figura 84. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección XZ. 96	
Figura 85. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección YZ. 97	

Figura 86. Comportamiento de varianza del kriging respecto a ubicación de sondajes.	98
Figura 88. Histogramas de óxidos y sulfuros datos originales.....	103
Figura 89. Histogramas de óxidos y sulfuros compósito 2 m.....	103
Figura 90. Histogramas de óxidos y sulfuros compósito 4 m.....	104
Figura 91. Histogramas de óxidos y sulfuros compósito 7 m.....	104
Figura 92. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Este (Comp. 2 m). .....	105
Figura 93. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Norte (Comp. 2 m). .....	105
Figura 94. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 2 m). .....	106
Figura 95. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Este (Comp. 7 m). .....	106
Figura 96. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Norte (Comp. 7 m). .....	107
Figura 97. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Elevación (Comp. 7 m).....	107
Figura 98. Gráfico de dispersión – validación plan 2 óxidos.....	108
Figura 99. Gráfico de dispersión – validación plan 3 óxidos.....	108
Figura 100. Gráfico de dispersión – validación plan 4 óxidos.....	109
Figura 101. Gráfico de dispersión – validación plan 5 óxidos.....	109
Figura 102. Gráfico de dispersión – validación plan 6 óxidos.....	110
Figura 103. Gráfico de dispersión – validación plan 7 óxidos.....	110
Figura 104. Gráfico de dispersión – validación plan 2 sulfuros. ....	111
Figura 105. Gráfico de dispersión – validación plan 3 sulfuros. ....	111
Figura 106. Gráfico de dispersión – validación plan 4 sulfuros. ....	112
Figura 107. Gráfico de dispersión – validación plan 5 sulfuros. ....	112
Figura 108. Gráfico de dispersión – validación plan 6 sulfuros. ....	113

Figura 109. Gráfico de dispersión – validación plan 7 sulfuros. ....	113
--	-----

### Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas y longitudes de sondajes. ....	18
Tabla 2. Medias y varianzas para datos crudos y compósitos. ....	28
Tabla 3. Estadísticas básicas por compósitos para zona de óxidos. ....	29
Tabla 4. Estadísticas básicas por compósitos para zona de sulfuros. ....	29
Tabla 5. Estadísticas básicas por compósitos (global). ....	29
Tabla 6. Estadísticas básicas por zona (Datos sin compositar). ....	43
Tabla 7. Estadísticas básicas por zona (Compósito 2 m). ....	43
Tabla 8. Estadísticas básicas por zona (Compósito 4 m). ....	43
Tabla 9. Estadísticas básicas por zona (Compósito 7 m). ....	43
Tabla 10. Valores de capping (Compósito 4 m). ....	48
Tabla 11. Estadísticas básicas de datos con capping (Compósito 4 m). ....	49
Tabla 12. Estadísticas básicas datos desagrupados (global). ....	51
Tabla 13. Estadísticas básicas datos desagrupados (óxidos). ....	51
Tabla 14. Estadísticas básicas datos desagrupados (sulfuros). ....	51
Tabla 15. Estadísticas básicas compósito de 4 m. ....	55
Tabla 16. Estadísticas desagrupadas compósito de 4 m. ....	55
Tabla 17. Definición de dominios para mapas variográficos. ....	60
Tabla 18. Parámetros empleados en la construcción de mapas variográficos. ....	60
Tabla 19. Parámetros empleados para calcular Variogramas Experimentales. ....	67
Tabla 20. Estructuras anidadas de los variogramas modelados. ....	69
Tabla 21. Planes de kriging propuestos. ....	73
Tabla 22. Resultados de validación cruzada para óxidos. ....	74
Tabla 23. Resultados de validación cruzada para sulfuros. ....	75
Tabla 24. Diferencias porcentuales respecto al mejor criterio (óxidos). ....	76
Tabla 25. Diferencias porcentuales respecto al mejor criterio (sulfuros). ....	76
Tabla 26. Dimensiones del modelo de bloques. ....	79
Tabla 27. Parámetros a ser empleados en el Kriging. ....	80
Tabla 28. Estadísticas de estimación mediante Kriging. ....	81
Tabla 29. Criterios para categorizar los recursos de la unidad de Óxidos. ....	89
Tabla 30. Criterios para categorizar los recursos de la unidad de Sulfuros. ....	90
Tabla 31. Varianzas de corte, errores relativos y mallas de sondaje. ....	91
Tabla 32. Reporte de recursos “ <i>in situ</i> ” ....	92
Tabla 33. Reporte de recursos bajo ley de corte ....	92
Tabla 34. Parámetros para determinar varianza de corte recursos medidos - óxidos. ....	114
Tabla 35. Parámetros para determinar varianza de corte recursos indicados - óxidos. ....	115
Tabla 36. Parámetros para determinar varianza de corte recursos medidos - sulfuros. ....	116
Tabla 37. Parámetros para determinar varianza de corte recursos indicados - sulfuros. ....	117

## **1. Origen y propósito**

### **1.1 Introducción**

Se realizó un proyecto de evaluación de un yacimiento, actividad que se llevó a cabo mediante el desarrollo de tres etapas, en la cual la primera hace referencia al análisis exploratorio de datos, la segunda a la variografía y la tercera a la validación cruzada para comparar planes de kriging, estimación con kriging y finalmente categorización de los recursos estimados.

El depósito a analizar corresponde a un yacimiento de oro, siendo éste, el único elemento de interés para el estudio realizado. El modelo geológico presentado es de carácter académico, destinado a los estudiantes de pregrado. Es un modelo simplificado en el cual las leyes han sido ajustadas mediante un factor multiplicativo y se ha añadido una constante a las coordenadas para proteger la información de la empresa minera. Esta simplificación tiene como objetivo focalizar el aprendizaje de los estudiantes en las técnicas geoestadísticas aplicadas.

El modelo incluye zonas de óxidos y sulfuros. En un entorno profesional, la elaboración del modelo geológico es un paso preliminar a la evaluación de recursos, donde se consideran factores como variaciones en la litología, mineralización y alteración. Con base en estas características, se identifican y definen unidades homogéneas, conocidas comúnmente como unidades geológicas, que serán utilizadas en la estimación de recursos. El yacimiento es un depósito de oro epitermal, forma un cuerpo de conglomerado anular mineralizado alojado en diorita de origen porfídico. La masa del depósito está compuesta de mineral sulfurado principalmente, mientras que cerca de la superficie es óxido. El mineral sulfurado es caracterizado por pirita/calcopirita, clorita y esmectita. Los óxidos por pirita, alunita y kaolinita.

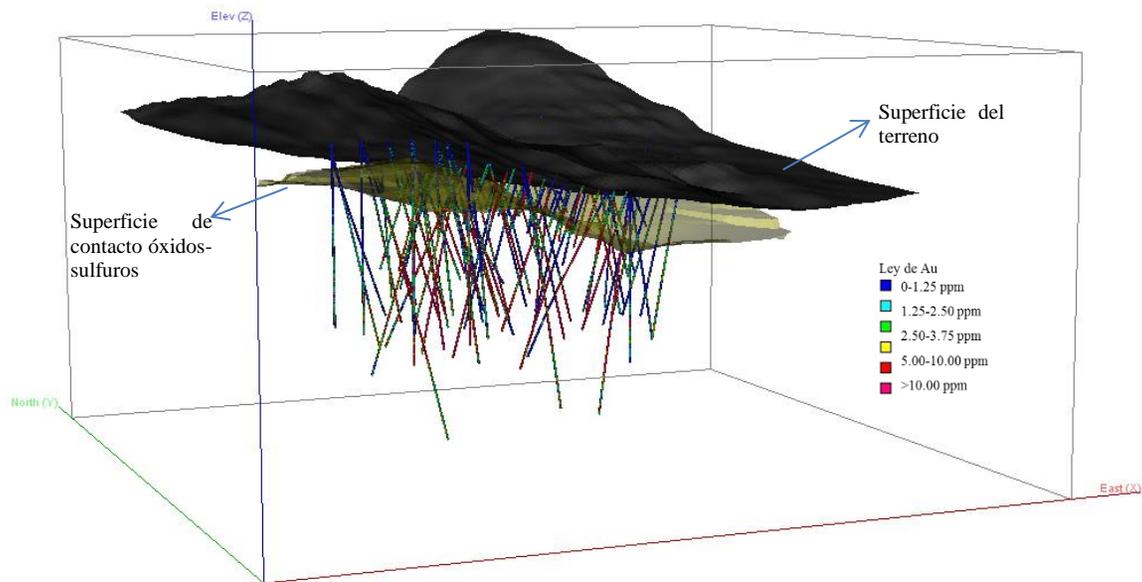
Datos como leyes de oro, y zonificación, corresponden a datos de entrada del estudio, asumiendo una campaña de sondajes realizada previamente sobre una malla de 50 m x 50 m. El proceso incluyó la carga de la información en software comercial, desplegar los datos, compositar sondajes a longitudes de 2, 4 y 7 m. para efectuar un análisis exploratorio de datos y posteriormente seleccionar el compósito de 4 m como datos de entrada para la estimación.

La variografía partió construyendo mapas variográficos donde se identificó una anisotropía en dirección preferencial 325°, así como en dirección ortogonal de 55° y sobre la vertical; las cuales se emplearon para determinar los variogramas experimentales. Posteriormente, se modelaron los variogramas acorde a estas direcciones y teniendo en cuenta las varianzas de los compósitos de 4 m. De esta manera se obtuvieron dos variogramas modelados para cada una de las unidades de estimación: uno para óxidos y otro para sulfuros.

Posteriormente se seleccionaron los planes de kriging consistentes en elipsoide con un número mínimo de datos a emplear de 4 y un máximo de 8 para ambos casos, el cual se denominó Plan 1. A partir de estos planes se efectuó la estimación mediante kriging ordinario obteniéndose un modelo de bloques con leyes de oro estimadas y varianza de kriging. Con esta última se procedió a categorizar los recursos mediante la técnica de varianza relativa del kriging definiendo dos varianzas de corte que clasifican los recursos en medidos, indicados e inferidos acorde al código JORC.

En la Figura 1 se presenta un esquema del depósito analizado con los sondajes suministrados.

**Figura 1. Sondajes y superficies de referencia.**



## **1.2 Objetivos generales del proyecto**

- Desarrollar un proyecto real, pero simplificado de estimación de recursos y reserva.

## **1.3 Objetivos específicos del proyecto**

- Familiarizarse con conceptos y herramientas (GEMS, GSlib, Matlab) que permitan realizar un estudio exploratorio de datos para la evaluación de yacimientos, analizar el efecto soporte, definir unidades de estimación, tratamiento de outliers, definición de tamaños de compósitos y desagrupamiento de datos, entre otros aspectos.
- Analizar estadísticamente potenciales unidades de estimación y utilización de software minero.
- Efectuar un análisis variográfico para determinar el variograma modelado que permita caracterizar el comportamiento espacial de la ley de oro en el yacimiento de interés.
- Desarrollar un análisis de planes de kriging mediante validación cruzada de manera que se seleccione el plan que presenta un mejor desempeño en la estimación.
- Efectuar una estimación mediante kriging ordinario empleando el software GEMS, para construir un modelo de bloques de ley de oro y varianza de kriging.
- Realizar una categorización de recursos en medidos, indicados e inferidos.
- Construir curvas tonelaje-ley que permitan determinar el comportamiento del yacimiento a diferentes leyes de corte del mismo.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Descripción General del Yacimiento

El total de las reservas geológicas son 350 toneladas métricas de oro equivalente, divididos entre depósitos de intrusiones alojadas tipo porfídicas y depósitos volcánicos epitermales del tipo de alta sulfuración.

El modelo geológico presentado es de carácter académico, destinado a los estudiantes de pregrado. Es un modelo simplificado en el cual las leyes han sido ajustadas mediante un factor multiplicativo y se ha añadido una constante a las coordenadas para proteger la información de la empresa minera. Esta simplificación tiene como objetivo focalizar el aprendizaje de los estudiantes en las técnicas geoestadísticas aplicadas.

El modelo incluye zonas de óxidos y sulfuros. En un entorno profesional, la elaboración del modelo geológico es un paso preliminar a la evaluación de recursos, donde se consideran factores como variaciones en la litología, mineralización y alteración. Con base en estas características, se identifican y definen unidades homogéneas, conocidas comúnmente como unidades geológicas, que serán utilizadas en la estimación de recursos.

## 3. Presentación del proyecto

La información suministrada corresponde a una extracción de la base de datos en formato ASCII donde se informan las coordenadas de los collares y la longitud de los sondajes (archivo Header.txt), la inclinación de los sondajes (archivo Survey.txt), análisis químicos de oro en ppm (archivo Assays.txt) y una zonificación de unidades homogéneas relativas a la geología (archivo Zone.txt). Las coordenadas entre las cuales se encuentra el proyecto se presentan en la Tabla 1.

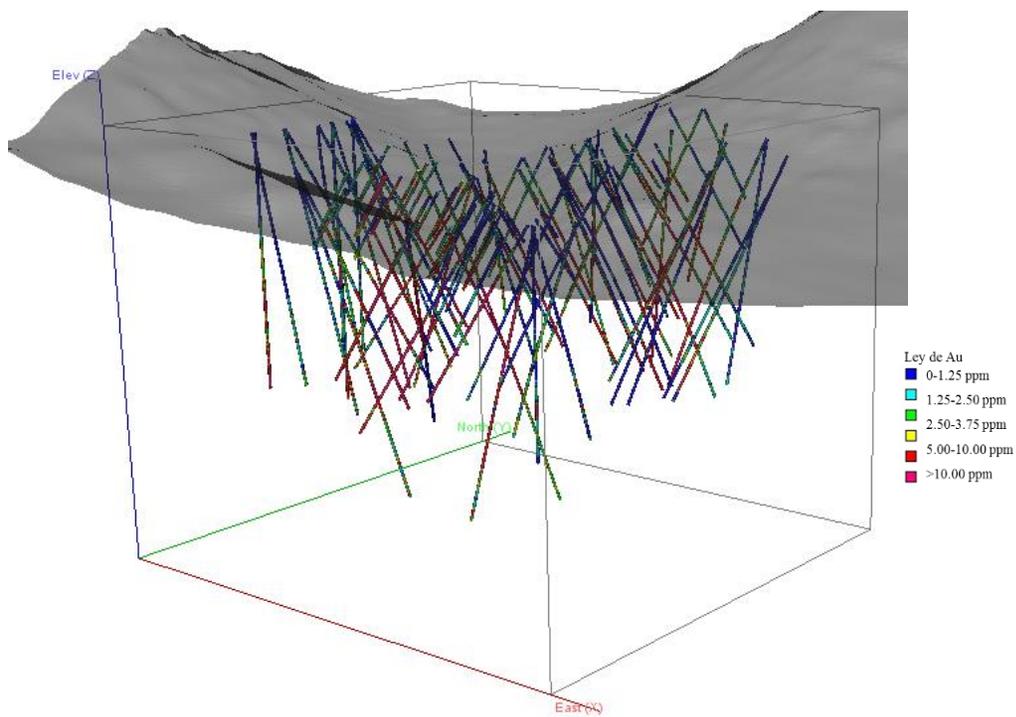
**Tabla 1. Coordenadas y longitudes de sondajes.**

	<b>Este [m]</b>	<b>Norte [m]</b>	<b>Elevación [m]</b>
<b>Mínimo</b>	96,440	87,550	1,710
<b>Máximo</b>	97,070	88,120	2,250
<b>Longitud</b>	630	570	540

La base de datos está compuesta por 114 sondajes y 11,699 datos correspondientes a la ley de oro (en ppm). La zonificación suministrada da cuenta de la presencia de una zona de óxidos en la parte superior del yacimiento y una zona de sulfuros en la parte inferior reportada para cada uno de los sondajes a partir de la cual se estimó la superficie de contacto entre óxidos y sulfuros mediante un kriging a través de un algoritmo suministrado en el archivo kf2d.exe (compilado en Fortran).

A continuación se presentan diferentes vistas (Figuras 2 a 8) que ilustran la ubicación de los sondajes, su inclinación, su distribución espacial, la superficie de separación de óxidos y sulfuros estimada, la topografía o superficie de terreno suministrada y simbolizaciones por zonificación y por leyes de Au.

**Figura 2. Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes y topografía (leyes de oro).**



**Figura 3. Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes y topografía (óxidos y sulfuros).**

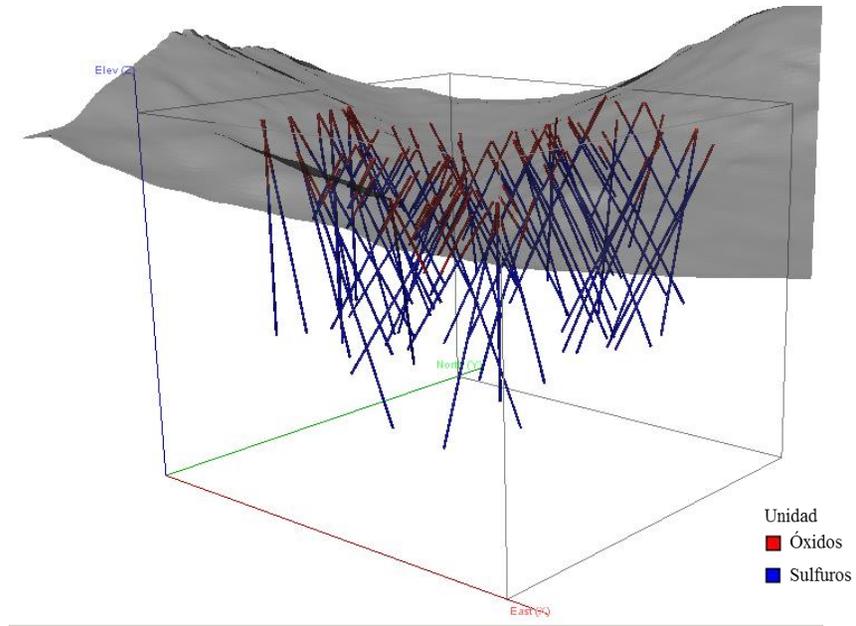


Figura 4. Vista en planta del yacimiento con la disposición de los sondajes y ley de oro.

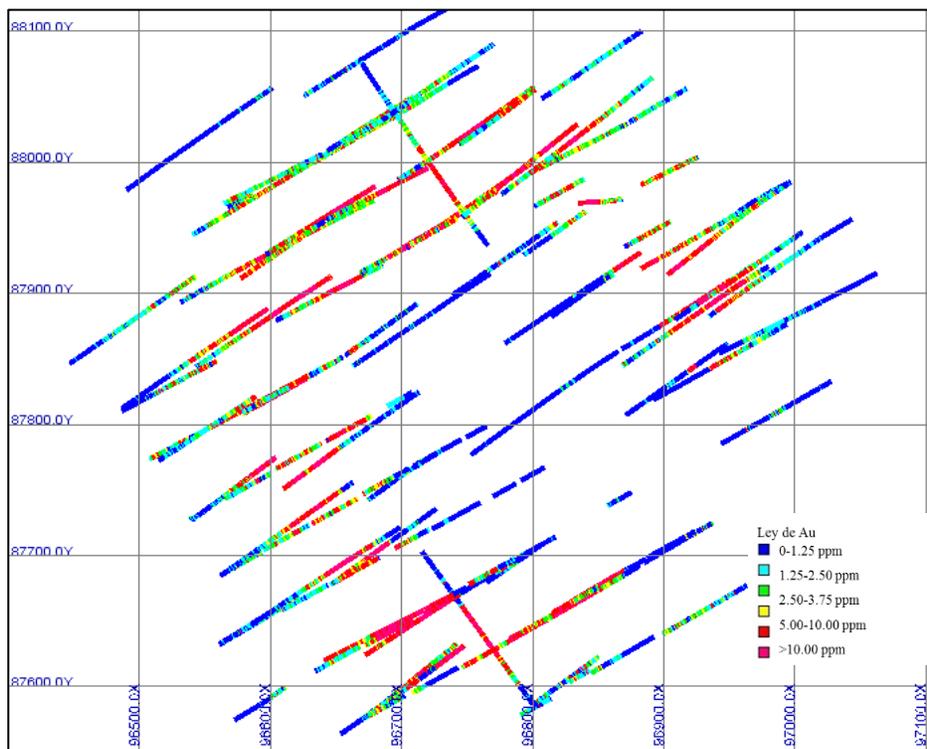


Figura 5. Vista en planta (corte en la cota 2085)

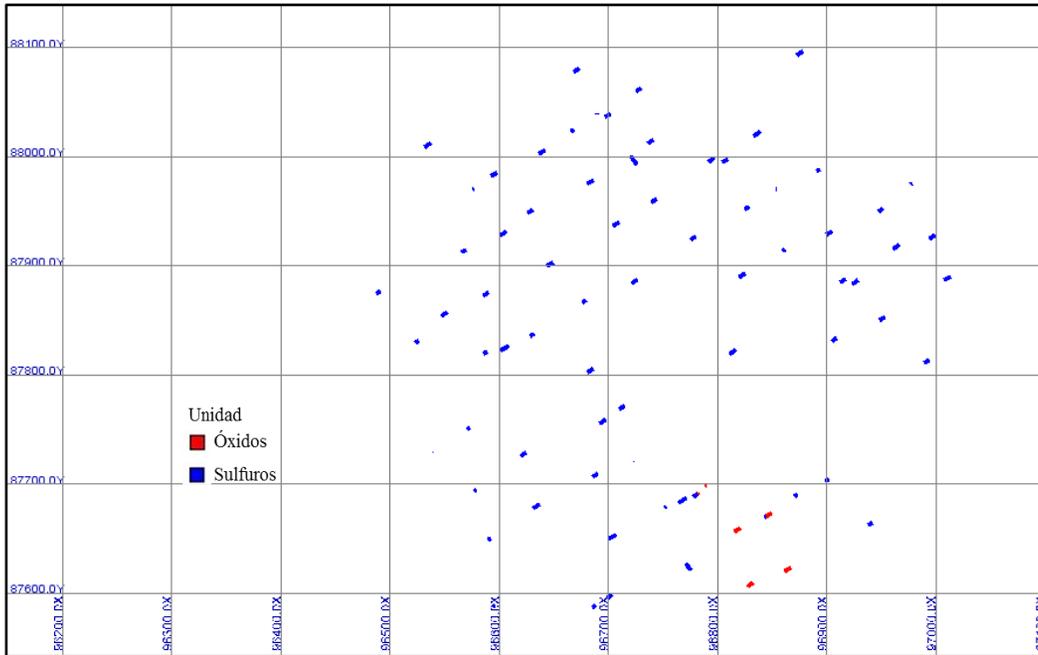


Figura 6. Vista en planta (corte en la cota 2169)

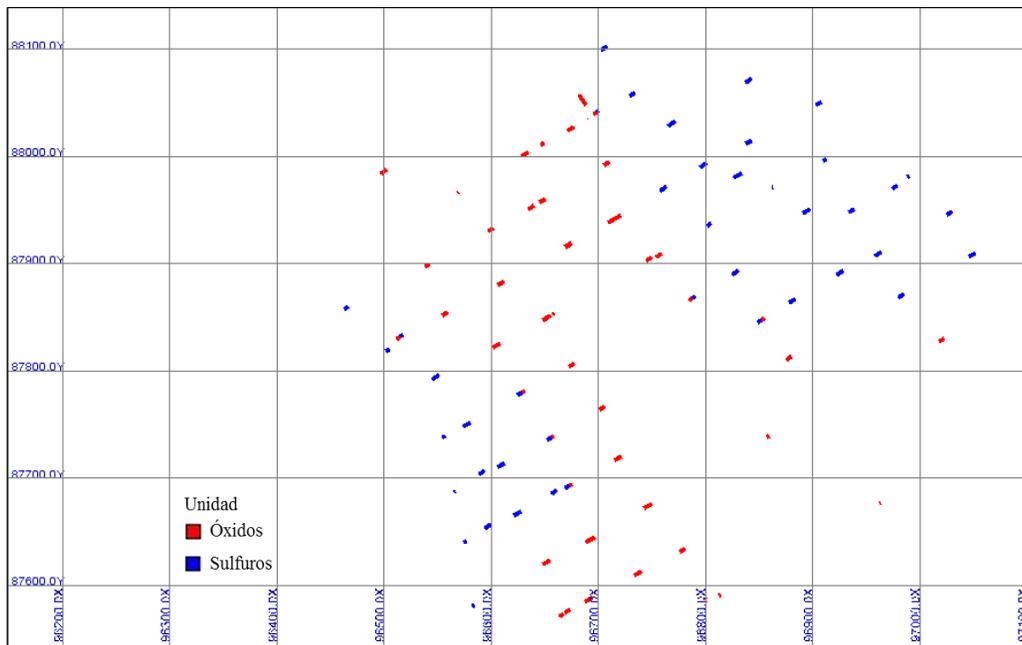


Figura 7. Vista en corte vertical (Plano ZY – Corte en coordenada Este 96966).

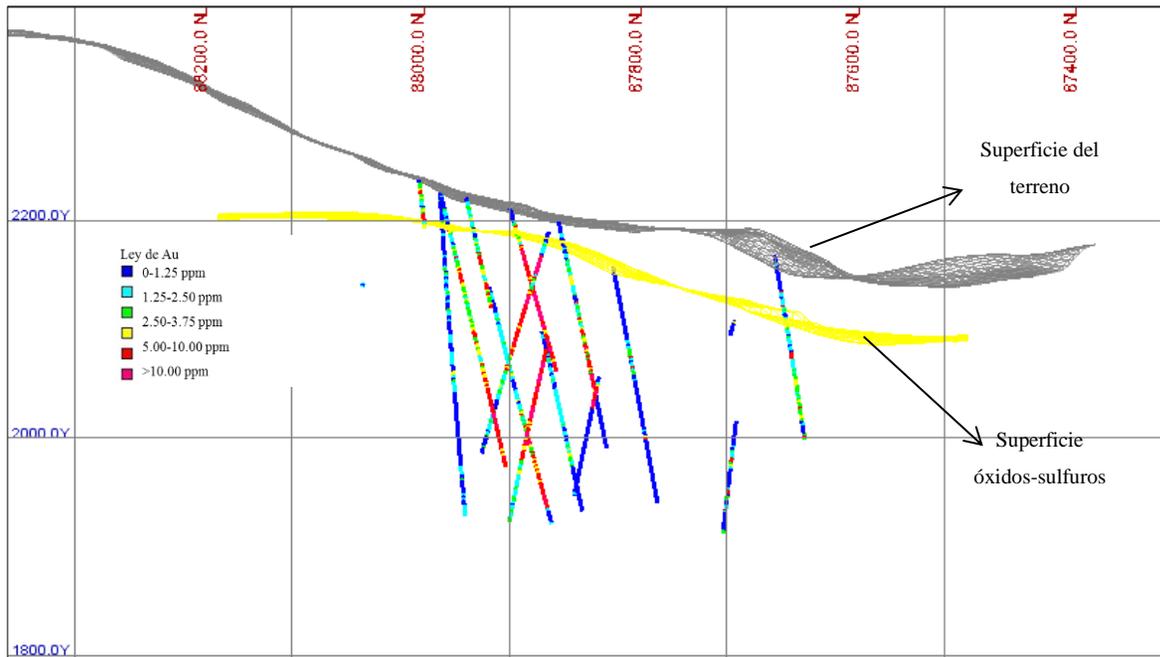
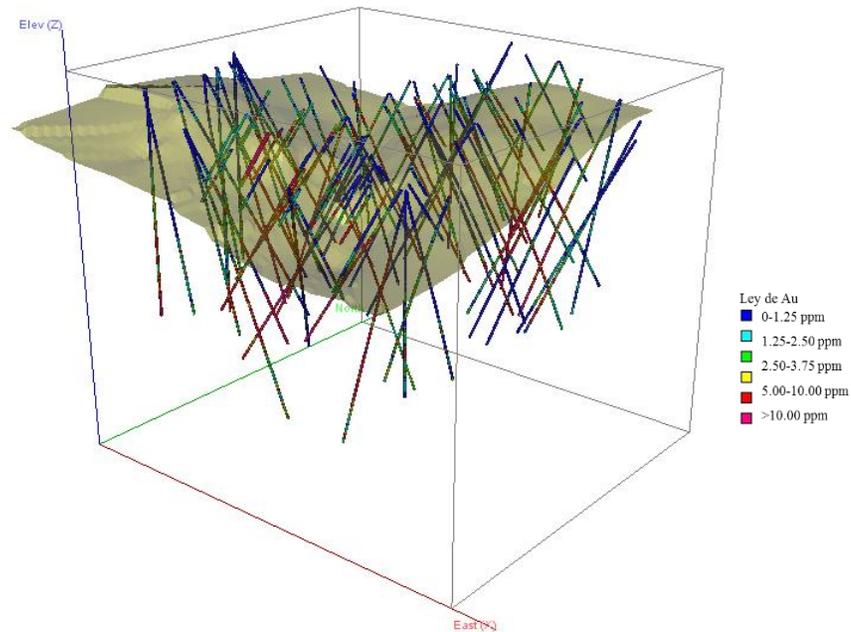


Figura 8. Isométrico del yacimiento con disposición de los sondajes y superficie óxidos-sulfuros.



Tal como se observa en las figuras anteriores, el muestreo efectuado a través de sondajes no está desarrollado en una malla regular y se encuentran zonas preferencialmente muestreadas. Sin embargo, se alcanza a apreciar en las Figuras 5 y 6 que la malla de sondajes tiene distancias aproximadas a una malla 50 m x 50 m (con una rotación cercana a los N35°-40°W).

En la vista (Z-Y) de la Figura 7, se puede apreciar cómo es el comportamiento de la ley de oro respecto la existencia clara de dos tipos de mineralización observados (óxidos y sulfuros). Como allí se aprecia, las mayores leyes de oro están presentes en la unidad de sulfuros. En el siguiente capítulo se evaluará con más en detalle la existencia de estas unidades y se analizará su uso como unidades de estimación, en relación al análisis estadístico de los datos.

#### **4. Análisis exploratorio de datos**

##### **4.1 Verificación de base de datos**

En primer lugar se procedió a revisar la consistencia de la base de datos. Esto consistió en verificar que los datos reportados para cada uno de los sondajes (Header) fuera consistente con las tablas de ensayos de laboratorio (Assays), alineación de sondajes (Survey) y tipología

geológica (Zone). Es decir, verificar longitudes de sondajes y que no haya traslapes o gaps de información.

Al efectuar este análisis se encontró, mediante la herramienta de validación de sondajes de GEMS (ver Anexo 10.1), que el sondaje SL-13 presenta una mayor longitud en la Tabla Assays (longitud 68 m) respecto a la reportada en la tabla Header, Survey y Zone (longitud 42 m). En la práctica correspondería preguntar al geólogo para completar la información faltante y ajustar la base de datos. Sin embargo, dado que este proyecto corresponde a un ejercicio académico se harán las siguientes suposiciones para organizar la base de datos: para el caso de la tabla Survey se asumió una continuidad del Azimut y DIP igual al valor del último tramo reportado, para la tabla Zone se asumió que el valor restante de longitud correspondería a Zona tipo 2 (del metro 42 al 68) dado que en promedio la zona 1 tiene una profundidad alrededor de los 45 m en sondajes cercanos; y finalmente se ajustó la longitud total del pozo en la tabla Header a 68 m.

#### **4.2 Estadísticas de datos suministrados**

En primer lugar se procedió a la obtención de las estadísticas básicas de la base de datos de sondajes tal como fue suministrada. A continuación se presentan los principales resultados de las estadísticas básicas y los histogramas (normal y acumulado); ver Figuras 9 a 12.

Figura 9. Histograma normal de ley de oro, datos originales.

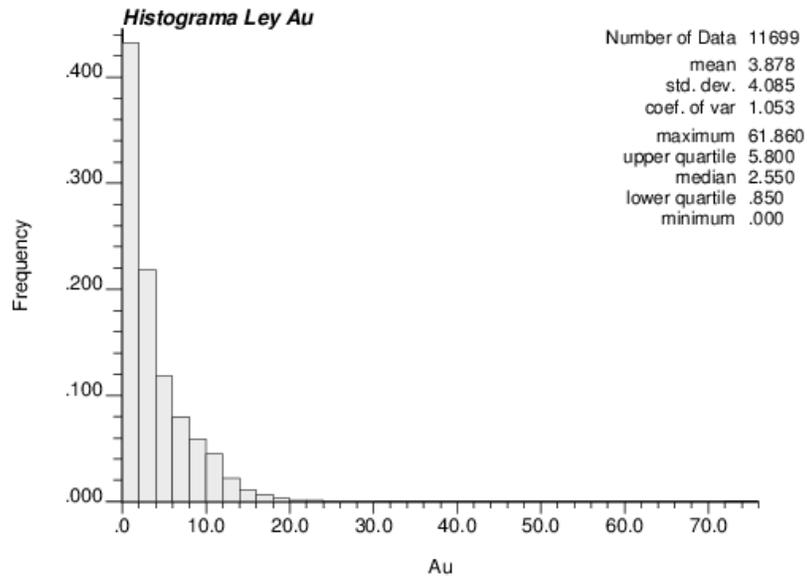


Figura 10. Histograma acumulado de ley de oro, datos originales.

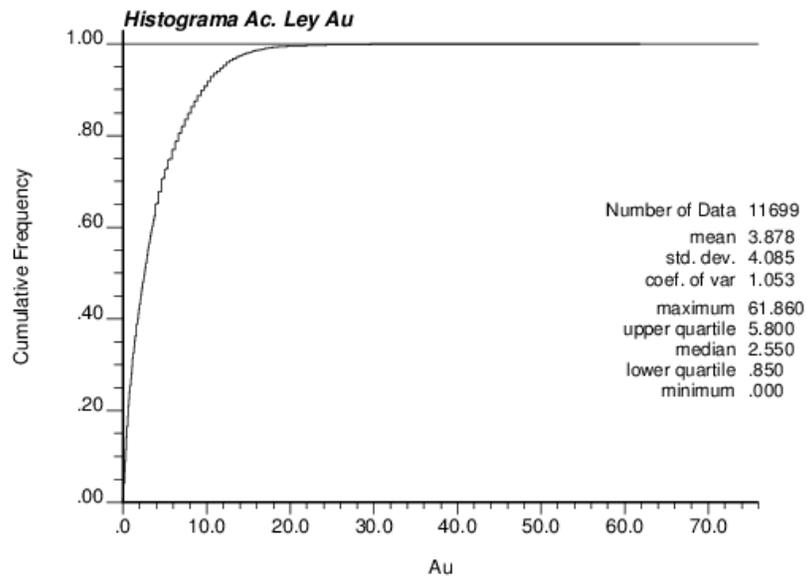


Figura 11. Probability plot de ley de oro, datos originales (escalas normales).

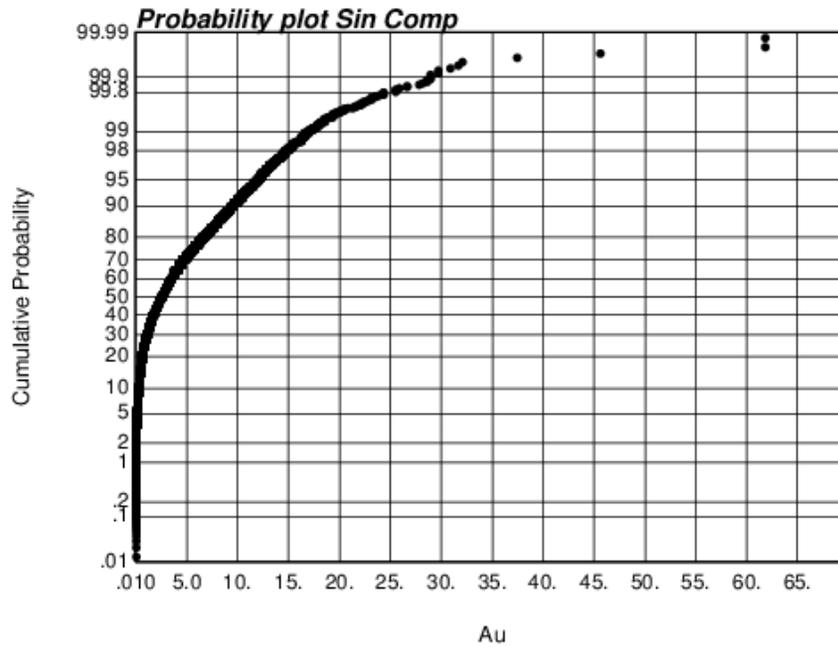
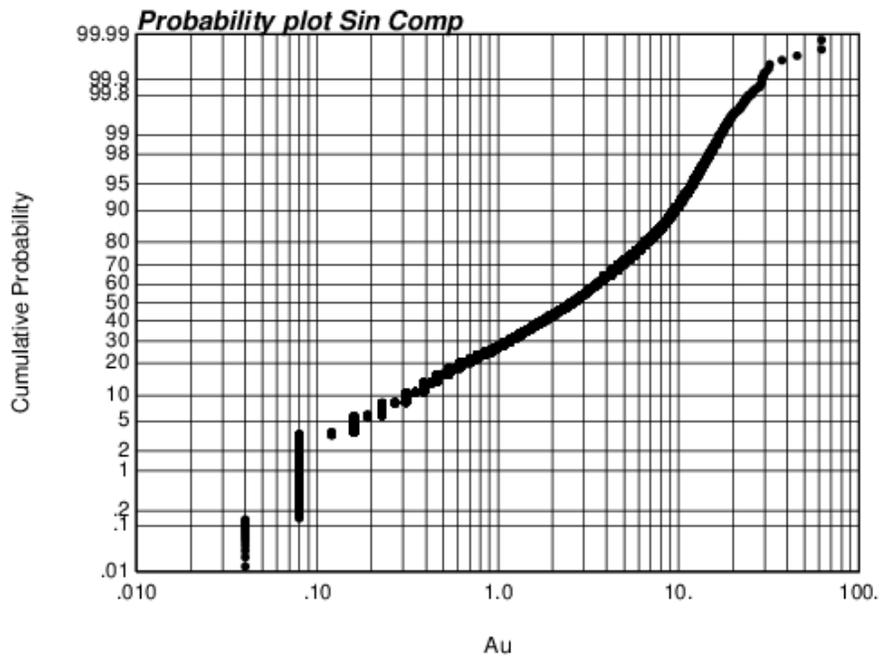


Figura 12. Probability plot de ley de oro, datos originales (escala logarítmica).



Como se puede observar en las ilustraciones anteriores (Figura 11 y 12), la distribución de la ley de oro no obedece a una distribución normal (dado que no corresponde a una línea recta – Figura 11). Por otro lado, pareciera semejar a una distribución log normal en un rango de leyes (entre 1-7 ppm) donde se observa un comportamiento lineal; sin embargo se observan comportamientos no lineales en las zonas de baja ley y de alta ley; lo cual es típico en yacimientos de oro. Más adelante se analizará la posible presencia de dos poblaciones de datos.

De igual forma, tal como puede observarse en la Figura 11, gran parte de las leyes obtenidas en los análisis (alrededor del 70%) están por debajo de una ley de 5 ppm. Otro 20% de las leyes se encuentran entre 5 y 10 ppm y el restante 10% son superiores a 10 ppm. De este último menos del 1% corresponde a leyes superiores a 20 ppm.

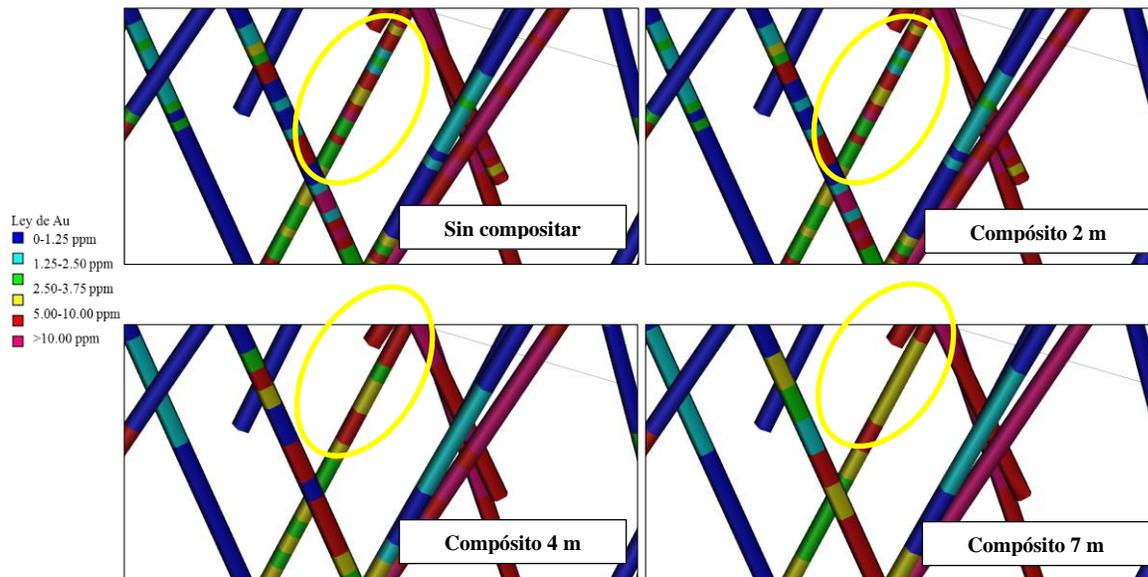
Es importante también mencionar que de acuerdo al análisis de los datos suministrados, se observan algunos datos outliers (como un valor máximo de 61.86 ppm); lo cual es importante al momento de efectuar estimaciones dado la influencia que pueden representar estos valores en dicho proceso. Por tal motivo se efectuará un análisis posterior a la obtención de los compósitos dado que dicho proceso tiende a reducir los valores altos al obtener los promedios ponderados para cada compósito, y verificar la necesidad o no de efectuar alguna corrección o transformación de los datos para efectos de la estimación.

### **4.3 Composición**

Dado que los datos sobre los que se trabaja pueden no estar bajo un mismo volumen de medición (soporte), bien sea por efectos de la operación de perforación, decisión del geólogo, entre otros aspectos técnicos; es necesario generar compósitos, es decir, soportes de largo constante, para poder calcular estadísticas con cierta homogeneidad. Este proceso se denomina composición.

Para el caso particular del presente proyecto, se solicitaron compósitos de las leyes de oro de 2, 4 y 7 m, es decir tramos de sondajes de 2, 4 y 7 metros respectivamente que representarán una ley de oro. En la Figura 13 se pueden observar las diferencias al efectuar el compósito de los sondajes.

**Figura 13. Comparación de sondajes compositados.**



#### 4.3.1 Estadísticas de compósitos

A continuación, en la Tabla 2 se presentan las estadísticas básicas de los datos sin compositar y de los compósitos para 2, 4 y 7 m.

**Tabla 2. Medias y varianzas para datos crudos y compósitos.**

Compósito	Sin Compositar	Compósito 2 [m]	Compósito 4 [m]	Compósito 7 [m]
Media [ppm]	3.878	3.844	3.842	3.848
Varianza	16.685	16.651	14.928	13.855

Como se puede observar de la tabla anterior, a medida que se incrementa el tamaño del compósito (es decir, se incrementa el soporte de medición de los datos) se reduce la variabilidad de los mismos, expresada en términos de la varianza. Esto corresponde al denominado efecto soporte. Igualmente como se verá más adelante se reduce la cantidad de datos, lo cual es también uno de los efectos del cambio de soporte.

Respecto a la media, no se produce variación significativa lo cual está explicado en que los compósitos se construyen como un promedio ponderado por los largos de sondaje que

hacen parte de determinado tramo del Compósito; lo cual es viable realizar dado que la variable es aditiva en este caso, y por ende la media debe conservarse.

#### 4.3.2 Efecto Soporte

Como se explicó en el numeral anterior, el efecto soporte está relacionado con una menor variabilidad de los datos y un menor número de datos al incrementar el tamaño del soporte. En las Tablas 3 a 6, puede observarse como la cantidad de datos disminuye a medida que se incrementa el tamaño del compósito.

Respecto a los coeficientes de simetría (skewness) se observa igualmente como se reducen a medida que el tamaño del compósito se incrementa, lo cual indica que tienden a simetrizarse, lo cual es explicado igualmente por el efecto soporte.

**Tabla 3. Estadísticas básicas por compósitos para zona de óxidos.**

	Datos	Max	Min	Media	Var	Skewness	Curtosis
<b>Sin comp.</b>	2530	61.860	0.000	2.351	11.535	5.077	57.671
<b>2 metros</b>	2616	61.860	0.000	2.263	11.322	5.112	58.428
<b>4 metros</b>	1306	37.500	0.000	2.250	9.462	3.578	25.237
<b>7 metros</b>	750	25.070	0.000	2.254	8.494	2.992	16.053

**Tabla 4. Estadísticas básicas por compósitos para zona de sulfuros.**

	Datos	Max	Min	Media	Var	Skewness	Curtosis
<b>Sin comp.</b>	9169	61.860	0.000	4.299	17.286	1.819	10.380
<b>2 metros</b>	9205	61.860	0.000	4.293	17.253	1.820	10.391
<b>4 metros</b>	4635	37.110	0.000	4.291	15.552	1.416	5.770
<b>7 metros</b>	2664	24.130	0.070	4.297	14.447	1.182	4.135

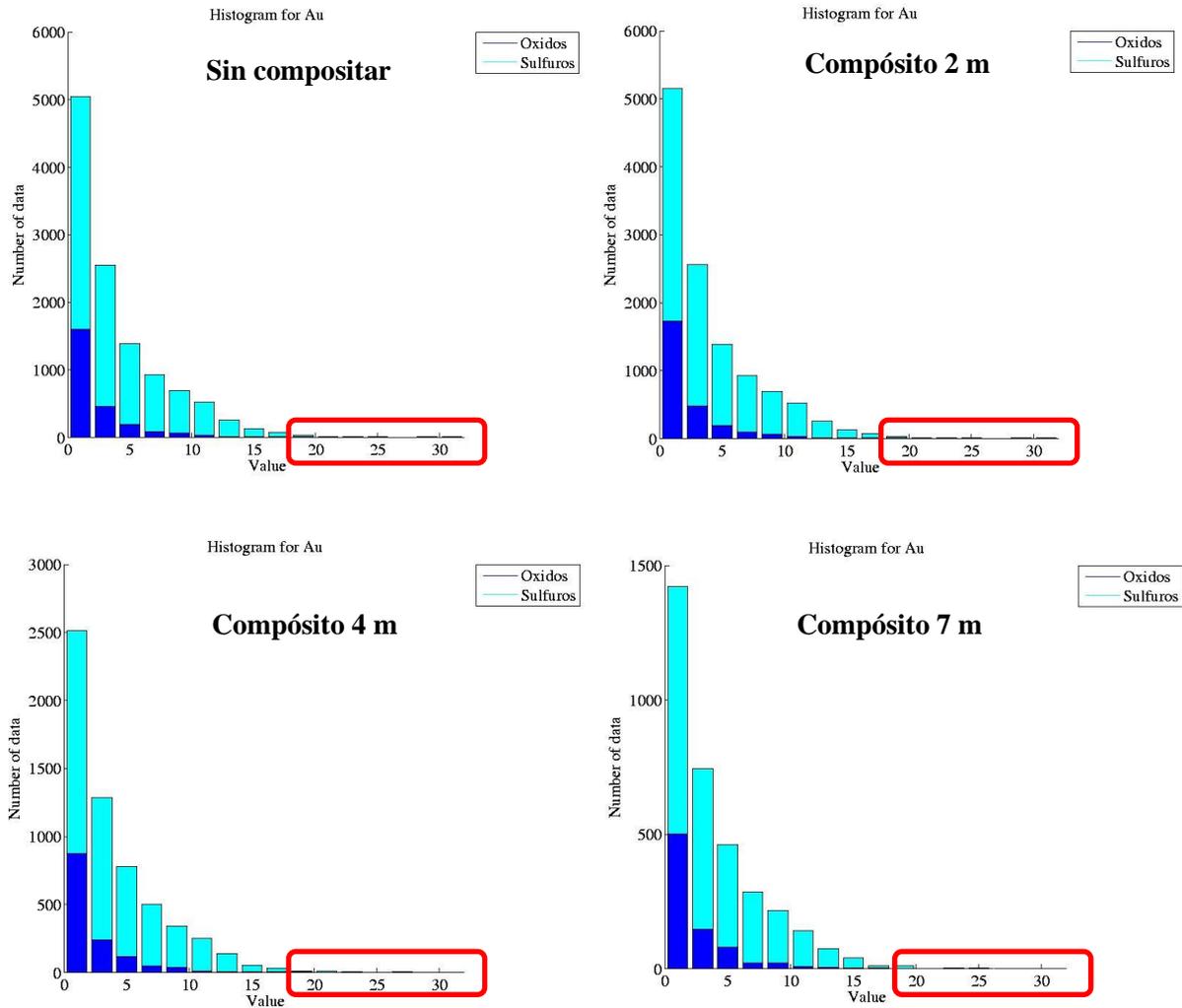
**Tabla 5. Estadísticas básicas por compósitos (global).**

	Datos	Max	Min	Media	Var	Skewness	Curtosis
<b>Sin comp.</b>	11699	61.860	0.000	3.878	16.685	2.208	14.550
<b>2 metros</b>	11821	61.860	0.000	3.844	16.651	2.209	14.540
<b>4 metros</b>	5941	37.500	0.000	3.842	14.928	1.668	7.220
<b>7 metros</b>	3414	25.070	0.000	3.848	13.855	1.403	4.994

De igual forma, como fue explicado anteriormente, se presenta una reducción en la varianza y dado que los datos tienden a concentrarse más cerca al valor de la media se ve como se estrechan los histogramas presentados en la Figura 14 (se observa menor cantidad de

datos mayores a 20 ppm a medida que el tamaño del compuesto se incrementa; al igual que la escala de la ordenada de la gráfica – menor cantidad de datos).

**Figura 14. Comparación de histogramas luego de compositar. \***

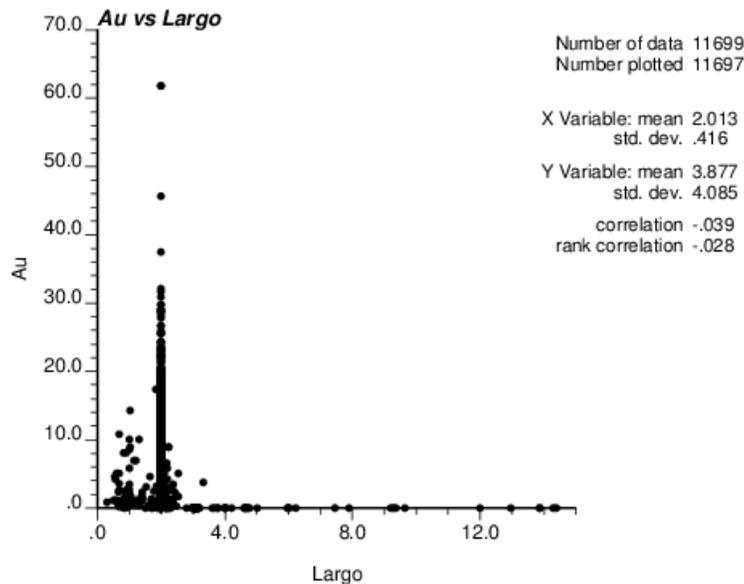


\* Para mejor visualización se graficaron rangos de clase de 2 ppm y 15 rangos para todos los gráficos. En anexo 10.2 se presentan los histogramas para separados para óxidos y sulfuros para cada compuesto y datos originales.

### 4.3.3 Justificación de compósitos de 4 m

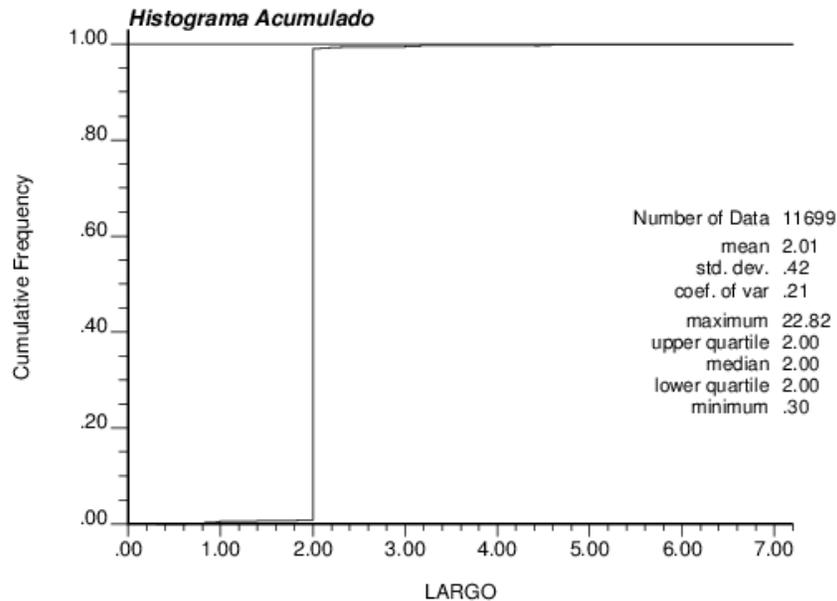
Cuando se construyen compósitos es importante determinar la longitud adecuada a ser empleada de manera que no se discretice la información o no se generalice, evitando suponer valores no muestreados o perdiendo cantidad de datos importantes a la hora de efectuar la estimación. Es por esto que es importante considerar el tamaño adecuado para compositar y una de las técnicas empleadas para ello es construir un gráfico de dispersión contrastando las longitudes de las muestras vs. las diferentes leyes obtenidas en los análisis químicos de laboratorio. A continuación se presenta el diagrama de dispersión de las muestras originales (ver Figura 15).

**Figura 15. Diagrama de dispersión de largo de muestra vs. ley de oro.**



Tal como se aprecia en la figura anterior, la mayor parte de las muestras recolectadas tiene una longitud de 2 metros y en términos generales la media es bien cercana a este valor (2.013 m). De acuerdo a esto, podría decirse que un valor adecuado para obtener los compósitos sería de 2 m o múltiplos de esta unidad. Esto puede verse con mayor claridad si se analiza la frecuencia acumulada en un histograma de las longitudes de muestras (ver Figura 16). Aquí se ve cómo más del 95% de los datos presentan longitudes de 2 metros.

**Figura 16. Histograma acumulado de largo de muestra.**



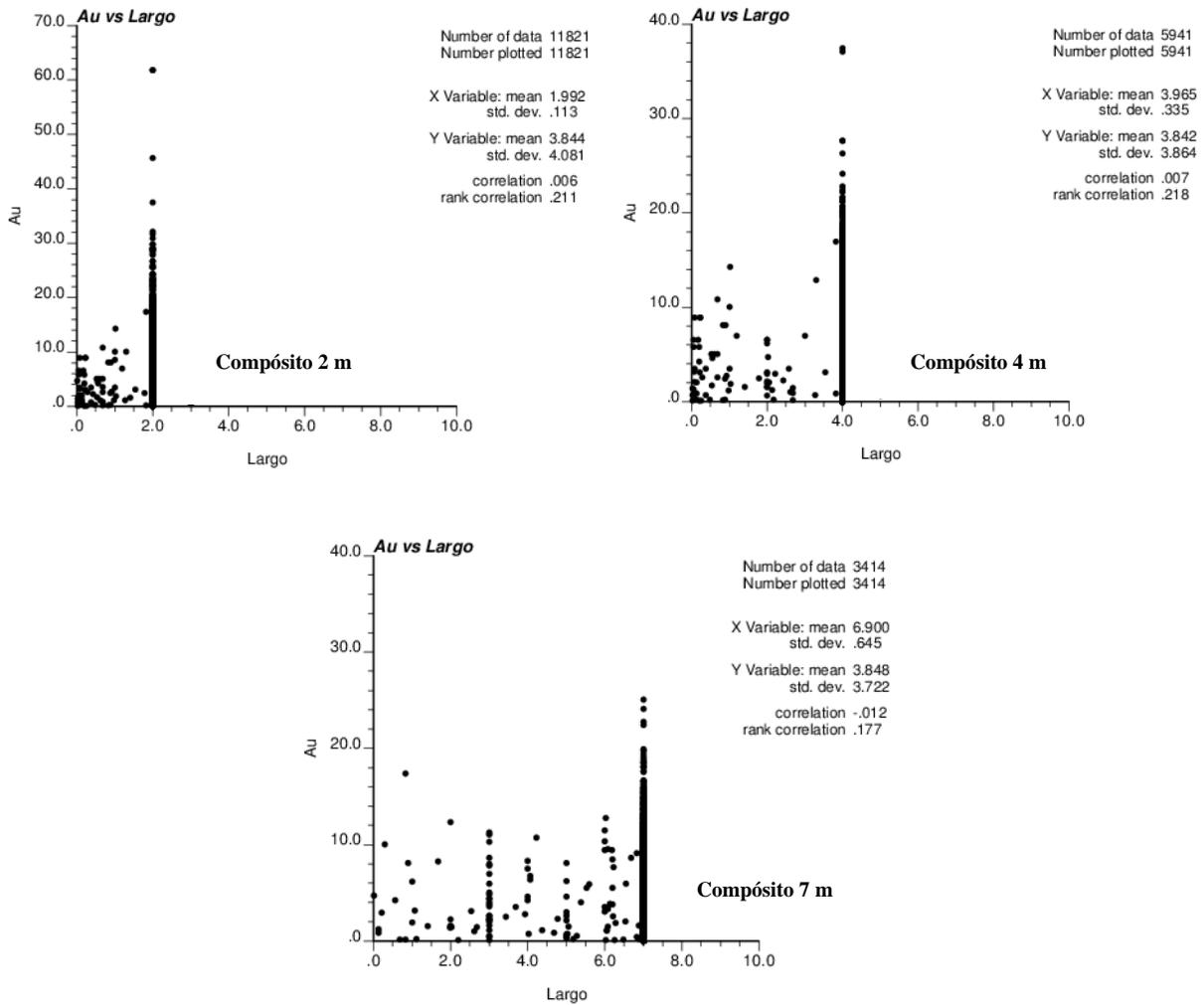
Dado entonces que una medida adecuada para compositar es una longitud de 2 metros, es importante analizar el tema operativo de explotación y de selectividad de acuerdo al método de explotación a emplear. Como se ha mencionado, el yacimiento se pretende explotar por el método de rajo o cielo abierto. Esto influye en la toma de decisiones respecto a los mejores compósitos y tamaño de bloques a emplear en la estimación. Dado que bloques muy pequeños implicarían una gran selectividad pero tal vez menos productivos a la hora de hablar de un método de explotación a cielo abierto, es posible plantear como un tamaño de compósito adecuado valores múltiplos de 2 metros; considerando igualmente que el número de datos sea representativo para poder efectuar las estimaciones posteriormente. En este caso particular, un compósito de 4 metros podría claramente emplearse, lo cual es la sugerencia de la guía del proyecto.

#### **4.3.4 Análisis de colas de compósitos**

Dado que como resultado del proceso de compositación se obtienen fragmentos inferiores al tamaño del compósito en la parte inferior de cada sondaje, es importante determinar si esto puede presentar algún inconveniente a la hora de efectuar una estimación. Para ello es importante analizar las longitudes de las colas en relación a las leyes de oro

mediante diagramas de dispersión. A continuación se presentan estos diagramas para cada uno de los compósitos obtenidos en el presente proyecto (ver figura 17).

**Figura 17. Diagramas de dispersión para análisis de colas.**



Si bien se observa que la varianza asciende al incrementarse el tamaño del compósito (explicado en que una mayor longitud genera la posibilidad de tener mayores colas -mucho más evidente en el compósito de 7 m debido a que no es un múltiplo de 2 m el cual es tamaño promedio de las muestras); en las gráficas anteriores no se observan mayores inconvenientes con las leyes reportadas en las colas, es decir, comportamientos no deseados (como una

deriva) dado que estas siempre presentan leyes inferiores a las reportadas en las leyes de los compósitos.

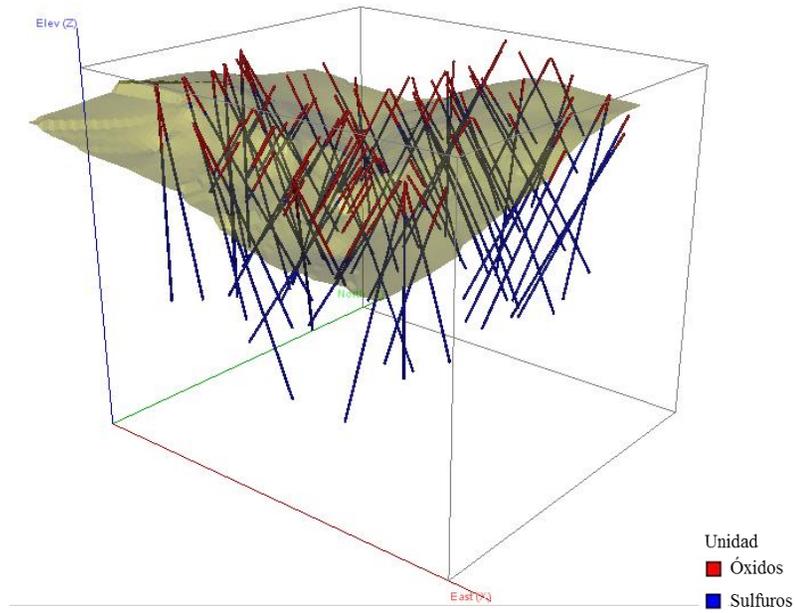
#### **4.4 Unidades de Estimación**

Definir las unidades de estimación en el cálculo de recursos y reservas de un yacimiento, es un factor importante de manera de garantizar el supuesto de estacionaridad de los datos; es decir, efectuar las estimaciones con poblaciones homogéneas de datos. Es importante entonces, realizar un análisis para determinar cuáles son las unidades de estimación más adecuadas dependiendo de la litología, mineralización y alteraciones de un depósito y del comportamiento estadístico de las poblaciones combinadas de estas características, atendiendo a criterios de consistencia espacial, génesis de los procesos geológicos y mineralógicos y orden cronológico de los eventos que dan origen a las leyes, que para este caso, son de oro.

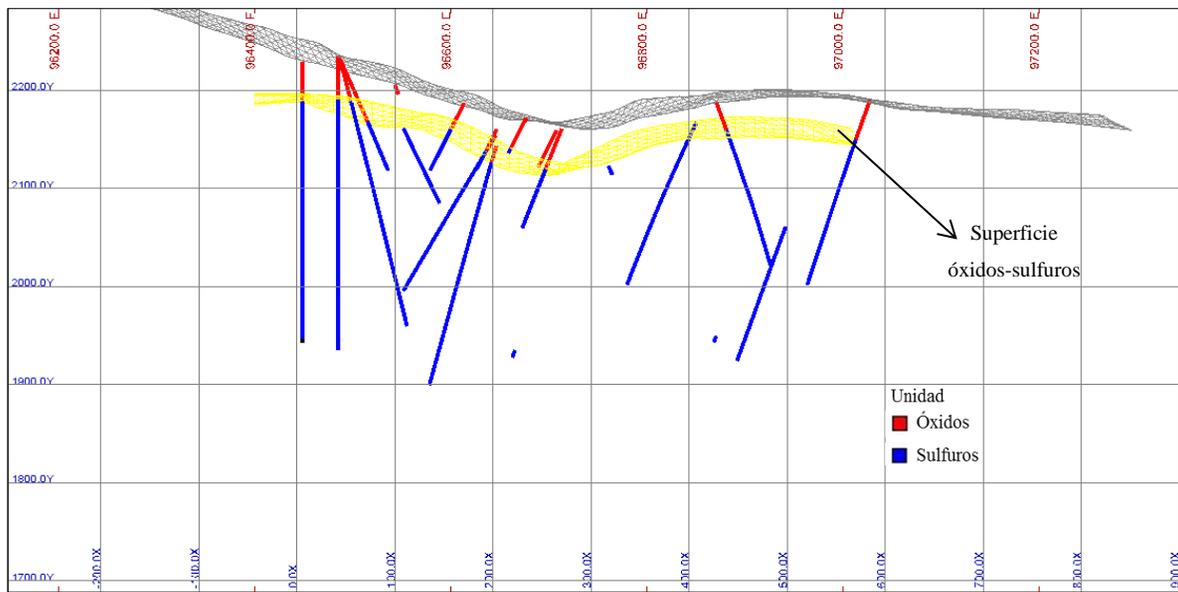
Sin embargo, para el presente proyecto, sólo se cuenta con información relacionada a la zonificación entre óxidos y sulfuros (ver figuras 18 a 20); zonas que a la postre se convertirán en las unidades de estimación. Es por esto que el análisis que a continuación se efectuará, está enfocado en determinar la viabilidad de emplear estas zonas como unidades de estimación conforme a la información disponible.

En primer lugar, es importante analizar el comportamiento estadístico de los datos analizando las distribuciones por categorías. Para ello se emplearán diagramas de caja (Box Plot). En la Figura 21 se presentan los box plot para el presente proyecto.

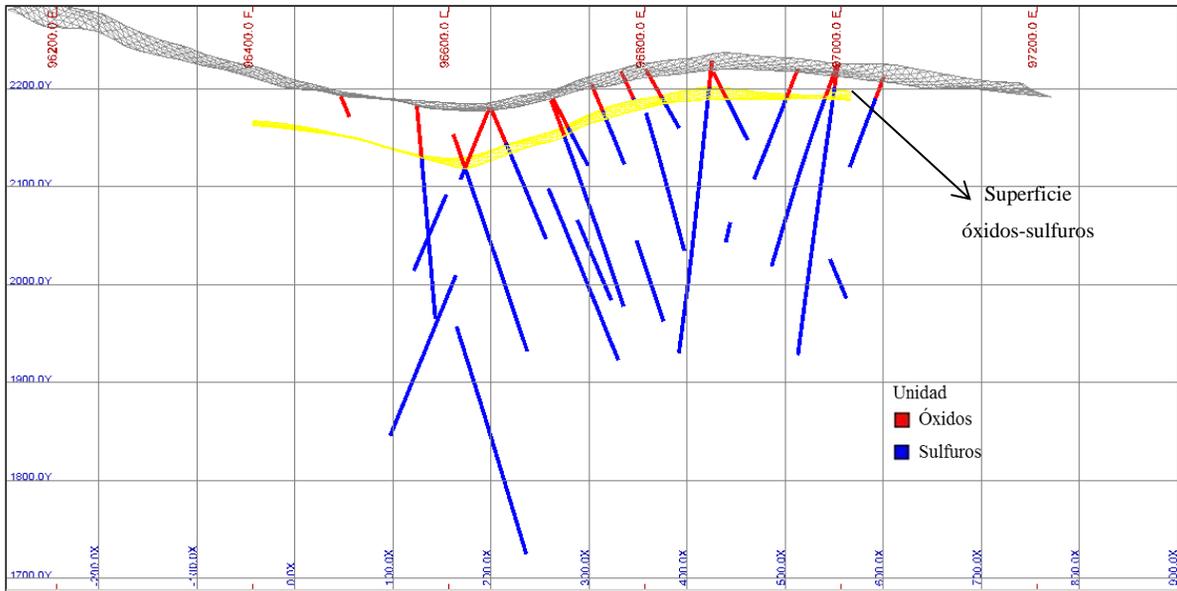
#### **Figura 18. Isométrico del yacimiento con la disposición de los sondajes y superficie**



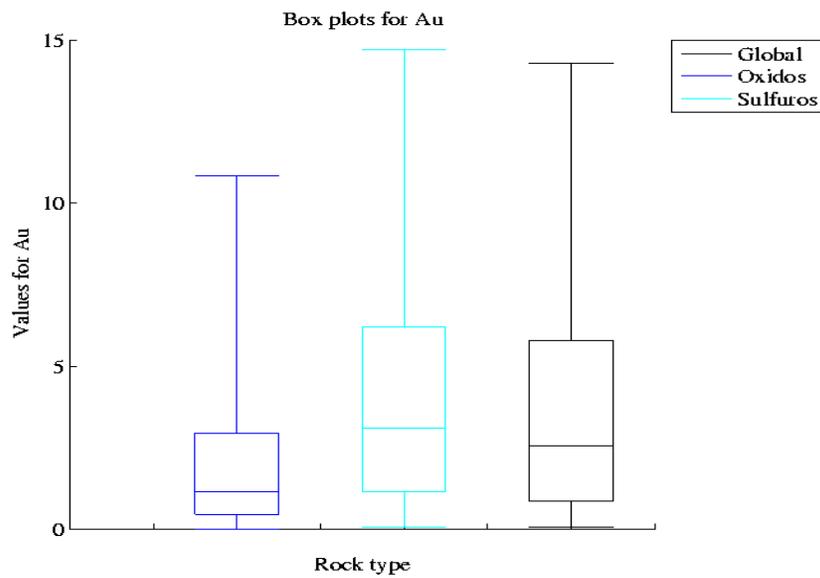
**Figura 19. Vista en corte vertical (Plano ZX – Corte en coordenada Norte 87821)\***



**Figura 20. Vista en corte vertical (Plano ZX – Corte en coordenada Norte 87960).**



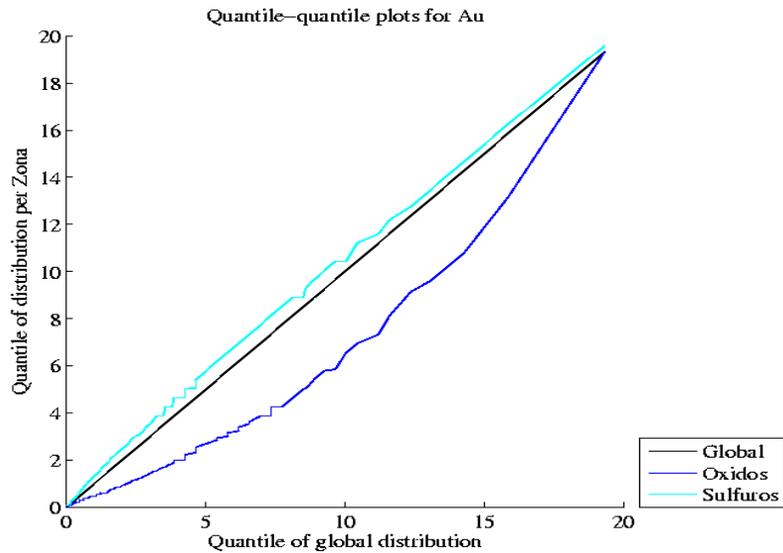
**Figura 21. Box plot por categorías y global.**



Se observa claramente que la distribución de los datos pertenecientes a la categoría óxidos presenta un rango intercuartil más estrecho (de 2.48 ppm con cuartiles inferior y superior entre 0.46 y 2.94 ppm respectivamente) que la distribución de los datos de la categoría sulfuros (de 5.03 ppm con cuartiles inferior y superior de 1.16 y 6.19 ppm respectivamente), siendo esta

última similar a la de la distribución global de los datos; lo cual se puede observar también en el siguiente QQ plot (Figura 22).

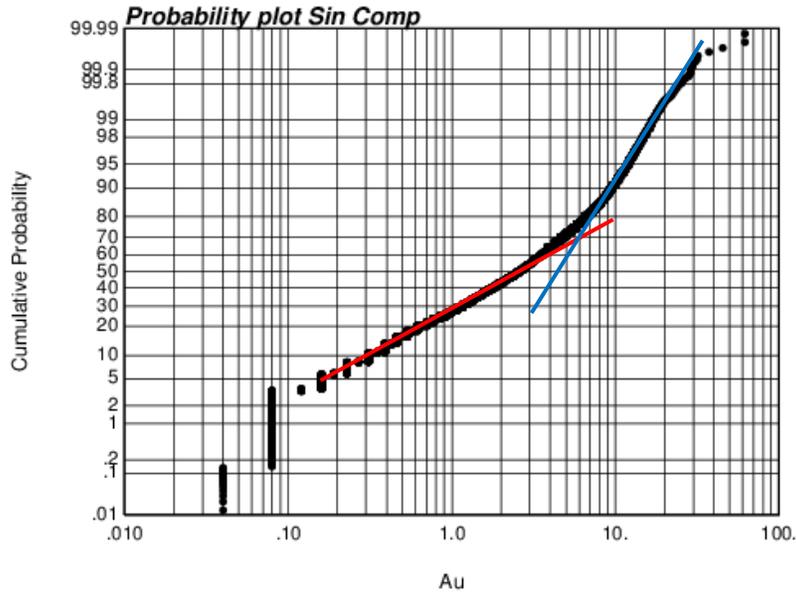
**Figura 22. QQ plot por categorías y global.**



Al comparar la distribución cuantil por cuantil de la distribución global (diagonal de la gráfica) con las distribuciones de las categorías óxidos y sulfuros, se observa que la distribución de los óxidos y la distribución de los sulfuros son claramente diferentes. Sin embargo, se observa cierta similitud entre la distribución global y la de sulfuros, lo cual confirma lo observado en los box-plot.

Otra herramienta que permite efectuar análisis de poblaciones diferentes es el gráfico de probabilidad.

**Figura 23. Gráfico de probabilidad (análisis de poblaciones).**



Como se puede ver en el gráfico de probabilidad se presume la presencia de dos poblaciones de datos dado el comportamiento de los mismos. Este análisis induce pensar en la presencia de las poblaciones anteriormente mencionadas correspondientes a óxidos y sulfuros.

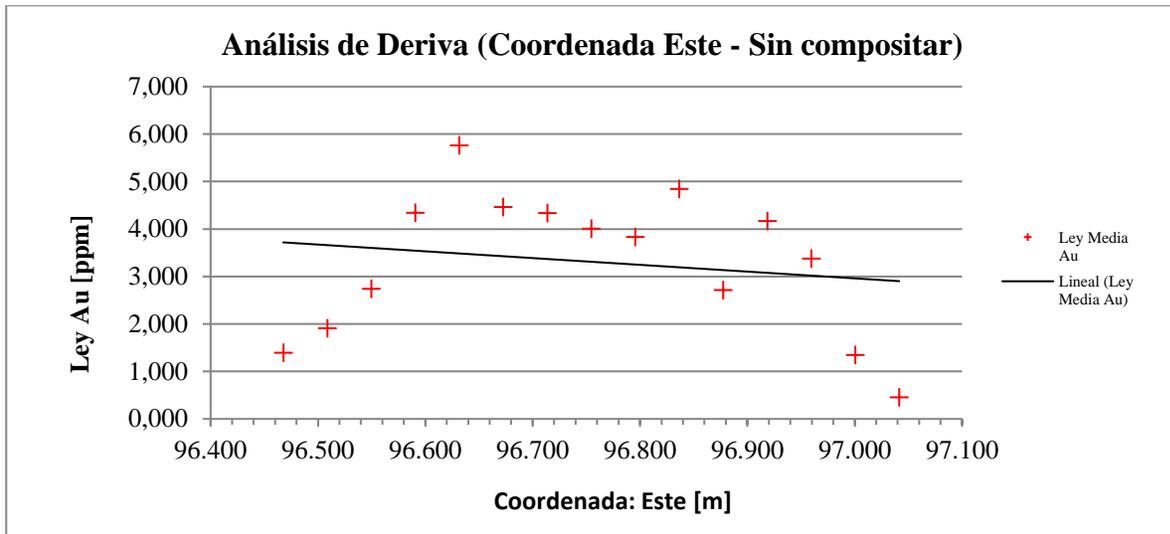
Adicional a los análisis efectuados, es importante considerar un análisis de deriva con medias condicionales que podría aportar información relacionada con el comportamiento de los datos asociados a poblaciones litológicas y su componente espacial (a lo largo de los ejes este, norte y elevación).

#### 4.4.1 Análisis de deriva

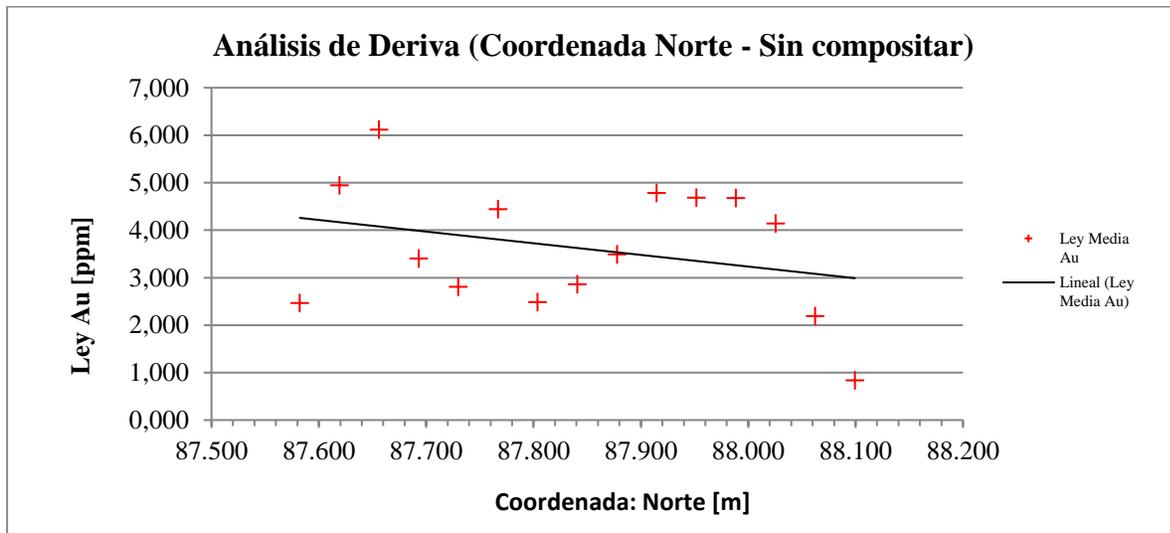
Se realizó el estudio de Deriva para saber si hay presencia de algún fenómeno que no es estacionario, y adicionalmente analizar si las categorías de clasificación del orden geológico presentan alguna influencia en comportamientos con cierta tendencia. Para ello, se grafican con las medias condicionales de la ley de oro con cada uno de los ejes X (este), Y (norte) y Z (cota).

El análisis de la deriva se realiza para los datos sin compositar y el compósito de 4 m, el cual será el empleado para la estimación. En anexos (numeral 10.3) se pueden observar los demás compósitos. Las gráficas fueron construidas con 15 datos de media condicional de ley de oro.

**Figura 24. Media condicional ley de oro vs. coordenadas este (sin compositar).**



**Figura 25. Media condicional ley de oro vs. coordenadas norte (sin compositar).**



**Figura 26. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (sin compositar).**

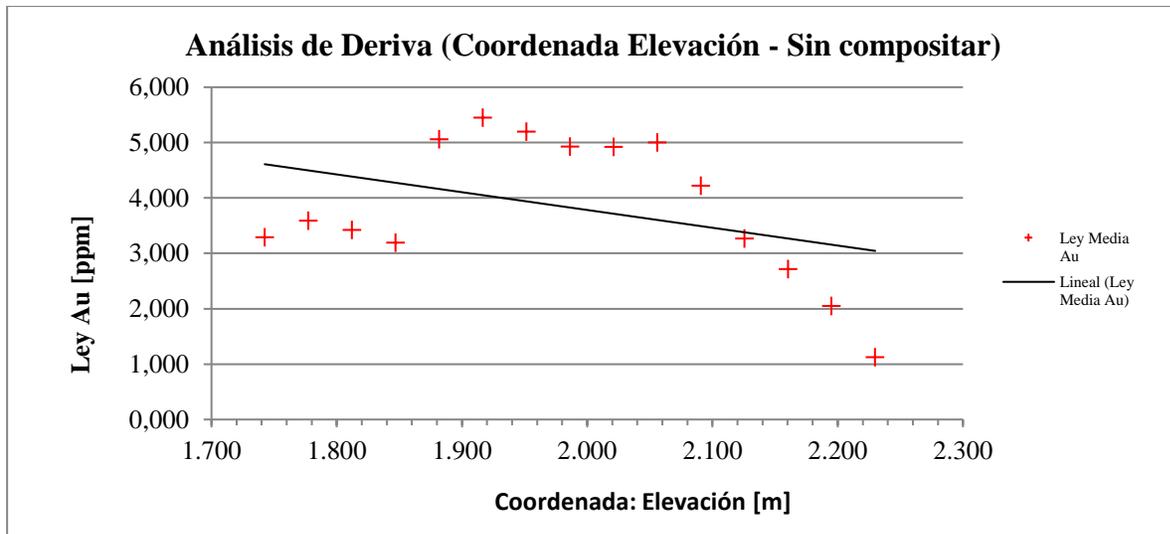


Figura 27. Media condicional ley de oro vs. coordenadas este (Comp. 4 m).

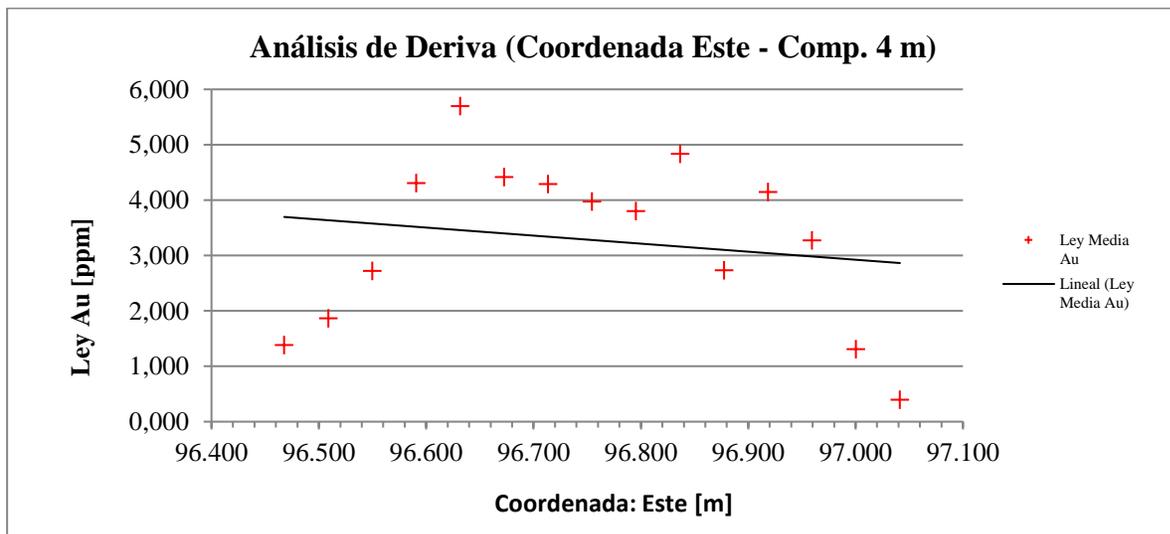
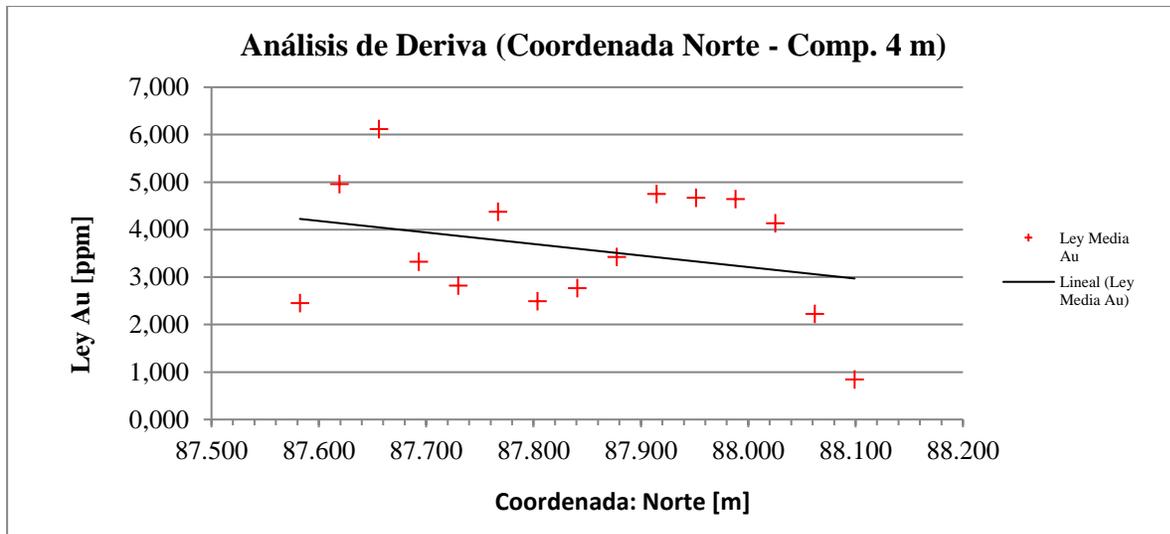
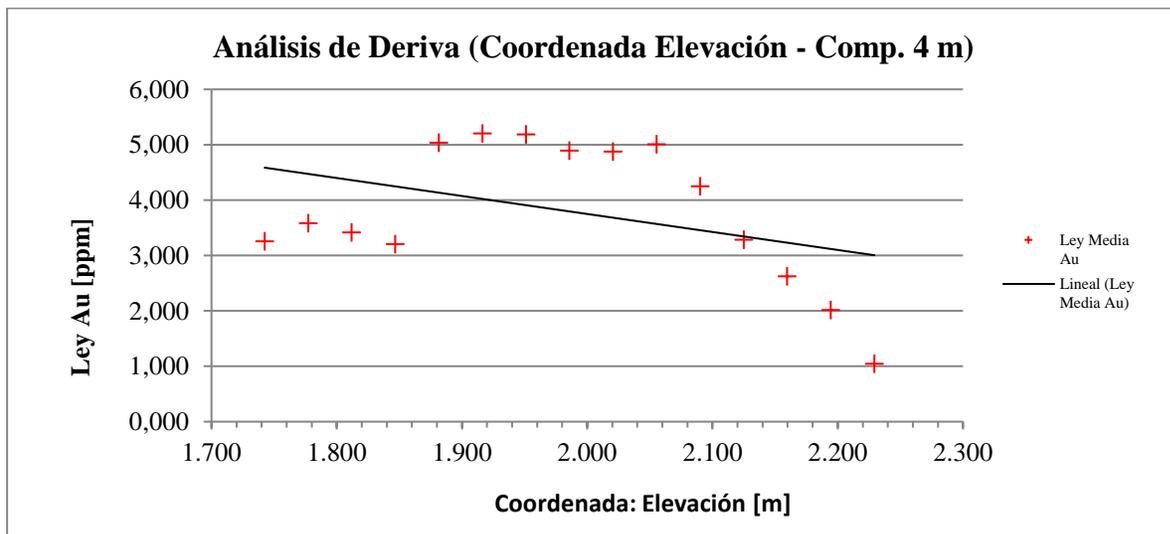


Figura 28. Media condicional ley de oro vs. coordenadas norte (Comp. 4 m).



**Figura 29. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 4 m).**

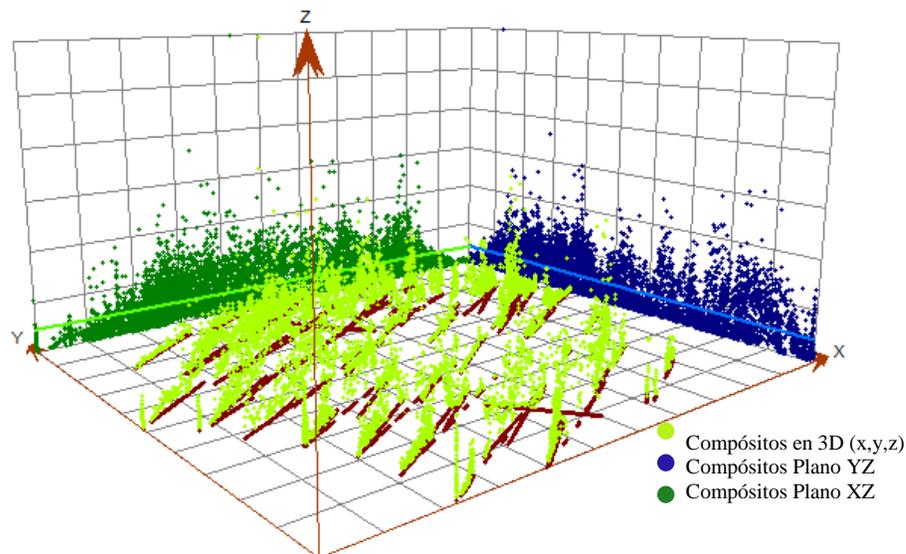


De las figuras anteriores se puede concluir la existencia de derivas en todas las direcciones asociadas a las leyes condicionales por sectores. Sin embargo, se observa una mayor tendencia en las coordenadas relacionadas a la elevación (Figura 27 y 30) con cambios de tendencia superiores a 1.5 ppm. Esto podría deberse a las mineralizaciones de la zona de sulfuros, puesto que es en este lugar donde se observan las mayores leyes.

Es importante tener en cuenta también las derivas en las coordenadas este y norte, pues si bien inicialmente no se modelarían las derivas explícitamente en el presente proyecto, si podría tenerse en cuenta al momento de definir las vecindades de búsqueda de los datos para estimación, de manera que no se extiendan en un modo que puedan capturar la variabilidad observada en las pequeñas derivas graficadas.

Finalmente, si se hace un análisis de tendencias o derivas global, es decir, teniendo en cuenta la totalidad de los datos disponibles, no se encuentran tendencias a lo largo de los ejes coordenados. Este análisis puede observarse en la figura 30.

**Figura 30. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 4 m)**



En conclusión, dados los resultados de los análisis presentados en los gráficos anteriores, se tiene que las categorías de óxidos y sulfuros serán empleadas como las unidades de estimación dado su comportamiento como poblaciones con distribuciones diferentes.

#### **4.4.2 Estadísticas por unidades de estimación**

Una vez definidas las unidades de estimación como las categorías de óxidos y sulfuros, se presentan a continuación las estadísticas de los datos clasificados por estas unidades, tanto para los datos sin compositar, como para los compósitos de 2, 4 (resaltado dado que será el compósito a ser empleado en la estimación) y 7 m.

**Tabla 6. Estadísticas básicas por zona (Datos sin compositar).**

	<b>Datos</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Var</b>
<b>Óxidos</b>	2530	61.860	0.000	2.351	11.535
<b>Sulfuros</b>	9169	61.860	0.000	4.299	17.286
<b>Global</b>	11699	61.860	0.000	3.878	16.685

**Tabla 7. Estadísticas básicas por zona (Compósito 2 m).**

	<b>Datos</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Var</b>
<b>Óxidos</b>	2616	61.860	0.000	2.263	11.322
<b>Sulfuros</b>	9205	61.860	0.000	4.293	17.253
<b>Global</b>	11821	61.860	0.000	3.846	16.651

**Tabla 8. Estadísticas básicas por zona (Compósito 4 m).**

	<b>Datos</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Var</b>
<b>Óxidos</b>	1306	37.500	0.000	2.250	9.462
<b>Sulfuros</b>	4635	37.110	0.000	4.291	15.552
<b>Global</b>	5941	37.500	0.000	3.842	14.928

**Tabla 9. Estadísticas básicas por zona (Compósito 7 m).**

	<b>Datos</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Var</b>
<b>Óxidos</b>	750	25.070	0.000	2.254	8.494
<b>Sulfuros</b>	2664	24.130	0.070	4.297	14.447
<b>Global</b>	3414	25.070	0.000	3.848	13.855

Con respecto a estas estadísticas, se puede apreciar el efecto soporte a medida que se efectúan compósitos de mayor volumen, observándose una reducción en el número de datos y de las varianzas (lo que sugiere distribuciones más simetrizadas hacia la media).

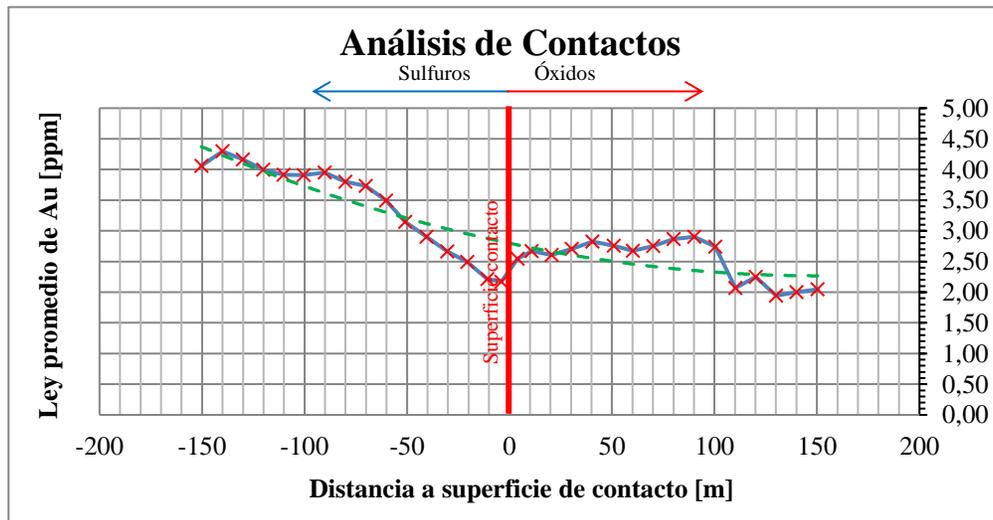
Igualmente se observa un fenómeno particular, relacionado con una mayor varianza para los datos de sulfuros (que corresponden a los datos con mayores leyes reportadas); lo cual podría también ser explicado por el efecto proporcional, el cual dice que se presenta una mayor variabilidad en las zonas de altas leyes respecto a las zonas de leyes bajas donde la variabilidad es menor.

### 4.4.3 Análisis de contactos

Al momento de efectuar la estimación de un depósito es importante conocer el comportamiento de la zona de contacto, para poder definir algunos aspectos a tener en cuenta en la modelación. Esto es, conocer si las variaciones en leyes son graduales o existe un cambio abrupto en el comportamiento de la ley. Para ello existen dos herramientas que permite efectuar este análisis. La primera de ellas está relacionada con un gráfico de dispersión que muestra las medias condicionales de ley de oro a medida que se va alejando de la zona de contacto. Esto permite conocer como es el comportamiento en la cercanía de la zona de contacto y al alejarse de esta. Otro gráfico de utilidad es un correlograma, que permite determinar la correlación entre las leyes de oro a determinadas distancias de la superficie de contacto. Así, si la correlación entre las leyes cae rápidamente se considera un contacto duro y si lo hace gradualmente se considera un contacto suave. Esto permite entonces definir la forma de modelar y si se establece un límite duro o uno blando.

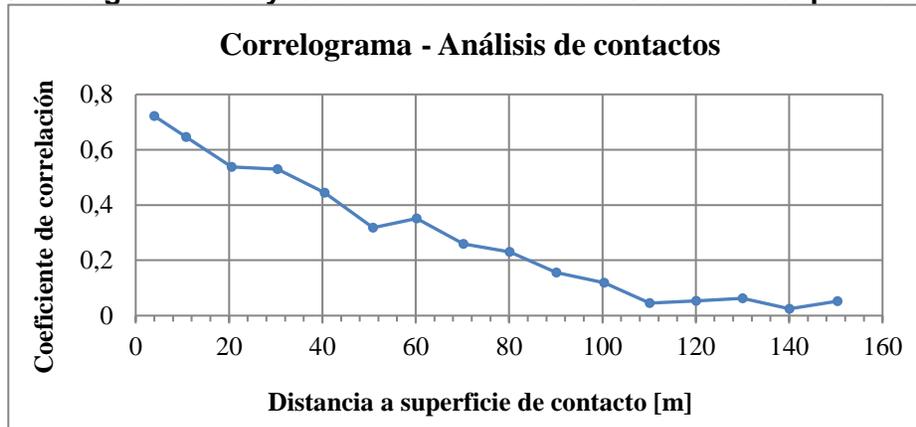
A continuación se presenta el análisis de contactos efectuados para el presente proyecto, para el compósito de 4 metros que a la postre es el compósito seleccionado para efectuar la estimación de recursos (en este caso la base de datos ya tiene el capping que se discutirá en el numeral siguiente).

**Figura 31. Gráficos de medias condicionales en función de distancia a zona de contacto**



Como se puede observar de la figura anterior, si bien existe un cambio en las leyes en la zona de contacto, no existe un cambio abrupto. Eso indicaría un tipo de contacto suave (línea verde que correspondería a una línea de tendencia); lo cual se puede corroborar con el correlograma presentado en la figura siguiente, donde decrece gradualmente la correlación.

**Figura 32. Correlograma de leyes de oro en función a distancia de superficie de contacto**

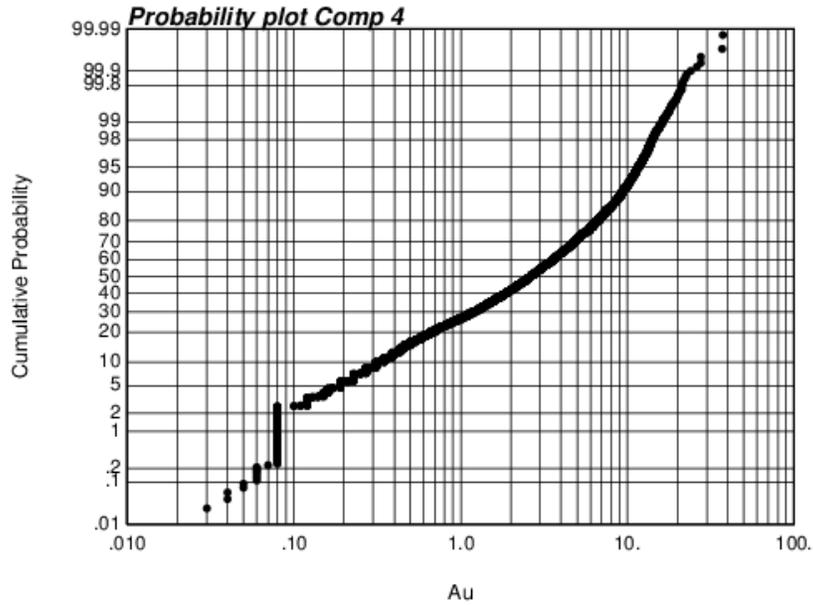


#### 4.5 Análisis de outliers

Como se mencionó en el numeral 4.2, es importante determinar si existen datos que parecen estar por fuera de los valores típicos de una población y determinar el tratamiento a efectuar con estos datos. Para el caso particular del presente proyecto, dado que se trabajará con el compósito de 4 metros en la estimación, se procederá a efectuar el análisis de outliers para este compósito. Es bueno aclarar que se realiza sobre el compósito de 4 metros, en vez de los datos originales, dado que al compositar se logra obtener una reducción de los valores extremos por el efecto de suavizamiento que presenta la compositación (efecto de dilución).

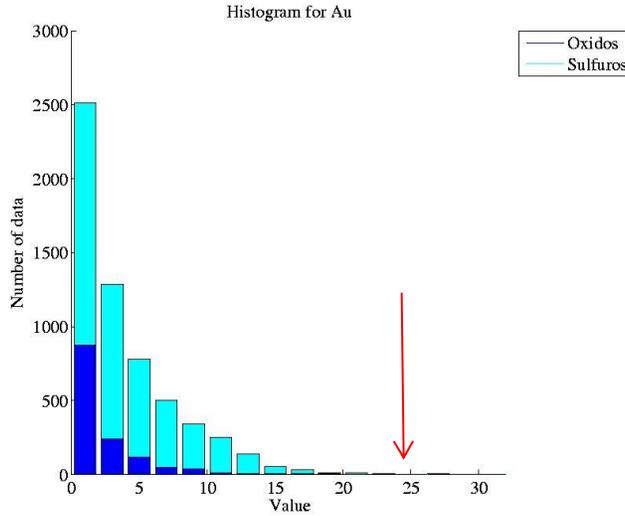
Para determinar entonces dicho comportamiento, se analizó el gráfico de probabilidad en escala logarítmica, el cual se puede ver en la Figura 33.

**Figura 33. Gráfico de probabilidad (Comp. 4 m)**



Se puede observar del gráfico de probabilidad que aproximadamente, en una probabilidad acumulada de 99.9, hay un cambio de pendiente de la línea; lo cual es un indicador de posibles valores outliers, que para este caso estarían por encima de valores cercanos a 25 ppm. Otra forma de determinar este aspecto es el “efecto hoyo” observado en el histograma de la Figura 34.

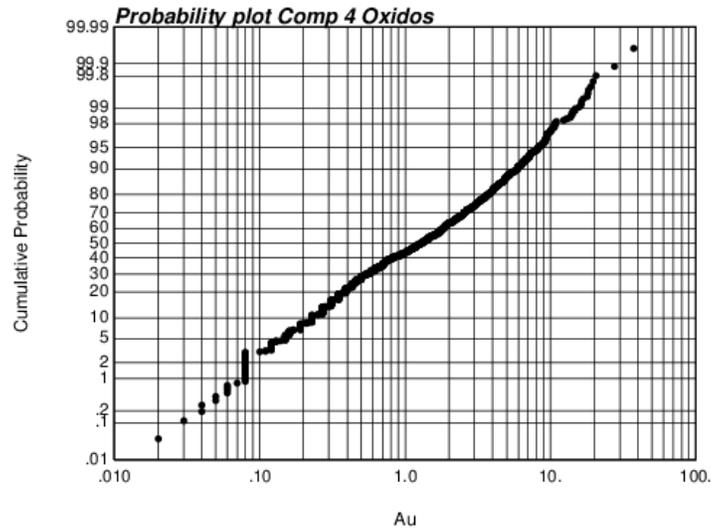
**Figura 34. Histograma (Comp. 4 m)**



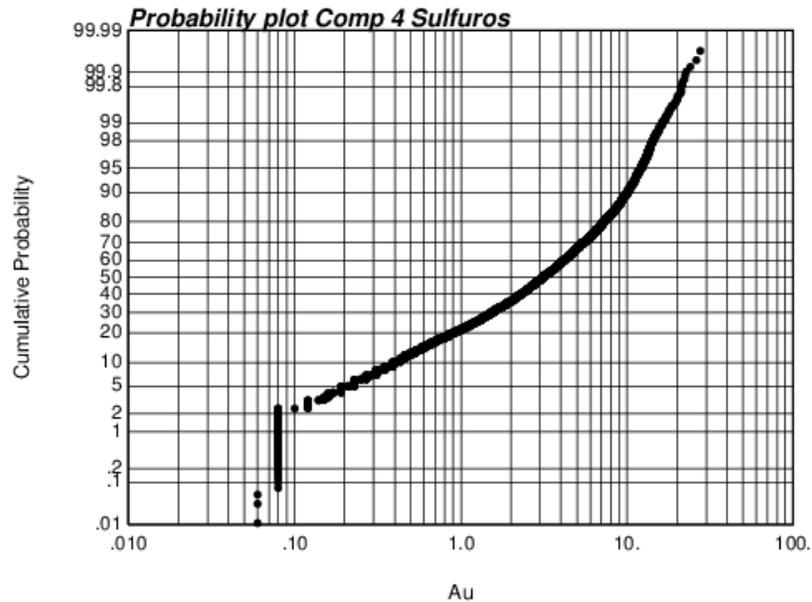
De este análisis se toma la decisión que para efectuar la estimación posterior, con base a los compósitos de 4 m, se procederá a efectuar una transformación (capping) de los datos.

Para tener una mayor certeza en los valores transformados, se procede a determinar por cada categoría de estimación (óxidos y sulfuros) el valor de capping según los gráficos de probabilidad siguientes (Figuras 35 y 36).

**Figura 35. Gráfico de probabilidad para óxidos (Comp. 4 m).**



**Figura 36. Gráfico de probabilidad para sulfuros (Comp. 4 m).**



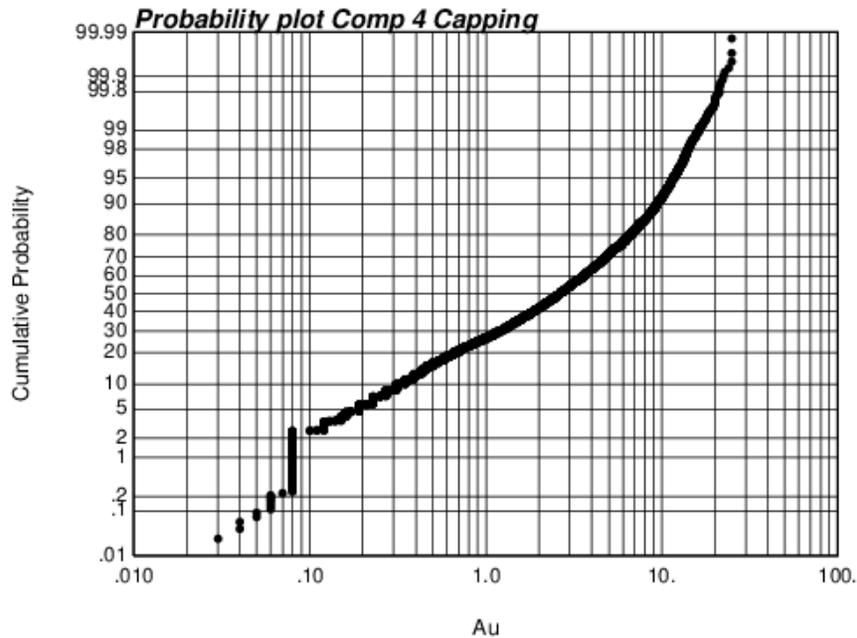
De dichos gráficos se definen los valores para efectuar las transformaciones. En la Tabla 10 se presentan los valores obtenidos para los datos correspondientes al compósito 4 m.

**Tabla 10. Valores de capping (Compósito 4 m).**

<b>Categoría</b>	<b>Valor de capping</b>	<b>Datos con capping</b>	<b>Percentil</b>
Óxidos	20 ppm	3	99.8
Sulfuros	25 ppm	3	99.9

De acuerdo a los valores transformados mediante este método, se presentan a continuación las estadísticas básicas del compósito de 4 m y el gráfico de probabilidad.

**Figura 37. Gráfico de probabilidad datos con capping (Comp. 4 m)**



**Tabla 11. Estadísticas básicas de datos con capping (Compósito 4 m).**

	<b>Datos</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Media</b>	<b>Var</b>
<b>Óxidos</b>	1306	20.000	0.000	2.230	8.480
<b>Sulfuros</b>	4635	25.000	0.000	4.287	15.375
<b>Global</b>	5941	25.000	0.000	3.835	14.585

Las estadísticas básicas sufrieron una reducción al hacer el capping, del orden del 0.89% en la media de los óxidos, del 0.09% en la media de los sulfuros y un 0.18% en la media global. Respecto a las varianzas, las reducciones fueron del orden del 10.38% en los óxidos, del 1.14% en los sulfuros y del 2.30% globalmente.

#### **4.6 Desagrupamiento**

De acuerdo a lo mencionado en el numeral 3, el muestreo no corresponde a un muestreo aleatorio. Es decir, se observa un muestreo preferencial lo cual conduce a tener estadísticas que no son completamente representativas, motivo por el cual se procede a efectuar el desagrupamiento. Este es un método que permite obtener estadísticas representativas de la zona de muestreo, al asignar un mayor peso a los datos que se

encuentran aislados (dado que informan sobre una mayor área) y un menor peso a los datos agrupados (dado que informan sobre una menor área).

Para este proceso existen diversas técnicas, dentro de las cuales se encuentra el desagrupamiento de celdas. Esta técnica divide el dominio en celdas y asigna pesos a los datos conforme se distribuyan en las celdas.

#### **4.6.1 Definición del tamaño de celda**

Para emplear el método de celdas es importante definir el tamaño de las mismas. Si son muy pequeñas podrían capturar solo un dato y en consecuencia asignarían un peso igual a cada uno de los datos. Por el contrario, si la celda es muy grande y agrupa a todos los datos también asignaría un peso igual a todos los datos. En tal sentido, se sugiere emplear un tamaño de celda acorde a la malla de muestreo que para este caso es de 50 m x 50 m. En la vertical se sugiere emplear una longitud equivalente al tamaño de las muestras o los compósitos. Dado que las muestras fueron tomadas en su mayoría en longitudes de 2 metros, se empleará entonces esta distancia para configurar el tamaño de celda (50x50x2 m) en el caso de los datos sin compositar y de 50x50x2m, 50x50x4m y 50x50x7m para los datos compositados a 2, 4 y 7 m respectivamente.

#### **4.6.2 Estadísticas de datos desagrupados**

A continuación se presentan las estadísticas básicas (media y varianza) para los datos desagrupados, tanto para datos sin compositar como para los compósitos de 2, 4 y 7 m (Tablas 12 a 14). Adicionalmente, en la Figura 38 se presenta una imagen de la obtención de pesos para el compósito de 2 m.

**Figura 38. Pesos de desagrupamiento por el método de celdas (Comp. 2 m)**

Compositos 2 m							
7							
LOCATIONX							
LOCATIONY							
LOCATIONZ							
Au							
Largo							
Zona							
Declustering weights							
96724.180	87776.290	2156.090	0.460	2.000	1.000	0.651	
96723.380	87775.810	2154.320	0.390	2.000	1.000	0.551	
96722.590	87775.320	2152.550	0.620	2.000	1.000	0.511	
96721.790	87774.840	2150.780	1.080	2.000	1.000	0.477	
96721.000	87774.360	2149.010	0.390	2.000	1.000	0.421	
96720.210	87773.880	2147.240	0.310	2.000	1.000	0.398	
96719.430	87773.390	2145.460	0.460	2.000	1.000	0.377	

**Tabla 12. Estadísticas básicas datos desagrupados (global).**

Global	Sin compositar	Compósito 2 m	Compósito 4 m*	Compósito 7 m
<b>Media [ %]</b>	3.878	3.844	3.835	3.848
<b>Varianza</b>	16.685	16.651	14.585	13.855
<b>Media [ %] desag.</b>	3.709	3.689	3.663	3.676
<b>Varianza desagrp.</b>	15.856	15.848	14.075	13.387

\* Datos transformados con capping.

**Tabla 13. Estadísticas básicas datos desagrupados (óxidos).**

Óxidos	Sin compositar	Compósito 2 m	Compósito 4 m*	Compósito 7 m
<b>Media [ %]</b>	2.351	2.263	2.230	2.254
<b>Varianza</b>	11.535	11.322	8.480	8.494
<b>Media [ %] desag.</b>	1.961	1.884	1.835	1.875
<b>Varianza desagrp.</b>	8.854	8.753	6.586	6.682

\* Datos transformados con capping.

**Tabla 14. Estadísticas básicas datos desagrupados (sulfuros).**

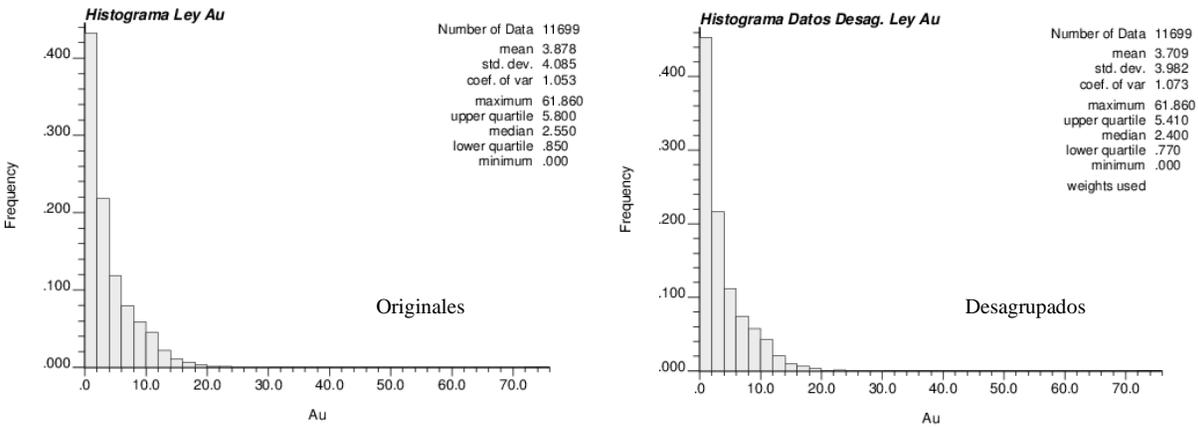
Sulfuros	Sin compositar	Compósito 2 m	Compósito 4 m*	Compósito 7 m
<b>Media [ %]</b>	4.299	4.293	4.287	4.297

<b>Varianza</b>	17.286	17.253	15.375	14.447
<b>Media [ %] desag.</b>	4.093	4.092	4.067	4.083
<b>Varianza desag.</b>	16.574	16.543	14.829	14.002

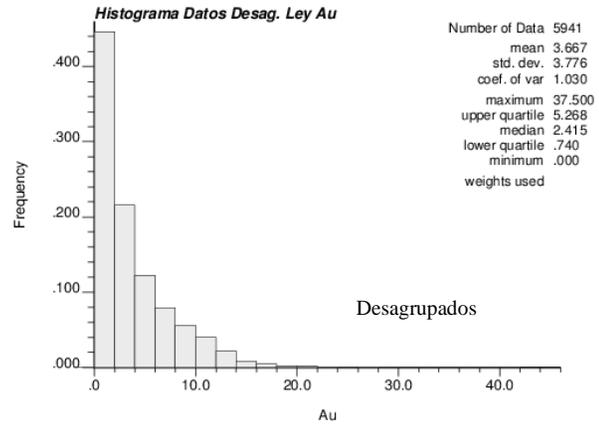
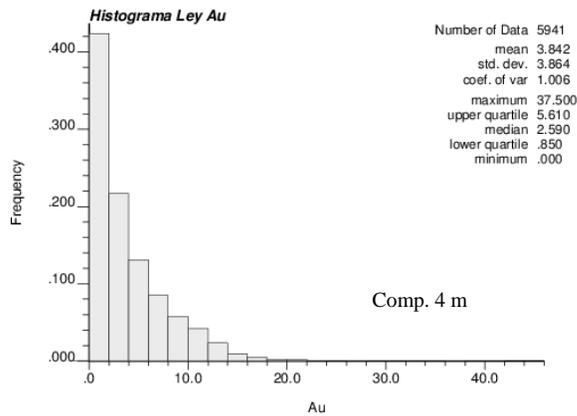
\* Datos transformados con capping.

Como se puede observar de las tablas anteriores, al calcular las estadísticas de los datos desagrupados se observan variaciones importantes en ellas, tanto de media y de varianza. Esto puede verse igualmente al comparar en detalle las frecuencias del histograma de los datos originales y los datos desagrupados. En las Figuras 39 y 40 se presentan los histogramas para los datos sin compositar y los datos del compósito de 4 m.

**Figura 39. Comparativo de histogramas de datos sin compositar.**



**Figura 40. Comparativo de histogramas de datos Compósito 4 m.**

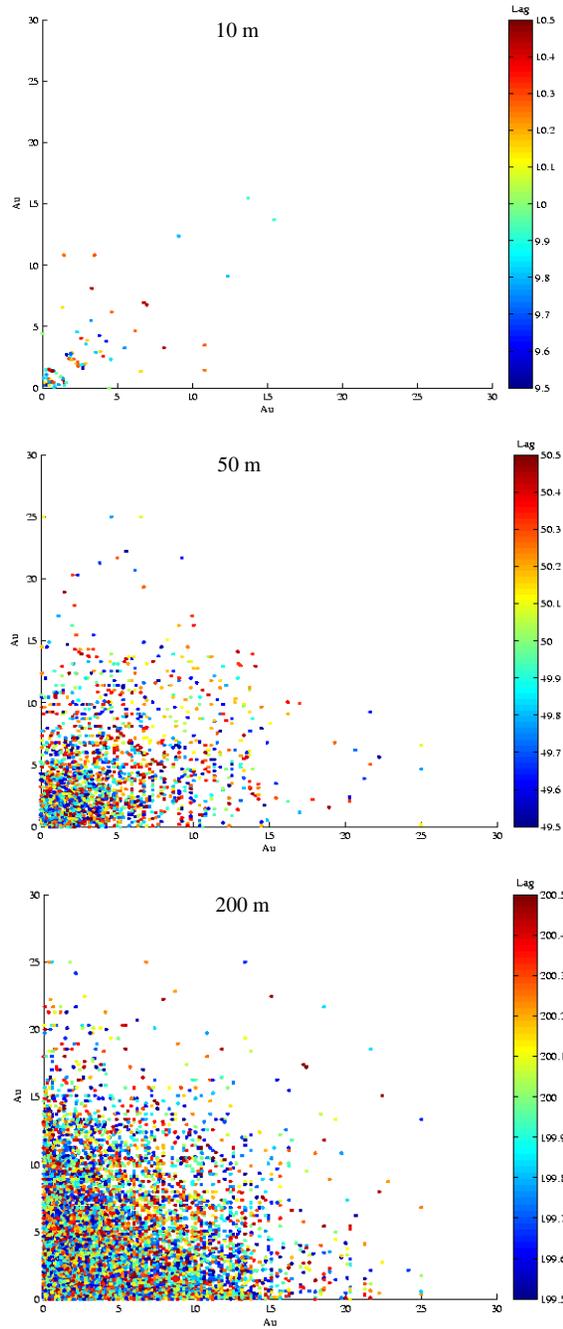


Se observa claramente como las frecuencias de los datos cambian en el histograma (de forma más notoria en el primer rango del histograma), lo cual demuestra el ajuste efectuado al ponderar los datos debido a su representatividad espacial.

#### 4.7 Nubes de correlación diferida

Las nubes de correlación diferida permiten analizar el comportamiento espacial de una variable, es decir un análisis de la continuidad de la variable regionalizada en el espacio. Para ello, este gráfico se construye visualizando el valor en un sitio en función del valor en un sitio alejado a cierta distancia. Si se obtiene una nube dispersa para distancias pequeñas, se tendrá una variable errática; si por el contrario la nube es aplastada la variable será regular en el espacio. A continuación se presentan las nubes de correlación diferida para 10, 50 y 200 metros de la base de datos de compósitos de 4 metros (para una búsqueda horizontal con azimut  $-35^\circ$ , tolerancias de  $180^\circ$  al azimut y dip, un paso y tolerancia al paso de 0.5 m). Como se puede observar a medida que se incrementa la distancia se observa como la nube es más errática (más dispersa) lo que demuestra la pérdida de correlación. Igualmente dado que el depósito es de oro no se observa claramente una nube aplastada a distancias pequeñas.

Figura 41. Nubes de correlación diferida a 10, 50 y 200 m.



#### 4.8 Resumen de estadísticas compósito 4 m

Dado que el compósito de 4 metros fue el seleccionado para continuar el proceso de estimación, a continuación se presentan las estadísticas relevantes que dan cuenta del comportamiento de los datos obtenidos de la base de datos correspondiente una vez efectuado el proceso de capping del compósito de 4 m.

**Tabla 15. Estadísticas básicas compósito de 4 m.**

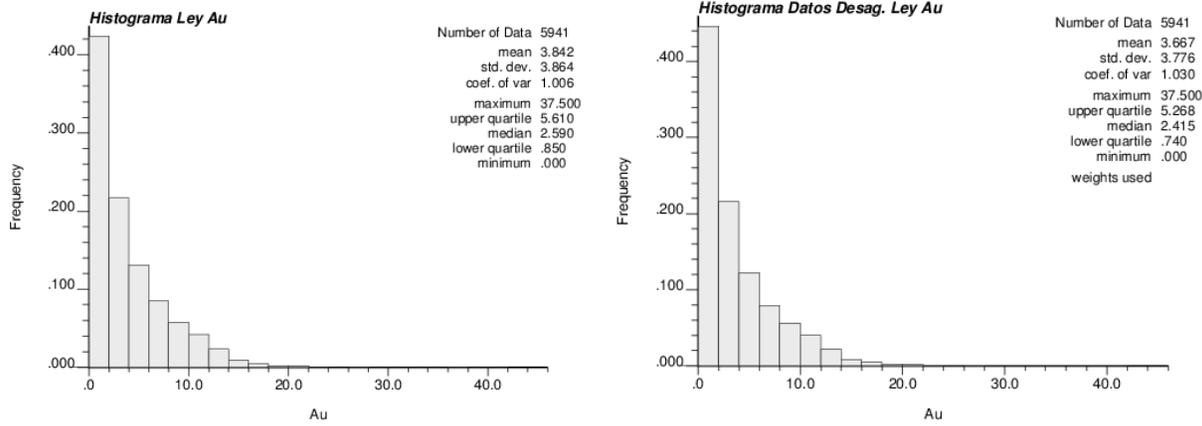
<b>Unidad</b>	<b>Datos</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza</b>
<b>Óxidos</b>	1306	20.000	0.000	2.230	8.480
<b>Sulfuros</b>	4635	25.000	0.000	4.287	15.375
<b>Global</b>	5941	25.000	0.000	3.835	14.585

**Tabla 16. Estadísticas desagrupadas compósito de 4 m.**

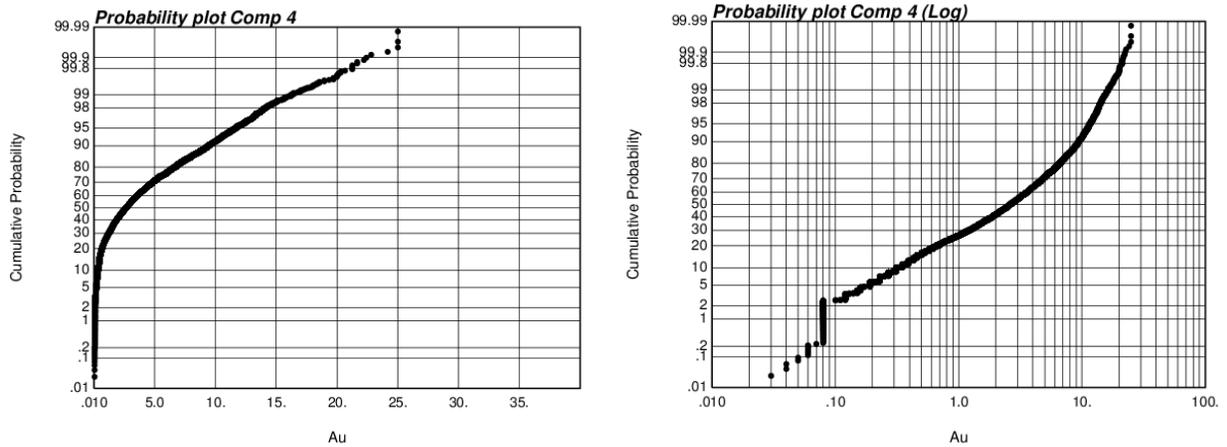
<b>Parámetro</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Sulfuros</b>	<b>Global</b>
<b>Media [ %]</b>	2.230	4.287	3.835
<b>Varianza</b>	8.480	15.375	14.585
<b>Media [ %] desag.</b>	1.835	4.067	3.663
<b>Varianza desag.</b>	6.586	14.829	14.075

La distribución de los datos de compósitos de 4 metros, el gráfico de probabilidad, qqplot (para comparar distribución de datos originales), gráficos de dispersión por cada eje de coordenadas, se presentan a continuación.

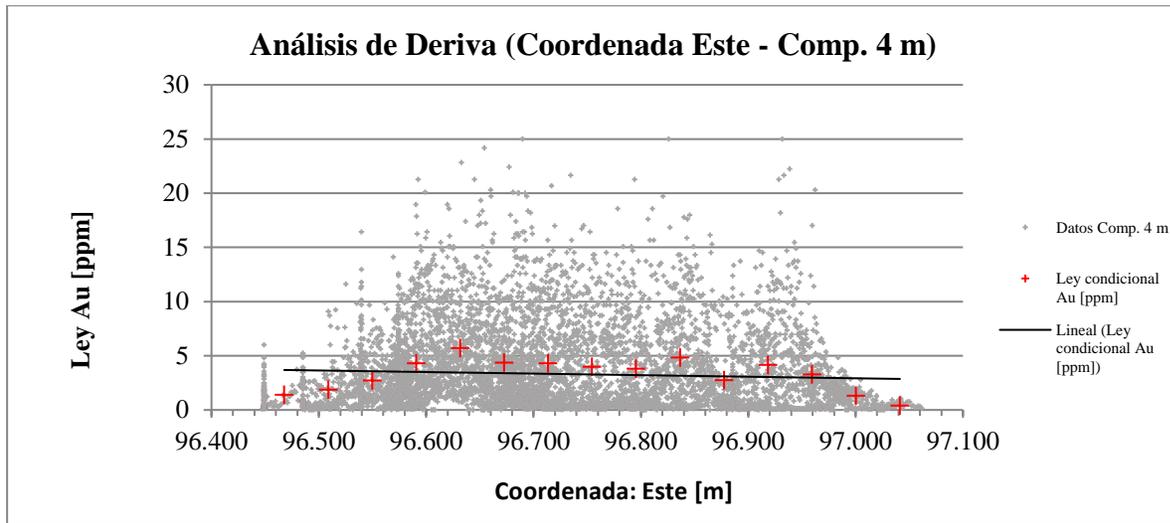
**Figura 42. Histogramas de datos de compósitos de 4 m (datos originales y desagrupados).**



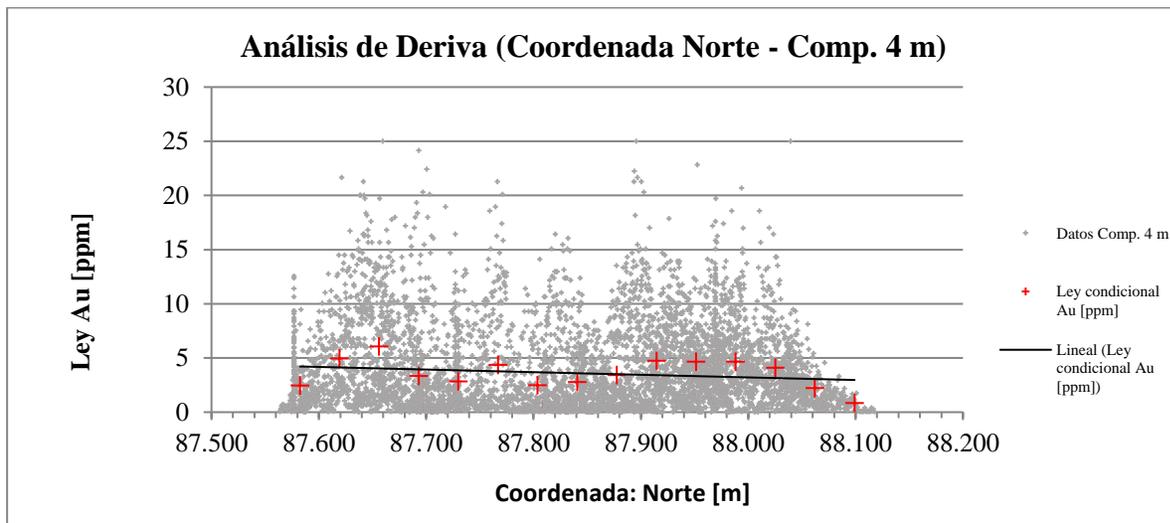
**Figura 43. Gráficos de probabilidad compósito de 4 m (lineal y logarítmico).**



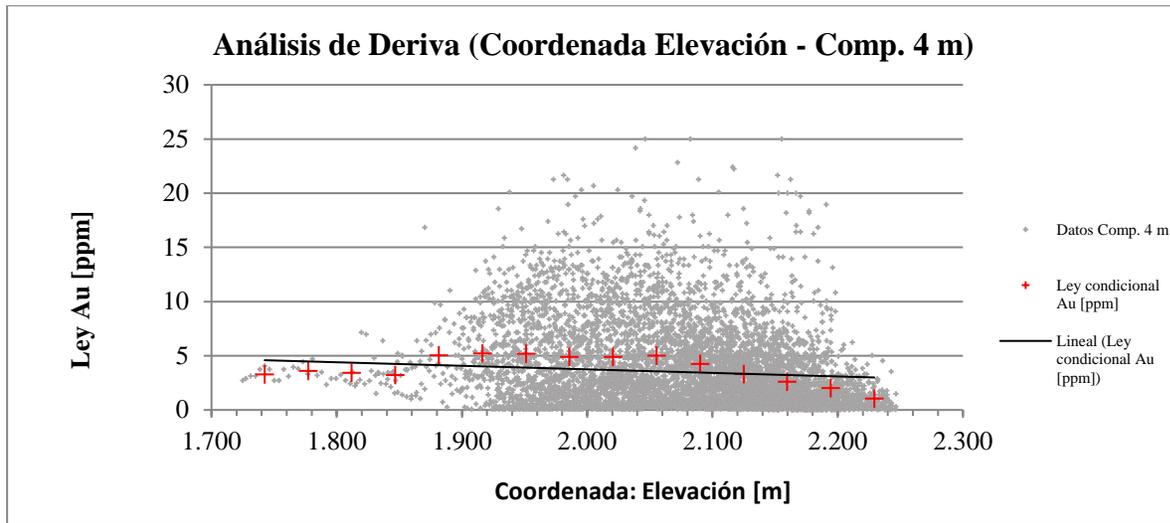
**Figura 44. Gráfico de dispersión y media condicional para eje Este.**



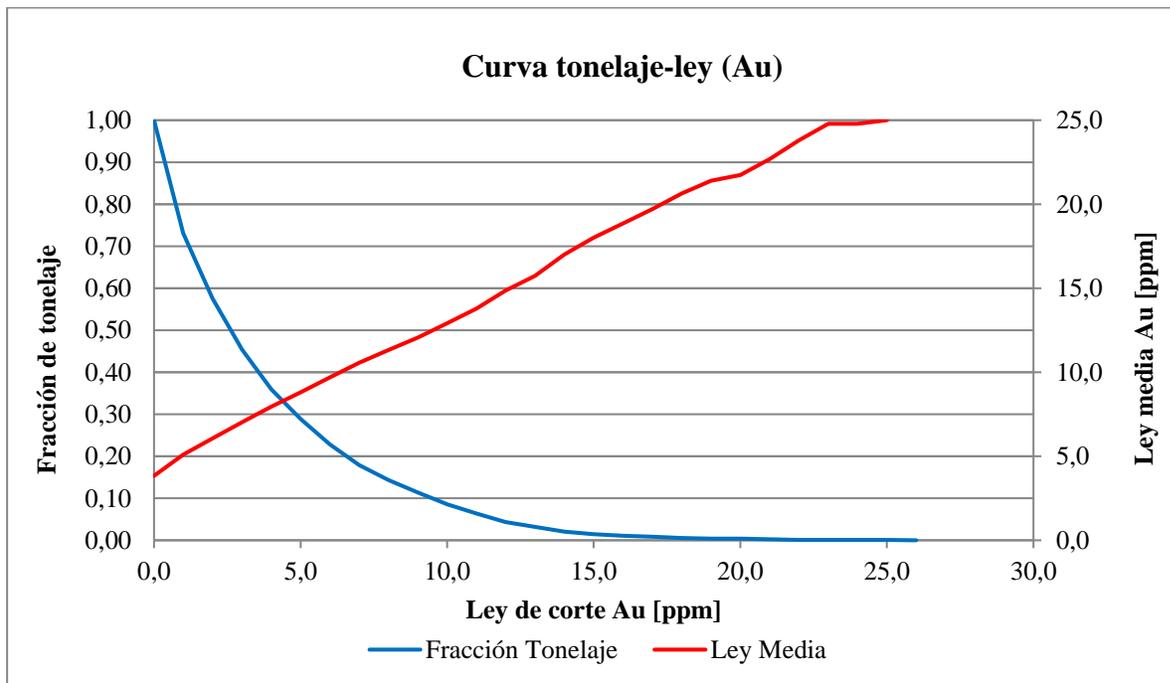
**Figura 45. Gráfico de dispersión y media condicional para eje norte.**



**Figura 46. Gráfico de dispersión y media condicional para eje elevación.**

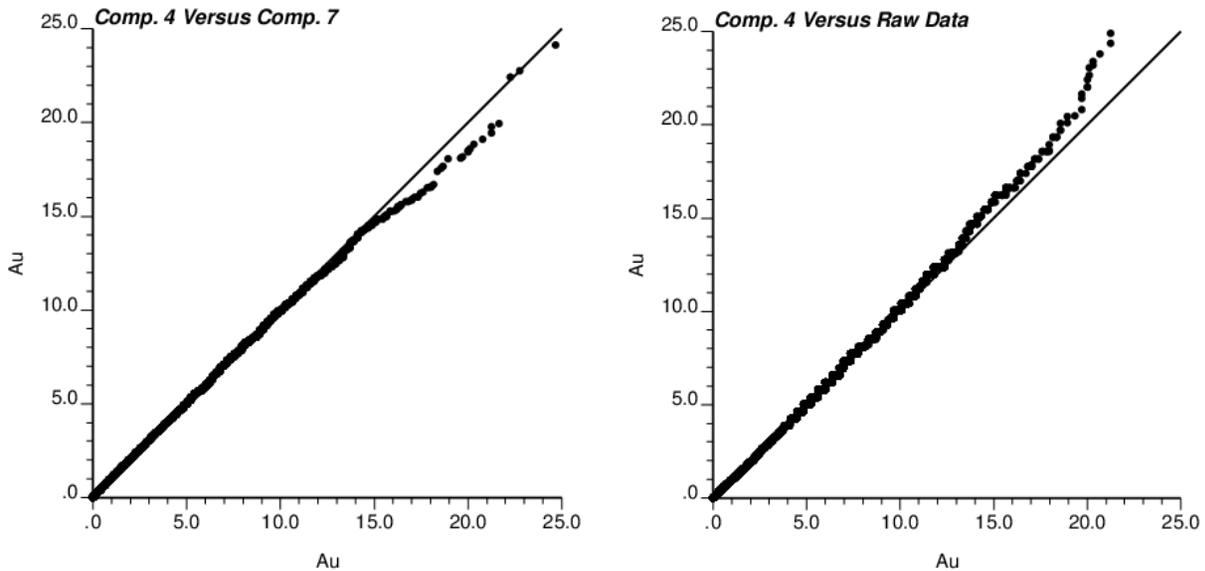


**Figura 47. Curva tonelaje-ley compuesto 4 m.**



Como se puede observar de la curva tonelaje-ley, más del 90% de los datos disponibles está por debajo de los 10 ppm. Para dicho valor (establecido como ley de corte), la ley media sería del orden de 12.5 ppm.

**Figura 48. Q-Q plot Compósito 4 m vs Compósito 7 m y datos originales.**



Como se puede observar en la figura anterior, las distribuciones presentan diferencias, principalmente en leyes superiores a 13 ppm. Esto puede explicarse principalmente al efecto de suavizamiento que genera el proceso de compositación de sondajes (para un compósito de 7 metros hay un mayor suavizamiento que para uno de 4 metros por eso la distribución podría estar por debajo de la diagonal. Situación similar ocurre en el gráfico de datos originales, en donde el compósito de 4 metros (que además posee capping) presenta una distribución más estrecha que la de los datos originales por lo cual a leyes mayores de 13 ppm el valor de QQ plot para los datos originales es mayor.

## **5. Variografía y validación cruzada**

Una vez definidos los compósitos de 4 m. como la información de partida para la estimación del modelo de bloques, se efectuaron varios pasos previos antes de la estimación. El primero de ellos relacionado con la variografía, es decir, determinación de los variogramas experimentales y posteriormente definición del variograma modelado. Para ello es importante emplear una herramienta de análisis que permita identificar anisotropías (direcciones preferenciales de mineralización en este caso) como son los mapas variográficos, cuyos análisis se presentan a continuación.

## 5.1 Mapas Variográficos

Para determinar los mapas variográficos se procedió inicialmente a determinar el dominio de influencia de los óxidos y los sulfuros. En la Tabla 17 se presentan los rangos de coordenadas entre los que se encuentran dichas unidades y los dominios asumidos que cubren para cada eje de coordenadas.

**Tabla 17. Definición de dominios para mapas variográficos.**

Unidad	Óxidos			Sulfuros		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Coord. Mín.</b>	96,447.30	87,563.91	2,069.26	96,448.83	87,573.52	1,725.07
<b>Coord. Máx.</b>	97,061.75	88,117.50	2,246.65	97,051.98	88,102.59	2,209.19
<b>Diferencia</b>	614.45	553.59	177.39	603.15	529.07	484.12
<b>Dominio (m)</b>	640	560	180	640	560	500

Con esta información se determinó el paso y número de pasos que cubrieran al menos el 50% del dominio presentado en la Tabla 17. En tal sentido, los parámetros empleados fueron los presentados en la Tabla 18.

**Tabla 18. Parámetros empleados en la construcción de mapas variográficos.**

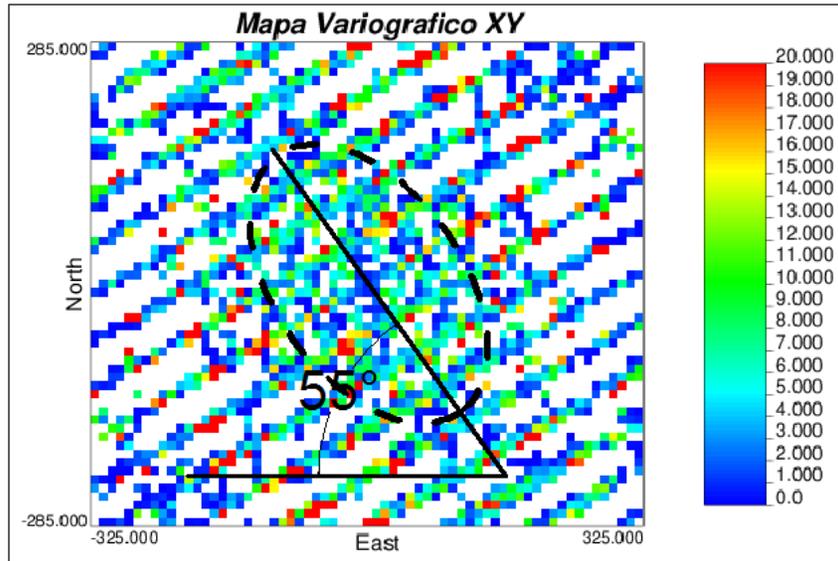
Unidad	Óxidos			Sulfuros		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<b>Paso (m)</b>	10	10	5	10	10	5
<b>Número Pasos</b>	32	28	18	32	28	50

Los valores de paso anteriores se escogieron de forma de ser divisores del dominio establecido en la Tabla 17 y tales que el número de pasos fuera un valor razonable para analizar posteriormente, tal como lo muestra la tabla anterior, donde el máximo número de pasos se alcanza en la coordenada Z de los sulfuros, pero aun así, ese valor es razonable para trabajar.

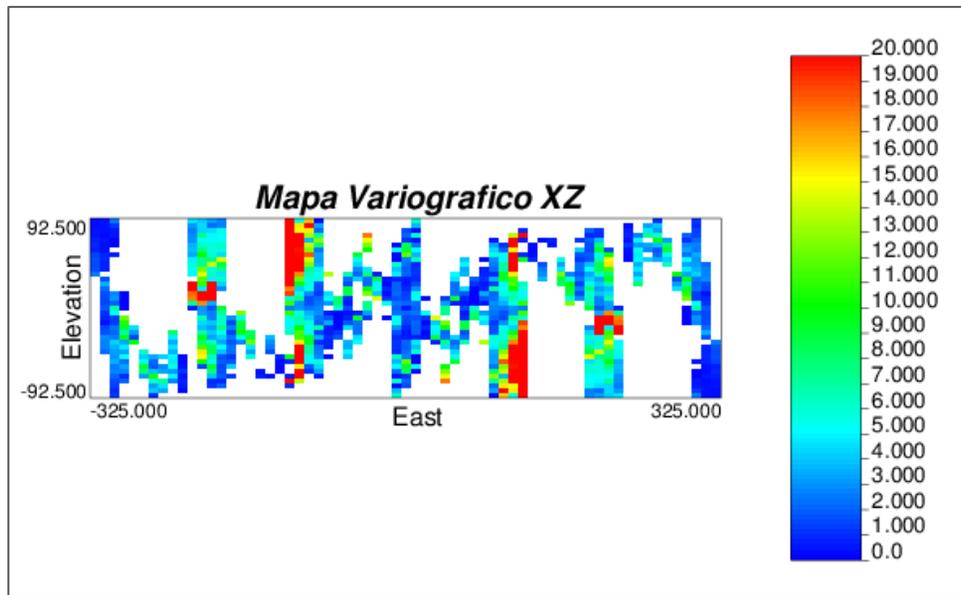
A continuación se presentan los mapas variográficos para cada una de las poblaciones o unidades de estimación. En primer lugar se muestran los mapas para los óxidos (Figura 49 a Figura 51) y posteriormente para los sulfuros (Figura 52 a

Figura 54).

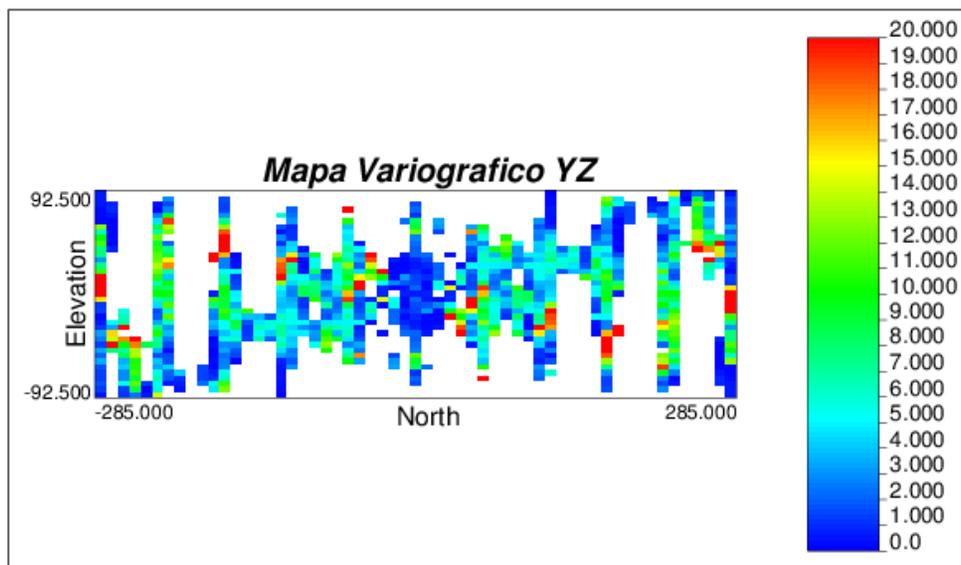
**Figura 49. Mapa variográfico óxidos (Plano XY).**



**Figura 50. Mapa variográfico óxidos (Plano XZ).**



**Figura 51. Mapa variográfico óxidos (Plano YZ).**

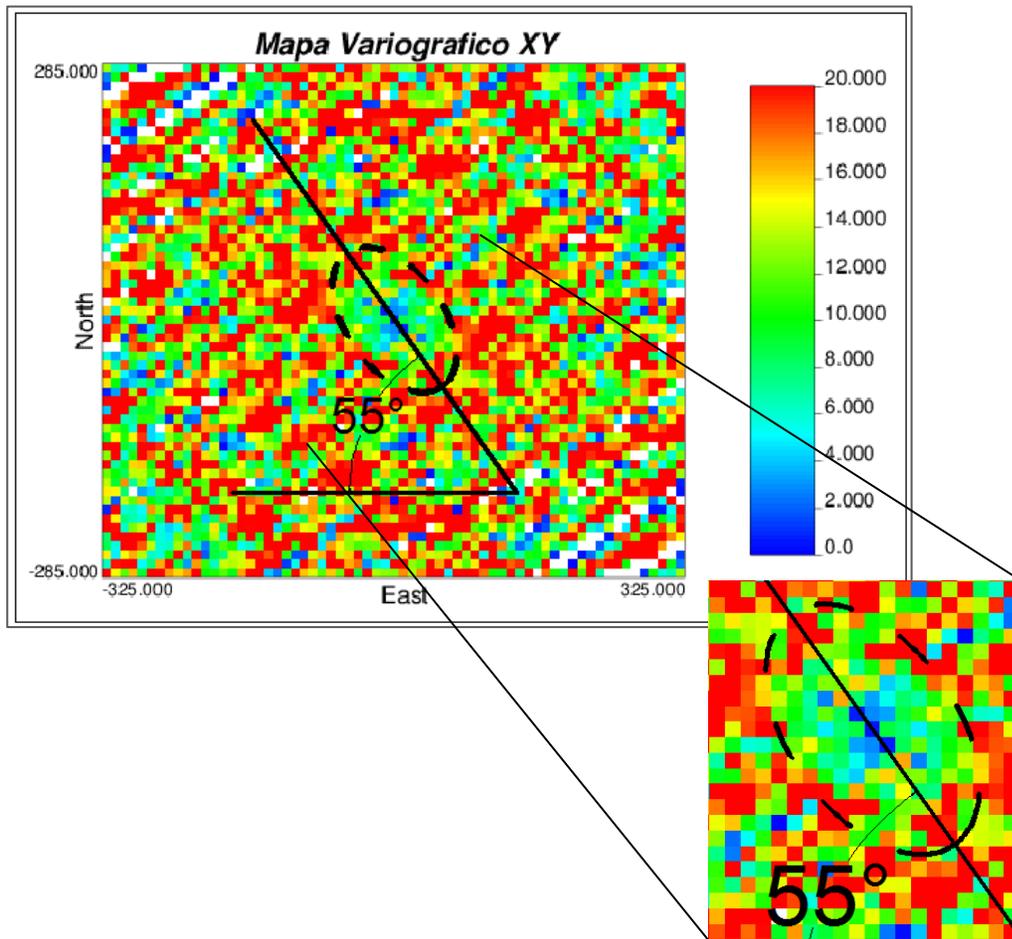


Como se desprende de la Figura 49, en el plano XY es posible observar una anisotropía en la dirección N35°W (Azimut 325°), esto porque se ve un patrón de leyes entre 8 y 12 ppm (color verde) tal que permite formar una elipse alrededor de él, tal como se muestra en la figura descrita. En los otros planos no se observan claramente patrones que permitan identificar una dirección preferencial. En tal sentido, esto permite identificar tres direcciones principales para

calcular los variogramas experimentales, a saber: 325°, 55° (ortogonal a los 325°) y una dirección vertical.

A continuación se muestran los mapas variográficos para los sulfuros.

**Figura 52. Mapa variográfico sulfuros (Plano XY).**



**Figura 53. Mapa variográfico sulfuros (Plano XZ).**

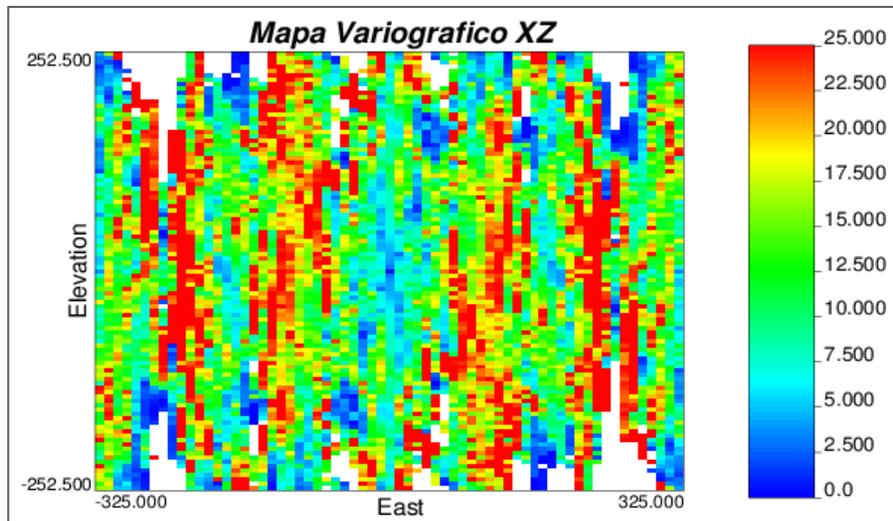
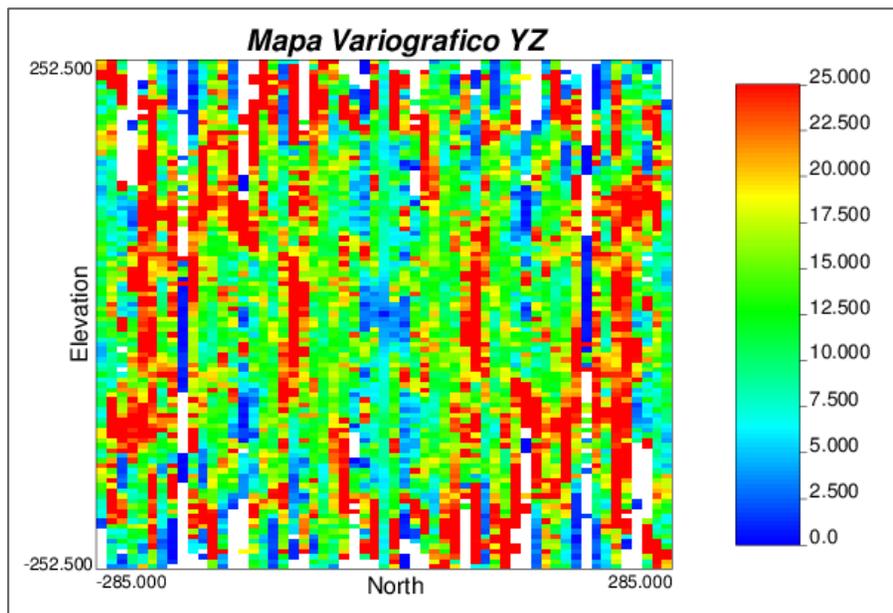


Figura 54. Mapa variográfico sulfuros (Plano YZ).

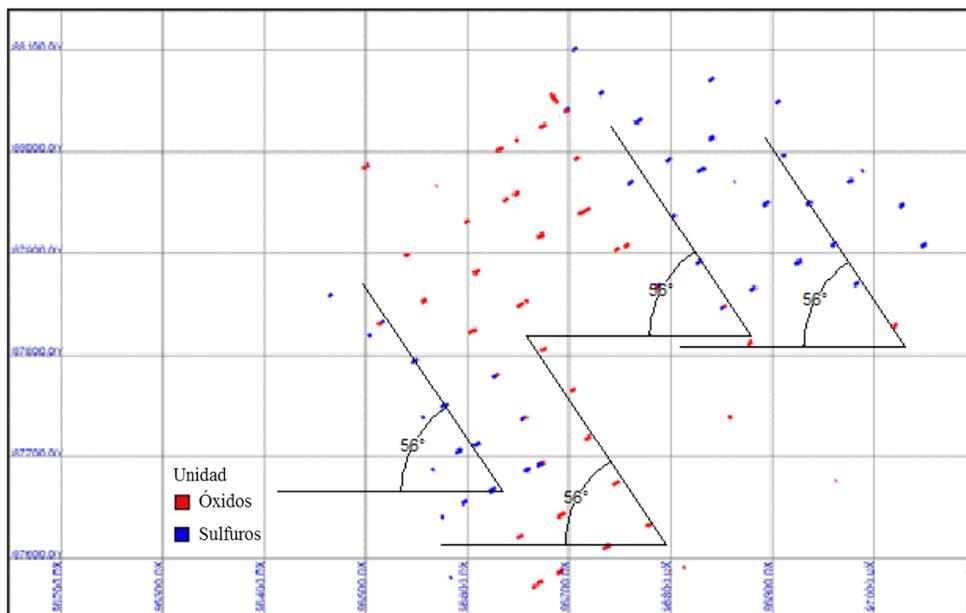


De igual forma a lo observado en los óxidos, en la Figura 52 se observa una leve anisotropía en dirección N35°W (Azimut 325°) principalmente en pequeñas distancias. En los otros planos no se observan claramente patrones que permitan identificar una dirección preferencial y pareciera ser más omnidireccional. Esto permite identificar tres direcciones

principales para calcular los variogramas experimentales, a saber: 325°, 55° (ortogonal a los 325°) y una dirección vertical.

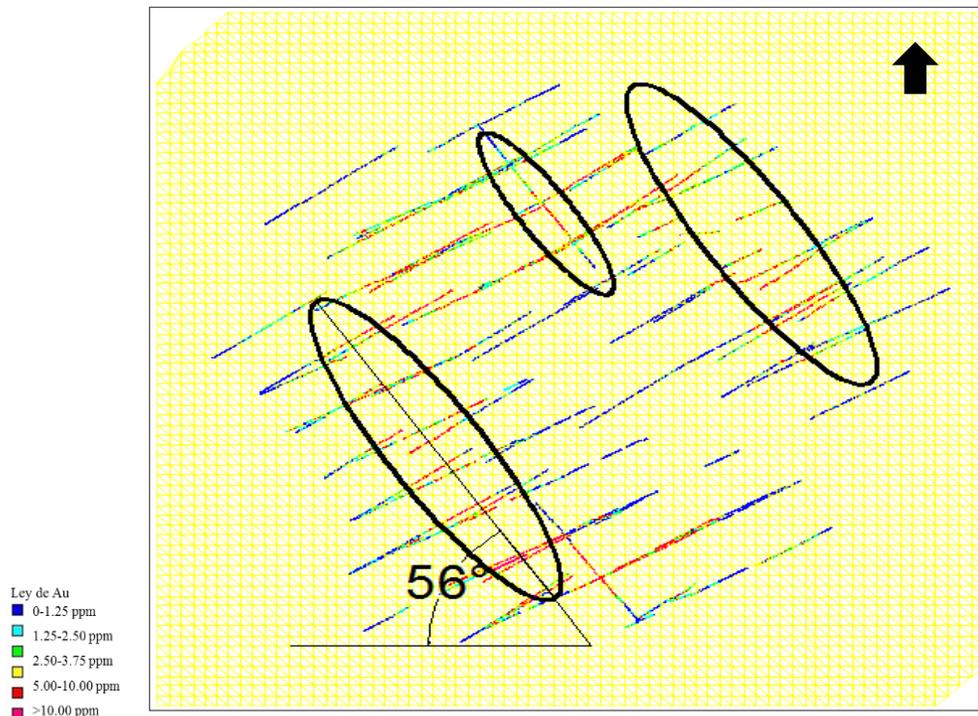
Si esto se compara con la red de sondajes empleada para la toma de muestras, se observa que la malla se encuentra orientada de manera similar al ángulo de anisotropía identificado, lo cual podría indicar que la red de sondajes fue establecida de dicha manera para capturar información en dirección de la mineralización; tal como se puede observar en la Figura 55.

**Figura 55. Orientación de la malla de sondajes.**



De igual manera, al observar los sondajes en planta (Figura 56), se pueden ver las zonas de mayores leyes que corresponderían a las zonas mineralizadas. Estas presentan una dirección preferencial NW, lo que coincide igualmente con las características, la cual presenta un sistema estructural con fallas orientadas NW y otras menores en dirección ortogonal NE; sistema estructural que en algunos depósitos estudiados han ejercido un control estructural de la mineralización. Esta información debería ser corroborada con información más específica de la geología local, que infortunadamente no se cuenta con ella para el presente análisis.

**Figura 56. Sondajes en planta y mineralización.**



## 5.2 Variogramas experimentales

Para determinar los variogramas experimentales, dado que Gslib no permite definir el paso, número de pasos y tolerancia al paso para cada dirección en la cual se pretende calcular el variograma experimental, sino que lo hace de manera conjunta; es necesario calcular primero los variogramas experimentales en las direcciones horizontales ( $325^\circ$  y  $55^\circ$ ) cuyos pasos y tolerancias dependen de la malla de sondaje ( $50\text{m} \times 50\text{m}$ ). El número de pasos se establece de manera que se cubra aproximadamente la mitad del dominio que se pretende estimar, y las tolerancias como la mitad del paso. Posteriormente se calculó el variograma experimental en la dirección vertical cuyo paso, número de pasos y tolerancias al paso dependen del tamaño del compósito (para este caso  $4\text{ m}$ ). De igual forma el número de pasos depende del dominio a estimar (se asume la mitad del dominio en la vertical) y la tolerancia como la mitad del paso. Acorde a esta metodología se presentan a continuación (Tabla 19) los parámetros empleados para cada unidad de estimación en la construcción de los variogramas experimentales, teniendo claro que los demás parámetros obedecen a: que un ángulo de  $22.5^\circ$  como tolerancia angular (tanto azimut como dip), el cual es un valor de uso común en la práctica. Y el ancho de banda

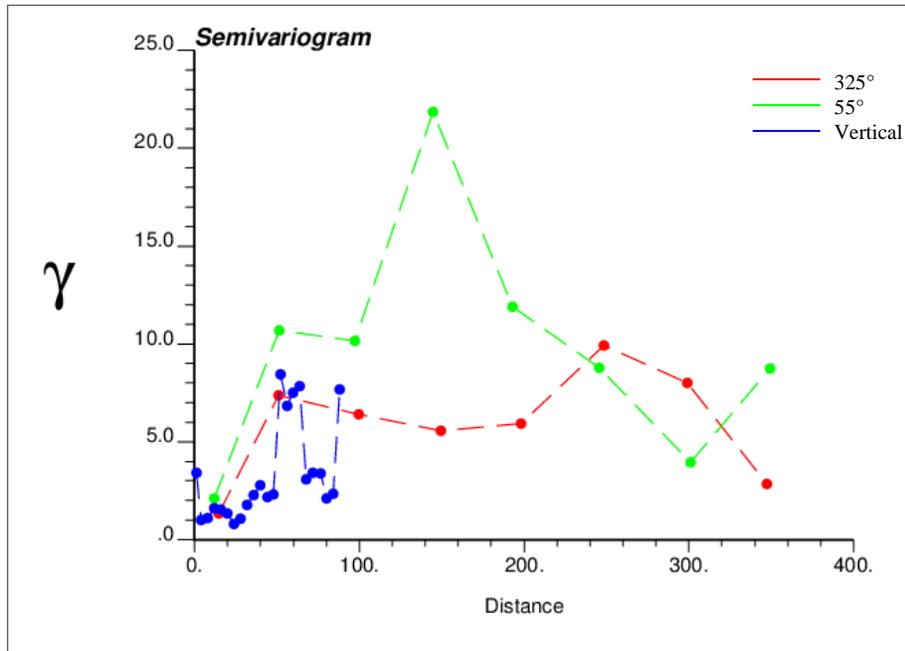
se asume como la mitad del paso seleccionado en la dirección ortogonal al cual se está definiendo.

**Tabla 19. Parámetros empleados para calcular Variogramas Experimentales.**

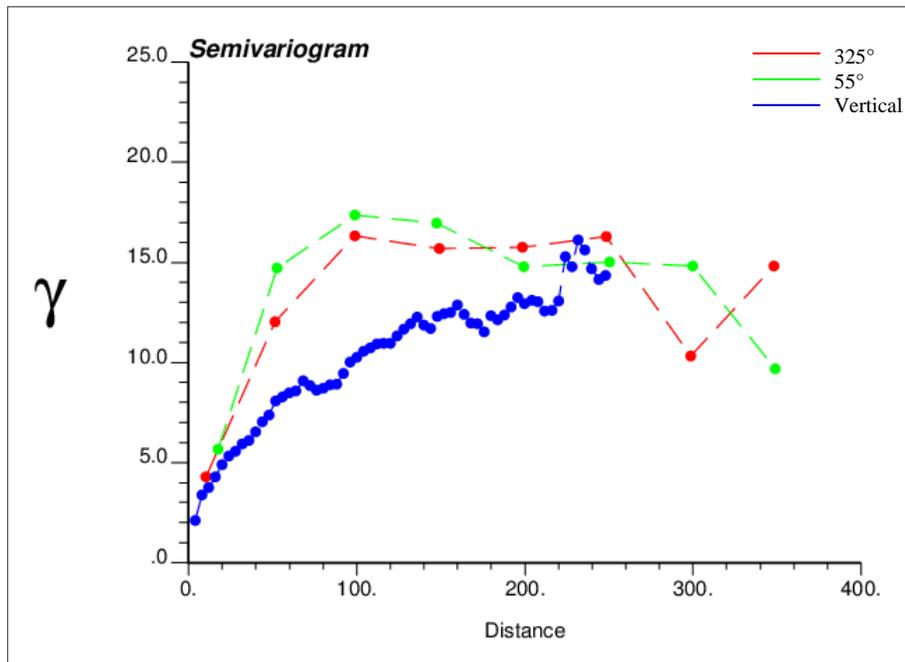
Unidad	Óxidos			Sulfuros		
	325°	55°	Vertical	325°	55°	Vertical
<b>Variograma</b>						
<b>Paso [m]</b>	50	50	4	50	50	4
<b>Número de Pasos</b>	7	7	23	7	7	62
<b>Tolerancia al Paso [m]</b>	25	25	2	25	25	2
<b>Azimut [°]</b>	325°	55°	0	325°	55°	0
<b>Tolerancia Azimut [°]</b>	22.5°	22.5°	90°	22.5°	22.5°	90°
<b>Ancho Banda Horizontal [m]</b>	25	25	25	25	25	25
<b>Dip [°]</b>	0°	0°	-90°	0°	0°	-90°
<b>Tolerancia Dip [°]</b>	22.5°	22.5°	22.5°	22.5°	22.5°	22.5°
<b>Ancho Banda Vertical [m]</b>	2	2	25	2	2	25

A continuación se presentan los variogramas experimentales obtenidos de acuerdo a los parámetros descritos.

**Figura 57. Variograma experimental óxidos.**



**Figura 58. Variograma experimental sulfuros.**



En la figura 57, se puede ver que el variograma en la dirección de 325° (línea roja), es el más regular de los 3, mientras que el variograma en la dirección 55° es el más irregular de

todos, presentando subidas y bajadas bruscas. El variograma de la dirección vertical es el que alcanza un valor más alto por lo que se puede deducir que el variograma modelado que se mostrará posteriormente tendrá que la meseta más alta corresponderá a la dirección vertical. La figura 58 muestra el variograma experimental de los sulfuros estudiados. Se puede ver que difiere bastante al obtenido para los óxidos teniendo las 3 curvas más regulares entre sí.

La razón por la que los variogramas son tan diferentes entre óxidos y sulfuros se puede deber a que el número de datos en la zona de sulfuros es mucho mayor a la otra lo cual provoca que el variograma tenga más información con la cual trabajar y así se puedan obtener curvas más regulares.

### 5.3 Variogramas modelados

Dado que los variogramas experimentales son imperfectos (obtenidos con imprecisiones de los datos disponibles) e incompletos (solo a determinadas distancias y ciertas direcciones), es necesario ajustar un modelo de variograma en todas las direcciones del espacio y para todas las distancias, en torno al variograma experimental calculado. Este modelo de variograma será el que posteriormente se empleará en la estimación mediante kriging. A continuación se presentan los variogramas modelados, con las respectivas estructuras anidadas definidas.

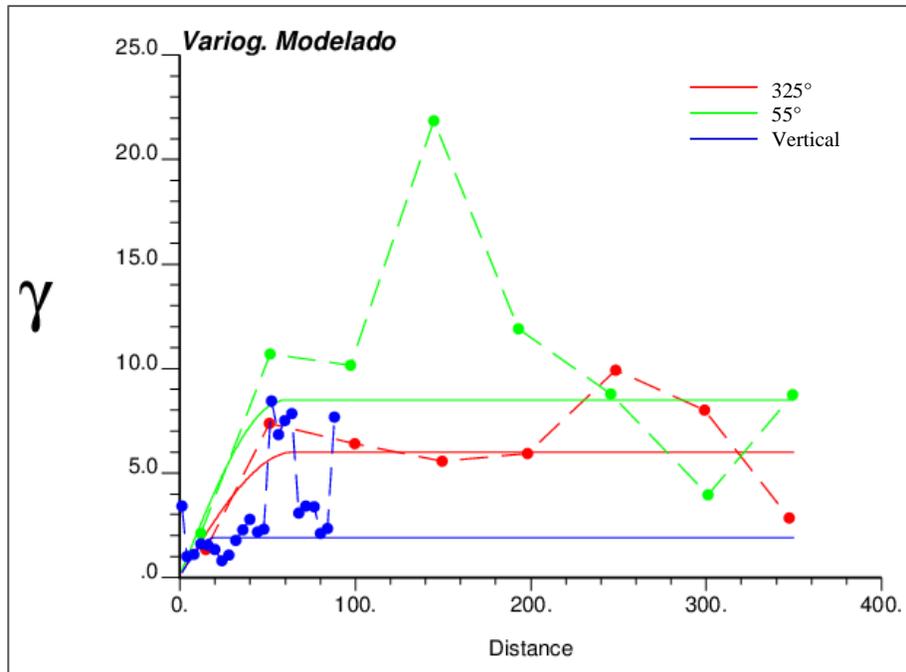
**Tabla 20. Estructuras anidadas de los variogramas modelados.**

Unidad	Óxidos					Sulfuros					
	Estructuras	Tipo	Sill	Dirección / Alcances			Tipo	Sill	Dirección / Alcances		
				325°	55°	0			325°	55°	0
<b>Dip</b>			0	0	-90			0	0	-90	
<b>Dist. Paso</b>			1	1	1			1	1	1	
<b>Estructura 1</b>	Pepita	0.1				Pepita	1.5				
<b>Estructura 2</b>	Esférico	1.8	65	60	20	Esférico	11.0	100	70	145	
<b>Estructura 3</b>	Esférico	4.1	65	60	1e21	Esférico	2.5	100	70	1e21	
<b>Estructura 4</b>	Esférico	2.48	1e21	60	1e21	Esférico	0.375	1e21	70	1e21	

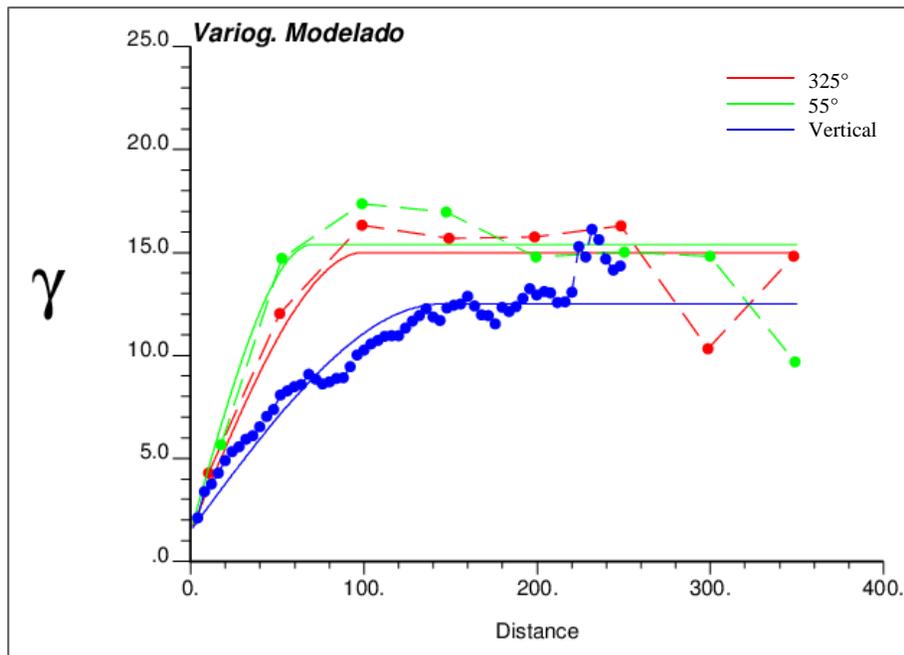
Cabe destacar que se usó la estructura esférica en todos los variogramas porque se ajustaba mucho mejor a las curvas experimentales que la estructura exponencial, ya que ésta última crecía muy rápido y en el corto alcance no se ajustaba de manera adecuada. Igualmente

los variogramas modelados presentan un alcance máximo acorde a la varianza de los datos (8.480 para el caso de los óxidos y 15.375 para el caso de los sulfuros).

**Figura 59. Variograma modelado óxidos.**



**Figura 60. Variograma modelado sulfuros.**



#### 5.4 Planes de Kriging - Validación cruzada

Una vez determinados los modelos de variograma a emplear en la estimación, es importante definir la vecindad de búsqueda del kriging. Para ello, se emplea una herramienta conocida como validación cruzada que permite determinar para diferentes vecindades de búsqueda cuál de estas arroja mejores resultados al comparar los valores reales en su respectiva coordenada y su estimación a partir de los restantes valores en esa misma coordenada. Para poder definir cuál es la mejor vecindad, se efectúa una comparación de cuatro parámetros:

- Insesgo global: el cual está relacionado a que la esperanza del error medio cometido (error de la estimación vs. valor real) sea cero o muy cercano a cero. Por tal motivo, el plan de kriging con un valor medio del error más cercano a cero corresponderá al mejor plan respecto al in sesgo global.
- Insesgo condicional: Dado que se espera que la estimación arroje el resultado conocido, se efectúa un gráfico de dispersión de los valores estimados vs. los valores reales. Si

fueran iguales, los datos deberían encontrarse sobre la línea diagonal o bisectriz de la gráfica (en este orden de ideas, correspondería a una recta con pendiente 1, motivo por el cual se analiza el valor de la pendiente para efectuar las comparaciones y aquel plan con valor más cercano a 1 presentaría una mejor estimación sin sesgo condicional).

- Coeficiente de correlación: De igual forma, si los datos estimados se acercan bastante a los datos reales; significaría una mayor correlación entre ambos conjuntos de datos. Para ello se analiza el coeficiente de correlación  $R^2$ . Aquel plan de kriging que tenga un coeficiente de correlación más elevado y cercano a 1, será el plan con mejor desempeño en la estimación respecto a este parámetro.
- Precisión de la estimación: Finalmente, se analiza si la estimación es precisa; lo cual es una de las propiedades del kriging. Para ello se analiza la varianza del error de estimación; teniendo en cuenta que una menor varianza del error corresponderá a una mejor estimación. Esto permite comparar los diferentes planes de kriging y determinar cuál arrojó mejor precisión en la estimación.

#### **5.4.1 Planes de Kriging**

Los planes de kriging analizados en el presente estudio se presentan en la Tabla 21. Es importante aclarar que cada uno de estos planes fue evaluado para cada unidad de estimación. Es decir, se analizaron 6 planes de kriging y 1 plan de inverso a la distancia, tanto en la unidad de óxidos, como en la de sulfuros. En total se evaluaron 14 planes.

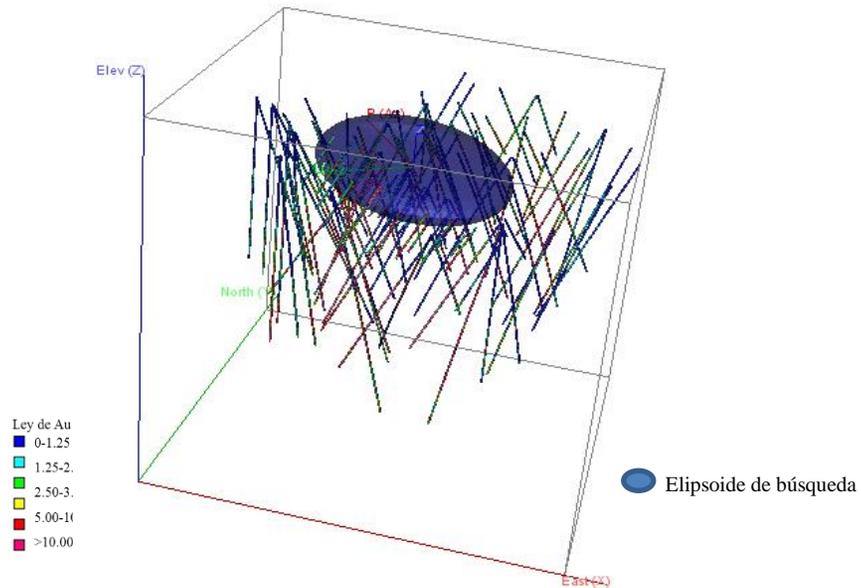
Los radios de búsqueda fueron seleccionados en la dirección de la anisotropía identificada en la variografía. En tal sentido, en dicha dirección se presenta un mayor radio de búsqueda (200 m), en la dirección ortogonal a dicha dirección un radio de 150 m y en la vertical un radio de búsqueda de 50 m (dada la cercanía de las muestras cada 4 m según compósitos). Con esto se garantiza, dada la separación entre sondajes (aprox. 50 m), el encontrar el número de muestras requeridas en los diferentes planes de kriging propuestos (y de al menos dos sondajes). Igualmente si bien los alcances en los variogramas no superan los 100 m en las direcciones X e Y, se tomó un valor superior de radio de búsqueda con el fin de poder estimar la mayor cantidad de bloques posibles según el dominio (tamaño del modelo de bloques) solicitado para este proyecto; adicionalmente para evitar grandes extrapolaciones se definió

como 4 datos el mínimo número de datos para estimar un bloque. A continuación en la Figura 61 se presenta el modelo de búsqueda en 3D.

**Tabla 21. Planes de kriging propuestos.**

<b>Plan</b>	<b>Tipo de Plan de Kriging</b>	<b>Datos a Usar</b>	<b>Dirección y radio de Búsqueda</b>
Plan 1	Búsqueda Elipsoidal	Mín. datos usar: 4 Máx. datos usar: 8	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 2	Búsqueda Elipsoidal	Mín. datos usar: 4 Máx. datos usar: 16	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 3	Búsqueda Elipsoidal	Mín. datos usar: 4 Máx. datos usar: 24	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 4	Búsqueda por Octante	Mín. datos usar: 4 Mín. datos por Octante: 1 Máx. datos por Octante: 1 Máx. datos usar: 8	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 5	Búsqueda por Octante	Mín. datos usar: 4 Mín. datos por Octante: 1 Máx. datos por Octante: 2 Máx. datos usar: 16	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 6	Búsqueda por Octante	Mín. datos usar: 4 Mín. datos por Octante: 1 Máx. datos por Octante: 4 Máx. datos usar: 32	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m
Plan 7	Inverso a la Distancia	Potencia: 2 Mín. datos usar: 4 Máx. datos usar: 12	Azimut: 325° / Dip: 0 Radio en X: 200 m Radio en Y: 150 m Radio en Z: 50 m

**Figura 61. Esquema 3D de elipsoide de búsqueda.**



#### 5.4.2 Validación cruzada

En las Tabla 22 y Tabla 23 se presentan los resultados obtenidos en cada plan de kriging para cada uno de los parámetros de análisis mencionados anteriormente, tanto para la unidad de óxidos, como para la de sulfuros. En amarillo se encuentra resaltado el valor que correspondería al mejor plan para cada criterio de comparación.

**Tabla 22. Resultados de validación cruzada para óxidos.**

Cristerios	Plan 1	Plan 2	Plan 3	Plan 4	Plan 5	Plan 6	Plan 7
Insesgo Global	0.00126	0.00353	0.00318	0.00451	0.00626	0.00562	0.00708
Insesgo condicional	0.96340	0.97160	0.97760	0.97840	0.99840	0.99420	0.97440
R <sup>2</sup>	0.76120	0.76070	0.76090	0.75060	0.77230	0.76190	0.76740
Varianza del error	2.03619	2.03602	2.03221	2.11962	1.93256	2.02077	1.97286

**Tabla 23. Resultados de validación cruzada para sulfuros.**

<b>Criterios</b>	<b>Plan 1</b>	<b>Plan 2</b>	<b>Plan 3</b>	<b>Plan 4</b>	<b>Plan 5</b>	<b>Plan 6</b>	<b>Plan 7</b>
<b>Insesgo Global</b>	0.00166	0.00326	0.00418	0.02032	0.01103	0.00371	0.00276
<b>Insesgo condicional</b>	0.99260	1.00070	1.00380	1.02310	1.01500	1.01400	0.99060
<b>R<sup>2</sup></b>	0.79930	0.79850	0.79790	0.79640	0.79730	0.79730	0.79850
<b>Varianza del error</b>	3.08666	3.09813	3.10792	3.13747	3.12046	3.11881	3.09932

Como se puede observar, en amarillo están los valores que mejor cumplen el criterio a evaluar; para la unidad de óxidos el plan 5 tiene un mejor desempeño en 3 criterios y para la unidad de sulfuros el plan 1 presenta un mejor desempeño en 3 criterios. Sin embargo, en algunos casos las diferencias con los demás planes son muy pequeñas. Es por esto, que para tomar una decisión respecto a los planes a seleccionar para la estimación del modelo de bloques, se empleó la siguiente metodología:

- En primer lugar, se calculó el porcentaje de diferencia de cada plan respecto al valor del plan que mejor cumple el criterio. Por ejemplo, para el criterio de insesgo global en los óxidos el valor que mejor cumple el criterio (insesgo global) es el del plan 1 que correspondería al valor más cercano a cero (0.00166). Con este valor se determina cual es la diferencia porcentual del valor obtenido en el criterio de insesgo global para los restantes planes.
- Una vez obtenidas las diferencias porcentuales respecto al plan que mejor desempeño tiene para cada criterio, se promedian dichas diferencias y el plan que obtenga un menor promedio es el seleccionado para efectuar la estimación. Esto permite seleccionar un plan que si bien puede no tener el mayor número de criterios con mejor desempeño, en promedio tiene un mejor desempeño que todos los restantes planes.

En la Tabla 24 y Tabla 25 se encuentran las diferencias porcentuales calculadas para cada uno de los planes respecto al “mejor” valor, según el criterio analizado. En amarillo se encuentra resaltado el criterio que presentaba mejor desempeño, en cuyo caso la diferencia porcentual será 0%.

**Tabla 24. Diferencias porcentuales respecto al mejor criterio (óxidos).**

<b>Criterios</b>	<b>Plan 1</b>	<b>Plan 2</b>	<b>Plan 3</b>	<b>Plan 4</b>	<b>Plan 5</b>	<b>Plan 6</b>	<b>Plan 7</b>
<b>Insesgo Global</b>	0.000	180.388	152.542	257.345	396.728	345.977	461.464
<b>Insesgo condicional</b>	3.506	2.684	2.083	2.003	0.000	0.421	2.404
<b>R<sup>2</sup></b>	1.437	1.502	1.476	2.810	0.000	1.347	0.634
<b>Varianza del error</b>	5.362	5.353	5.156	9.679	0.000	4.564	2.085
<b>Promedio (%)</b>	2.58	47.48	40.31	67.96	99.18	88.08	116.65

**Tabla 25. Diferencias porcentuales respecto al mejor criterio (sulfuros)**

<b>Criterios</b>	<b>Plan 1</b>	<b>Plan 2</b>	<b>Plan 3</b>	<b>Plan 4</b>	<b>Plan 5</b>	<b>Plan 6</b>	<b>Plan 7</b>
<b>Insesgo Global</b>	0.000	96.940	152.687	1127.025	566.161	124.022	66.877
<b>Insesgo condicional</b>	0.809	0.000	0.310	2.238	1.429	1.329	1.009
<b>R<sup>2</sup></b>	0.000	0.100	0.175	0.363	0.250	0.250	0.100
<b>Varianza del error</b>	0.000	0.371	0.689	1.646	1.095	1.042	0.410
<b>Promedio (%)</b>	0.20	24.35	38.47	282.82	142.23	31.66	17.10

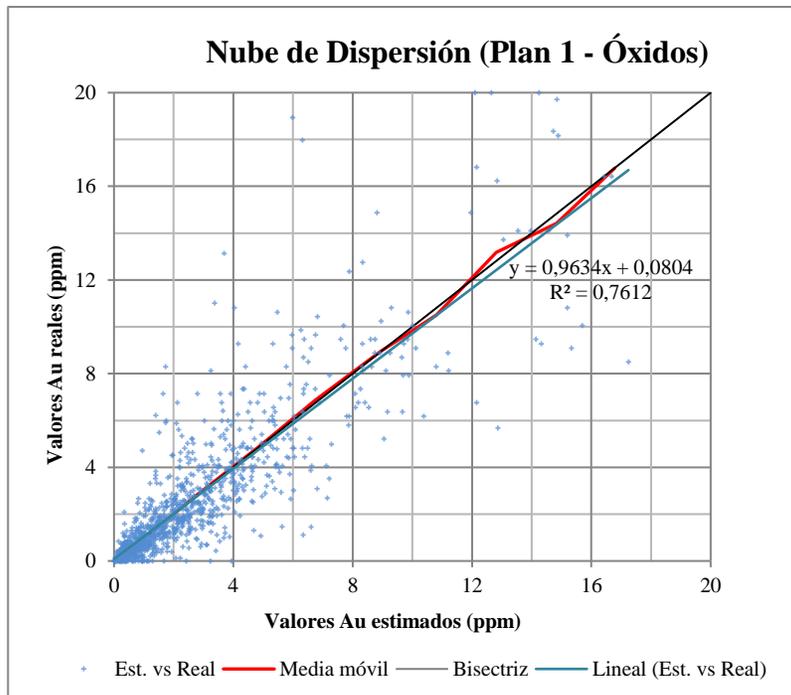
Como se puede ver en la Tabla 24, para el criterio de insesgo global; en el caso del plan 2, la diferencia porcentual respecto al valor reportado como mejor plan (plan 1 con un error medio del orden de 0.00166) sería del orden del 180%. Para el plan 3 la diferencia sería del 152%, para el plan 4 del 257%, para el plan 5 del 396%, para el plan 6 del 345% y para el plan 7 del 461%. Esto indica que las diferencias entre el plan con mejor desempeño (plan 1) para el criterio de insesgo global es de varios ordenes de magnitud respecto a los otros planes. Este mismo ejercicio se repite para cada criterio con lo cual es posible seleccionar el plan que en promedio presenta un mejor desempeño en todos los criterios.

Para el caso particular de este proyecto, los planes seleccionados son el plan 1 (elipse de búsqueda con 4 datos mínimo y 8 datos máximo) para la unidad de óxidos y el plan 1 (elipse de búsqueda con 4 datos mínimo y 8 datos máximo) para la unidad de sulfuros. Se observa como el plan con varios criterios con mejor desempeño (plan 5 en la unidad de sulfuros) no resultó seleccionado dado que su desempeño en el criterio de insesgo global es muy inferior al plan seleccionado (de varios ordenes de magnitud). En cambio, los planes seleccionados respecto a los demás criterios presentan variaciones máximas del orden del 5% respecto al mejor plan en criterios como insesgo condicional y varianza del error. Finalmente, en ambos

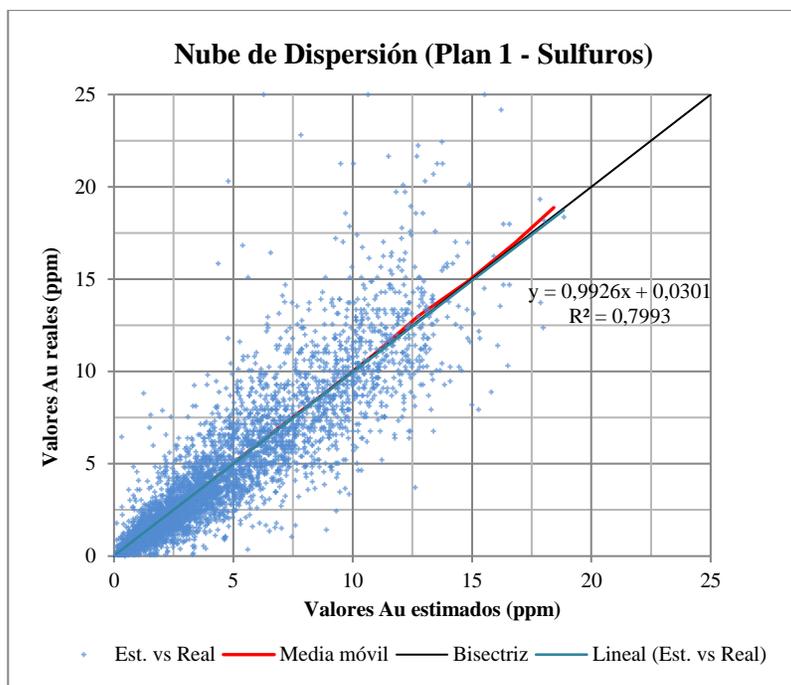
casos, el plan seleccionado resultó con el mejor desempeño en el criterio de in sesgo global y muy poca diferencia respecto a la varianza del error; que corresponden a las propiedades básicas del kriging: el mejor (más preciso) estimador lineal in sesgado.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el porcentaje promedio de variación respecto al plan o planes con mejor desempeño es el orden del 0.2% para el plan 1 en el caso de los óxidos, respecto a un 40.31% que presentaría el plan 3 como segundo con mejor desempeño respecto a los demás planes. Para el caso de la unidad de sulfuros la variación porcentual respecto al plan o planes de mejor desempeño fue del 2.58% para plan 1; respecto a un 17.10% que reportó el inverso a la distancia. En las figuras 62 y 63 se presentan los gráficos de dispersión de los valores estimados vs. los valores reales para los planes seleccionados.

**Figura 62. Gráfico de dispersión de valores estimados vs. reales (plan 1 – óxidos).**



**Figura 63. Gráfico de dispersión de valores estimados vs. reales (plan 1 – sulfuros).**



En el anexo 10.4 se presentan las gráficas de los demás planes analizados.

## 6. Estimación - Kriging

Una vez definidos los modelos de variogramas, y seleccionados los planes de kriging se procedió a efectuar la estimación del modelo de bloques mediante Kriging Ordinario. Para ello se definió en primer lugar el dominio de estimación, posteriormente se procede a asignar las unidades de estimación a los bloques y finalmente con los planes de kriging seleccionados se procedió a estimar el modelo de bloques con las leyes de Au.

### 6.1 Modelo de bloques

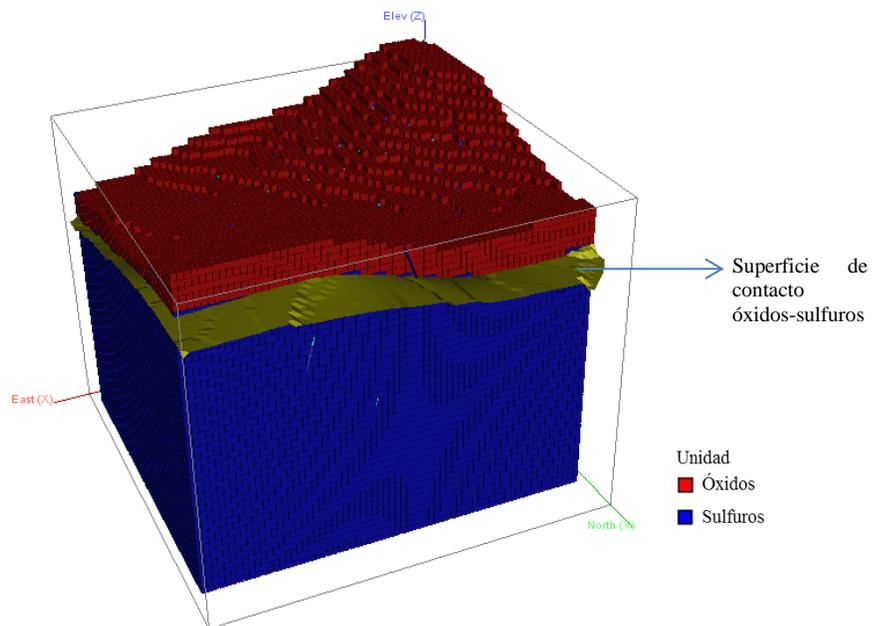
En primer lugar se procedió a construir un modelo de bloques con las dimensiones presentadas en la Tabla 26. Luego, con este modelo asignan los bloques a cada una de las unidades geológicas (para este caso en particular se definió la unidad de óxidos con el código 200 y la unidad de sulfuros con el código 300. Esto se efectuó seleccionando los bloques que se encuentran bajo la superficie y por sobre la superficie de contacto entre óxidos y sulfuros para el caso de los óxidos (bloques a los cuales se les asigna un código de roca = 200) y los bloques que se encuentran por debajo de la superficie de contacto entre óxidos y sulfuros se les

asigna el código 300 (que corresponde a los sulfuros). En la Figura 64 y Figura 65 se presenta el modelo geológico en 3D y sección.

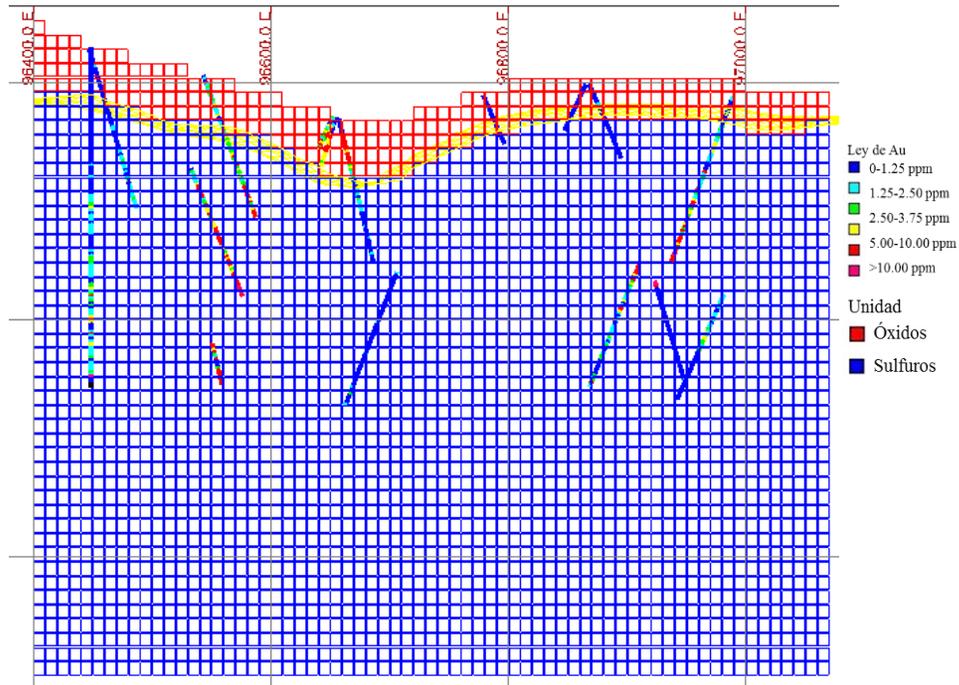
**Tabla 26. Dimensiones del modelo de bloques.**

	Número de Bloques	Dimensiones	Mínimo (O máximo)
<b>Este</b>	67	10	96400
<b>Norte</b>	59	10	87500
<b>Cota</b>	50	12	2300

**Figura 64. Modelo geológico en 3D (óxidos y sulfuros).**



**Figura 65. Sección Modelo geológico (óxidos y sulfuros).**



## 6.2 Parámetros de Kriging

De acuerdo a los planes seleccionados se presentan a continuación los parámetros empleados para la estimación mediante kriging ordinario (Tabla 27).

**Tabla 27. Parámetros a ser empleados en el Kriging.**

	Óxidos			Sulfuros		
	X: 200	Y: 150	Z: 50	X: 200	Y: 150	Z: 50
<b>Radio de Búsqueda</b>	325°			325°		
<b>Azimuth búsqueda</b>	0°			0°		
<b>Dip</b>	200			300		
<b>Código Roca</b>	X: 3	Y: 3	Z: 3	X: 3	Y: 3	Z: 3
<b>Discretización del bloque</b>	Elipsoidal			Elipsoidal		
<b>Tipo de búsqueda</b>	Ordinario			Ordinario		
<b>Tipo de Kriging</b>	Constante			Constante		
<b>Varianza de Bloque</b>	12			12		
<b>Altura constante de bloque</b>	Mín	Máx		Mín	Máx	
<b>Número de muestras</b>	4	8		4	8	

Los radios de búsqueda seleccionados permiten considerar al menos dos sondajes en el radio de búsqueda. Esta búsqueda se efectúa igualmente en la dirección de la mineralización 325° (dirección principal de anisotropía). Igualmente tratan de ampliar el cálculo de bloques al mayor porcentaje posible de bloques del dominio definido en la Tabla 26.

### 6.3 Resultados de Kriging

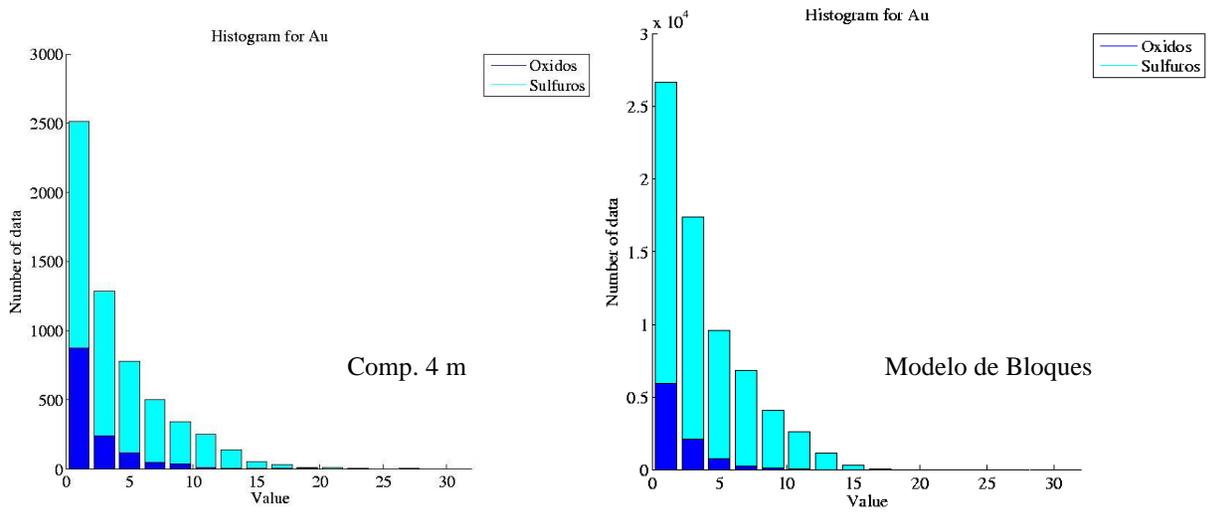
En la Tabla 28 se presentan las estadísticas de la estimación mediante Kriging.

**Tabla 28. Estadísticas de estimación mediante Kriging.**

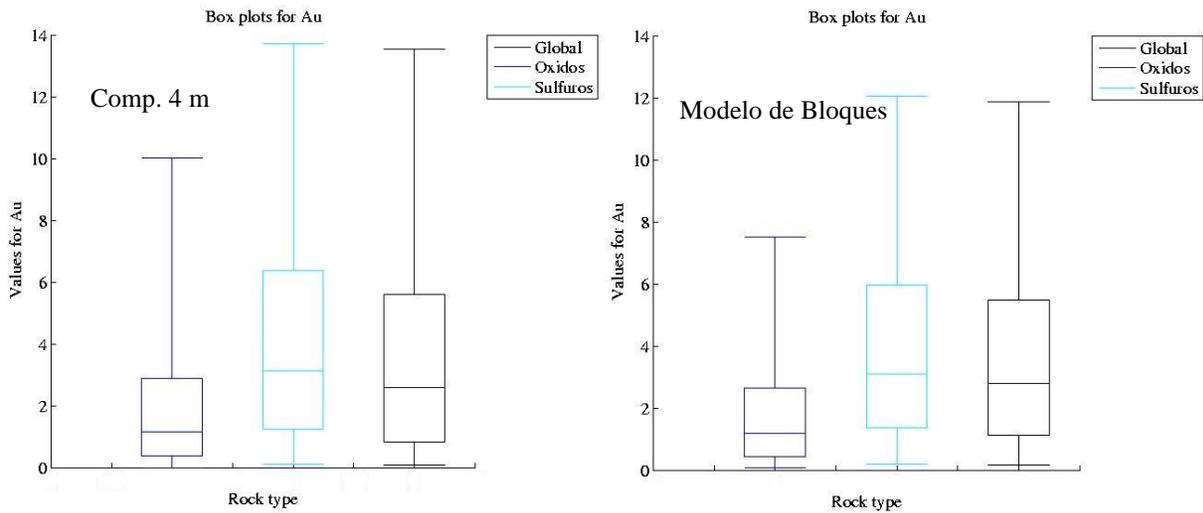
Parámetro	Compósito 4 m			Modelo de Bloques (con recursos Inferidos)			Modelo de Bloques (sin recursos Inferidos)		
	Óxidos	Sulfuros	Global	Óxidos	Sulfuros	Global	Óxidos	Sulfuros	Global
<b>Datos</b>	1306	4635	5941	14400	110328	124728	9221	59618	68839
<b>Max</b>	20	25	25	19.705	21.281	21.281	19.705	21.281	21.281
<b>Min</b>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Media</b>	2.230	4.287	3.835	1.598	3.849	3.589	1.921	4.021	3.739
<b>Varianza</b>	8.480	15.375	14.585	3.563	9.545	9.372	4.545	11.005	10.651

Como se observa en la Tabla 28, los valores estimados reflejan una menor varianza que los valores originales empleados en la estimación (compósitos de 4 m), lo cual demuestra el efecto de suavizamiento del Kriging. A continuación se presentan los histogramas y box-plot comparativos del compósito de 4 m vs. los valores estimados (sin tener en cuenta recursos inferidos), donde también es posible ver el efecto del suavizamiento (menores valores extremos).

**Figura 66. Comparativo de histogramas Modelo de Bloques vs. Compósito 4 m.**

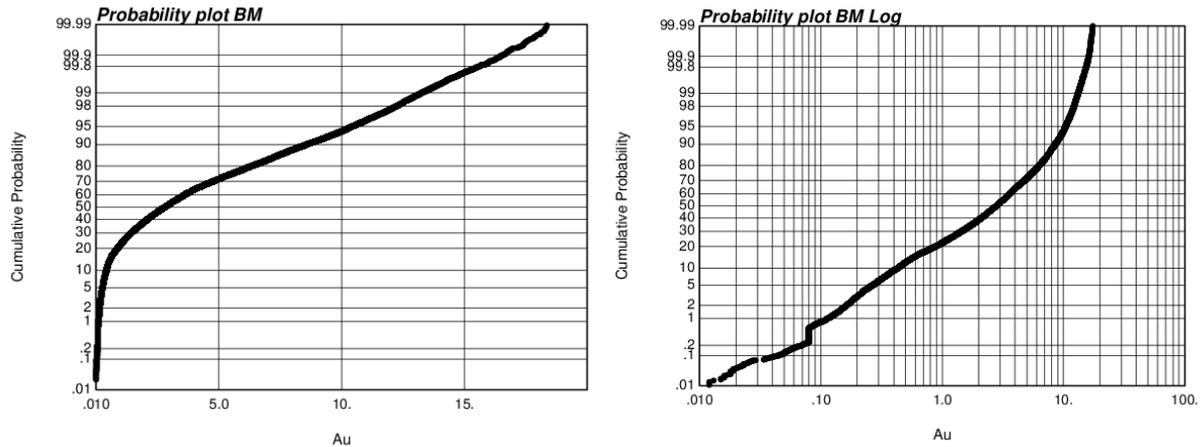


**Figura 67. Comparativo de Box-plot Modelo de Bloques vs. Compósito 4 m.**



A continuación se presentan los gráficos de probabilidad obtenidos para los datos del modelo de bloques.

**Figura 68. Gráficos de probabilidad datos modelo de bloques.**



De los gráficos anteriores es claramente diferenciable la presencia de las dos poblaciones (óxidos y sulfuros) de datos en el gráfico de probabilidad logarítmico (lo cual en parte está relacionado con la clasificación de las unidades de estimación y que se analizó en el capítulo 4).

Es posible igualmente analizar las distribuciones del modelo de bloques vs. el compósito de 4 m para determinar si las distribuciones son iguales o presentan diferencias. Como se puede observar en la Figura 69 se tienen diferencias en las distribuciones de ambos conjuntos de datos, siendo claro como el modelo de bloques (eje vertical) está suavizado y por ende presente valores menores en las leyes más altas.

Finalmente, se presenta la curva tonelaje-ley para el modelo de bloques y su comparación con la curva tonelaje-ley para el compósito de 4 m (Figura 70).

Figura 69. QQ plot compósito de 4 m vs. Modelo de bloques.

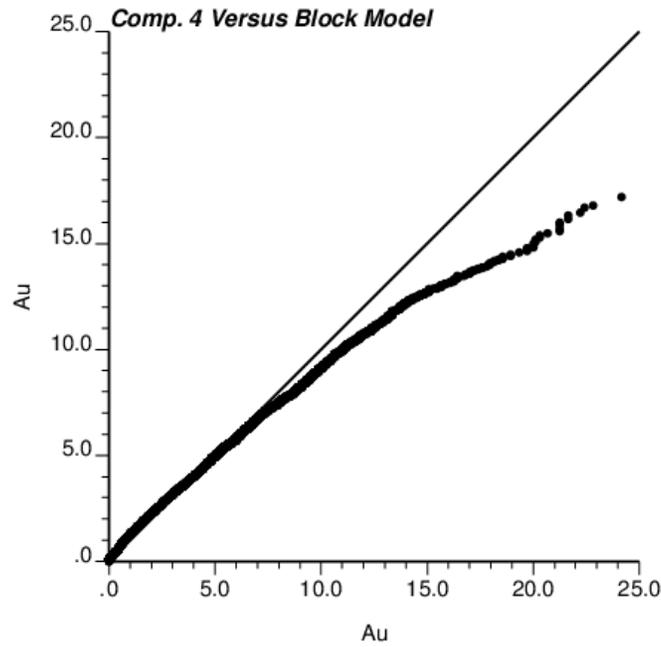
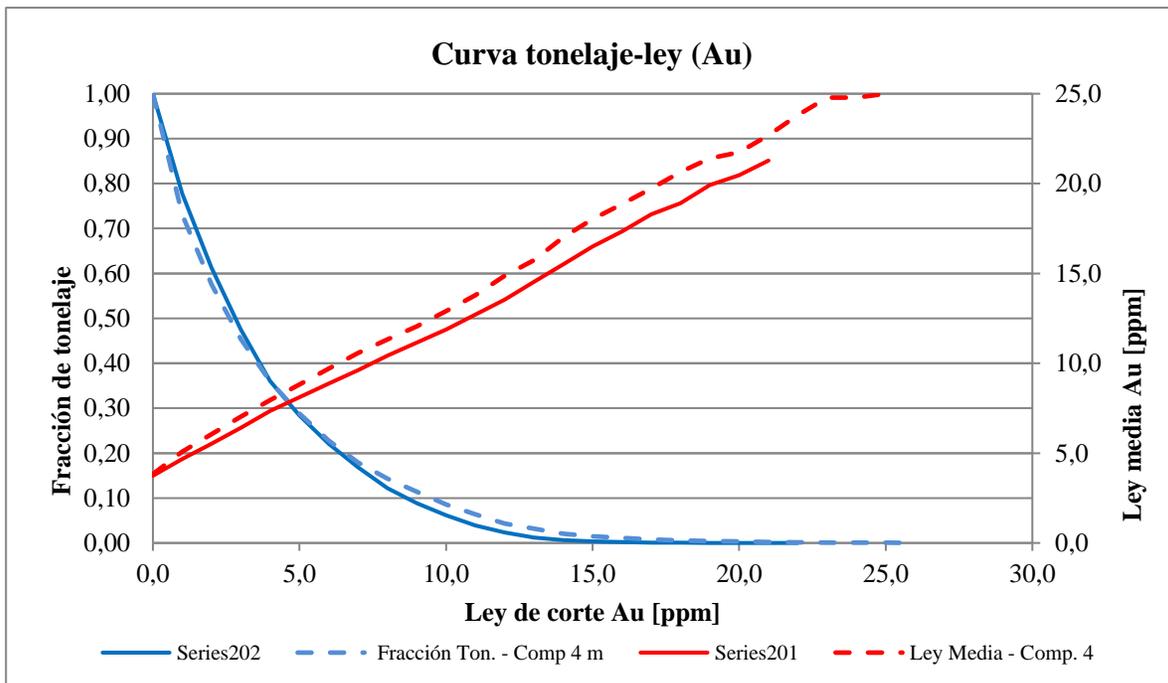


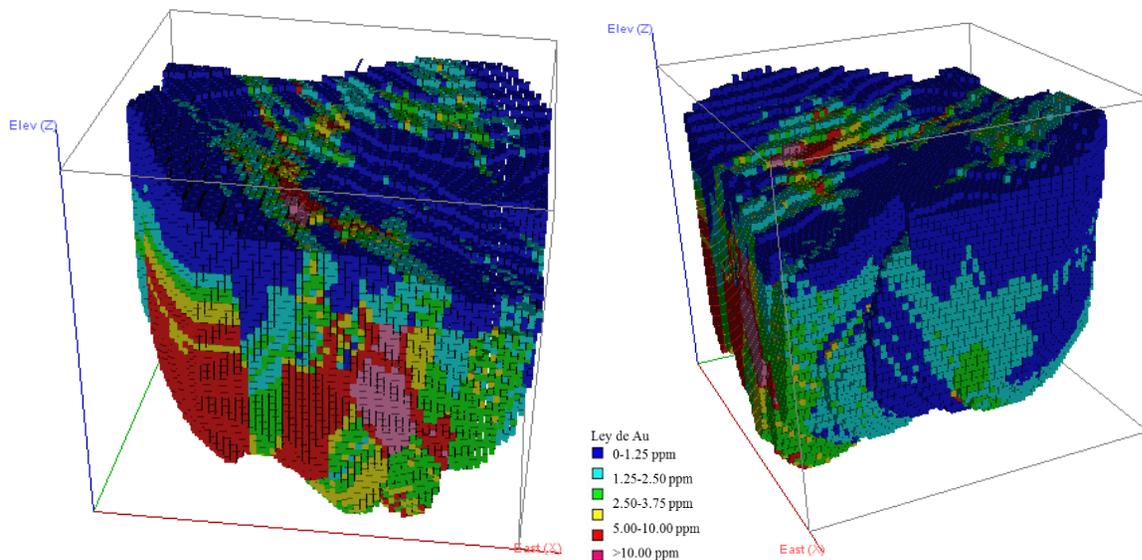
Figura 70. Curva tonelaje-ley para el modelo de bloques.



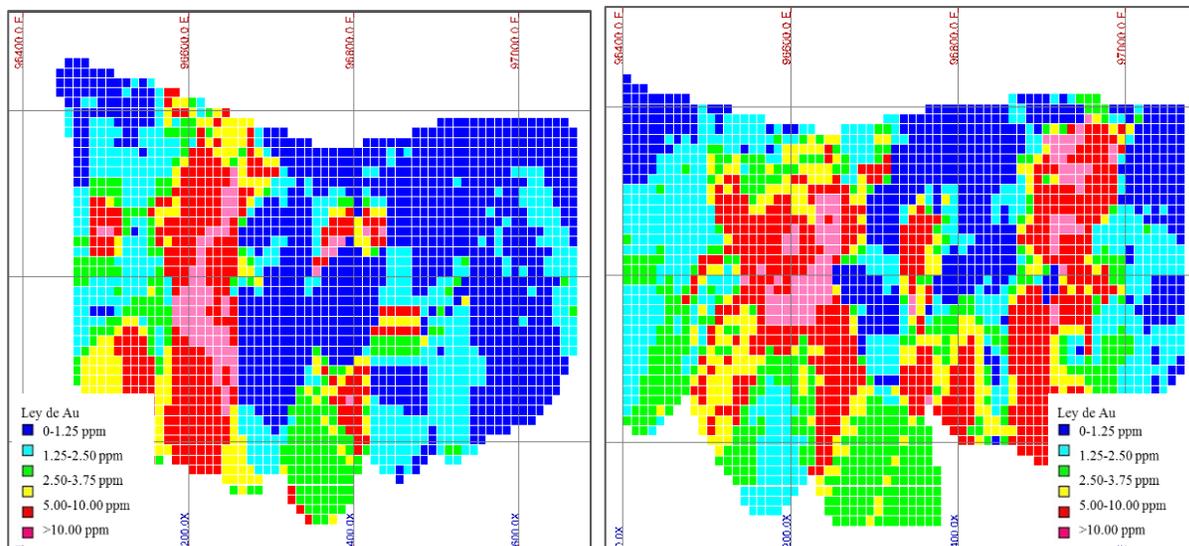
Como se puede apreciar en la gráfica anterior, el estimador por kriging genera un suavizamiento de los valores haciéndolos que tiendan a la media; motivo por el cual la curva de ley media del modelo de bloques (línea roja continua) se observa por debajo de la línea de la ley media de los datos de compósitos de 4 m (línea roja punteada). De igual forma, el kriging presenta inconvenientes al analizar funciones de transferencia no lineales como son el tonelaje y la ley media debido al sesgo condicional. Así para leyes altas, se observa una sobre-estimación de las leyes con lo cual se obtiene una mayor fracción de tonelaje por debajo de dicha ley de corte y para leyes bajas una sobre-estimación de las leyes. Es por eso que para este caso a partir de leyes de corte del orden de 5.0 ppm la fracción de tonelaje acumulada es mayor para el modelo de bloques (línea azul continua) que para el compósito de 4 m (línea azul punteada). Por ejemplo, para una ley de corte de Au de 10 ppm la fracción del tonelaje inferior a esta ley de corte es del orden del 94% para el modelo de bloques (es decir, por debajo de una ley de corte de 10 ppm se encuentra el 94% del tonelaje del depósito), mientras que para el compósito de 4 m es del orden del 91%.

A continuación se presenta un despliegue gráfico del modelo de bloques, en varias direcciones y secciones.

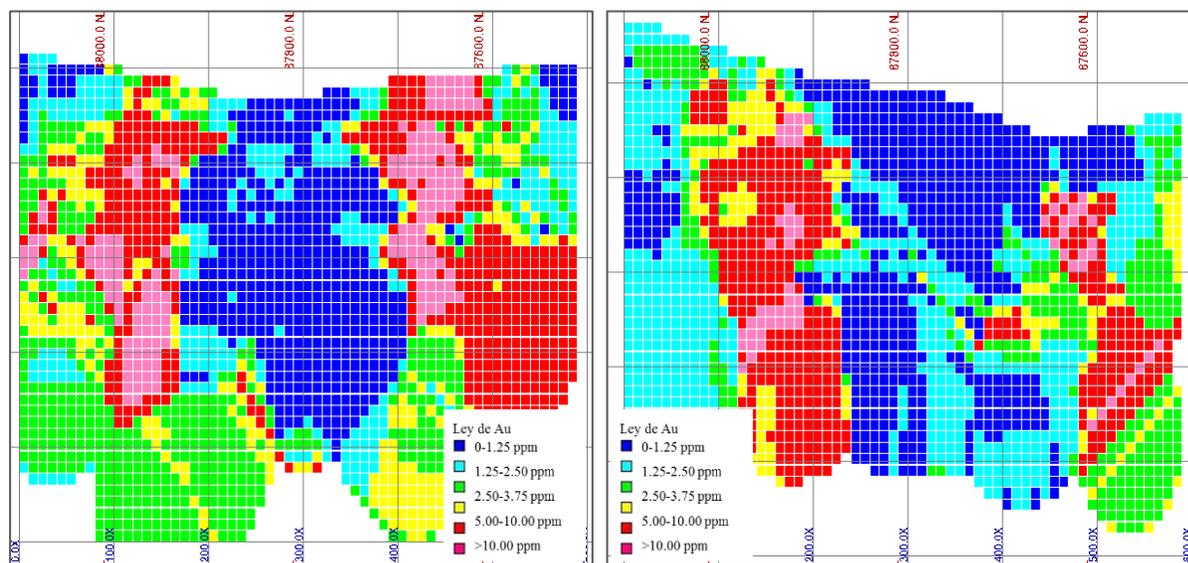
**Figura 71. Despliegue gráfico del modelo de bloques en 3D (leyes de Au).**



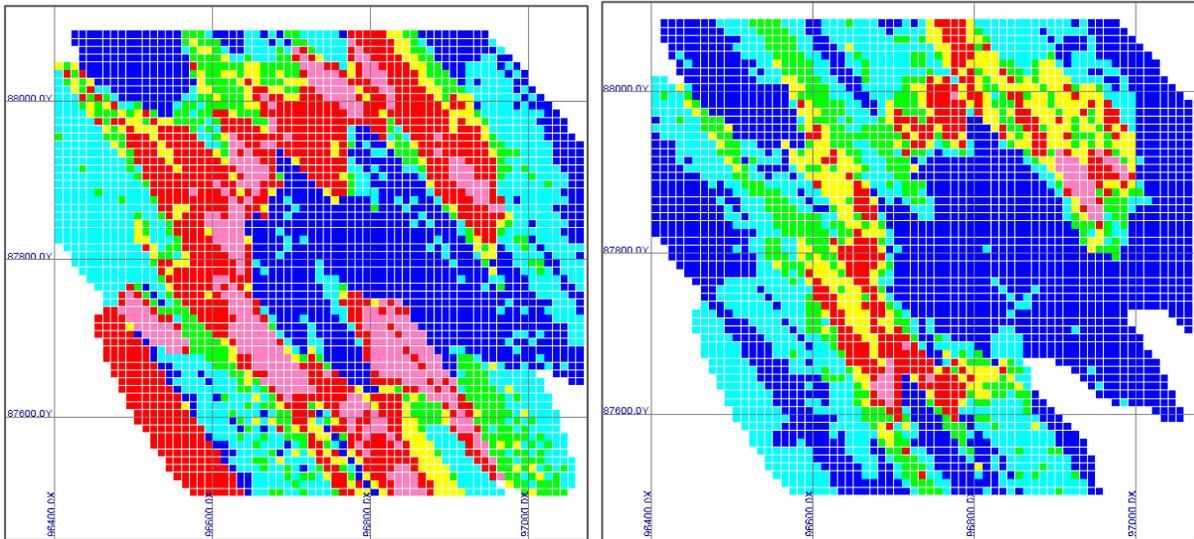
**Figura 72. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano XZ (leyes de Au).**



**Figura 73. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano YZ (leyes de Au).**

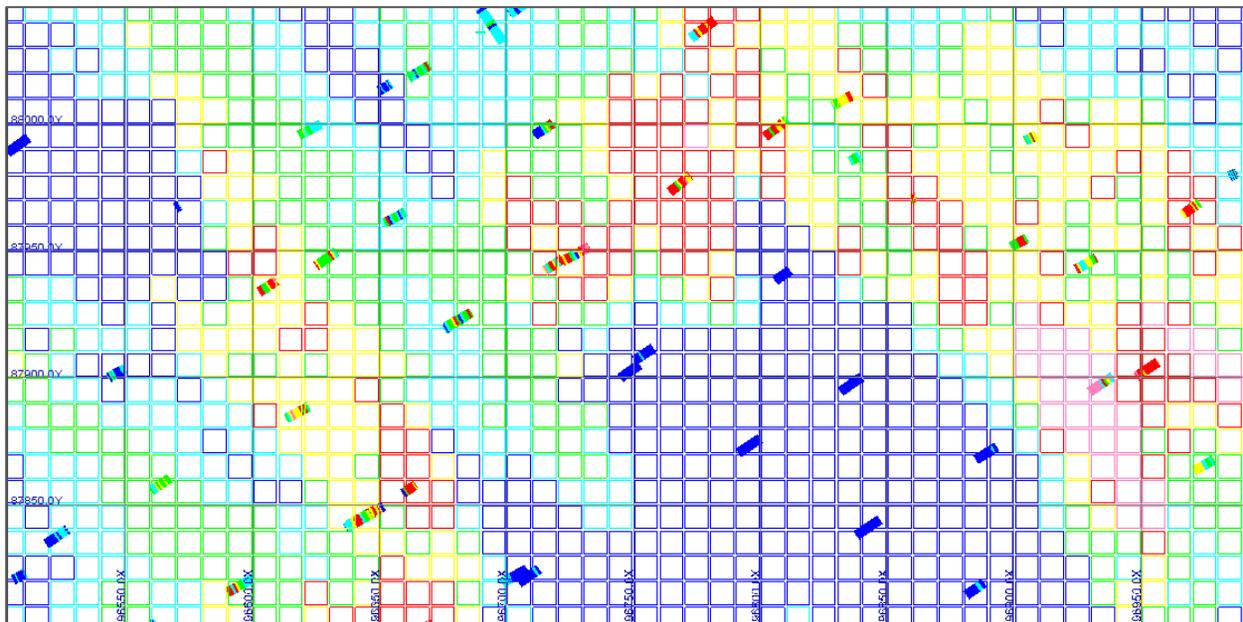


**Figura 74. Despliegue gráfico del modelo de bloques - plano XY (leyes de Au).**

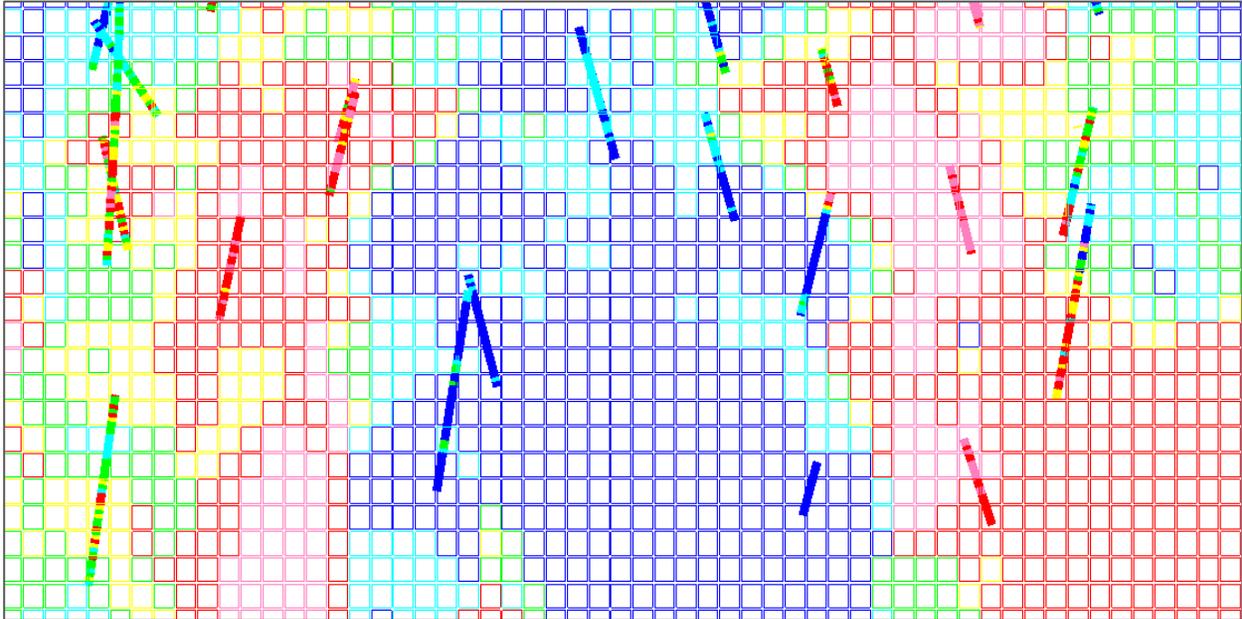


De igual forma, se presenta un despliegue gráfico con los sondajes, lo cual permite comparar visualmente si existe una relación entre el modelo estimado y los sondajes que fueron empleados como información dura.

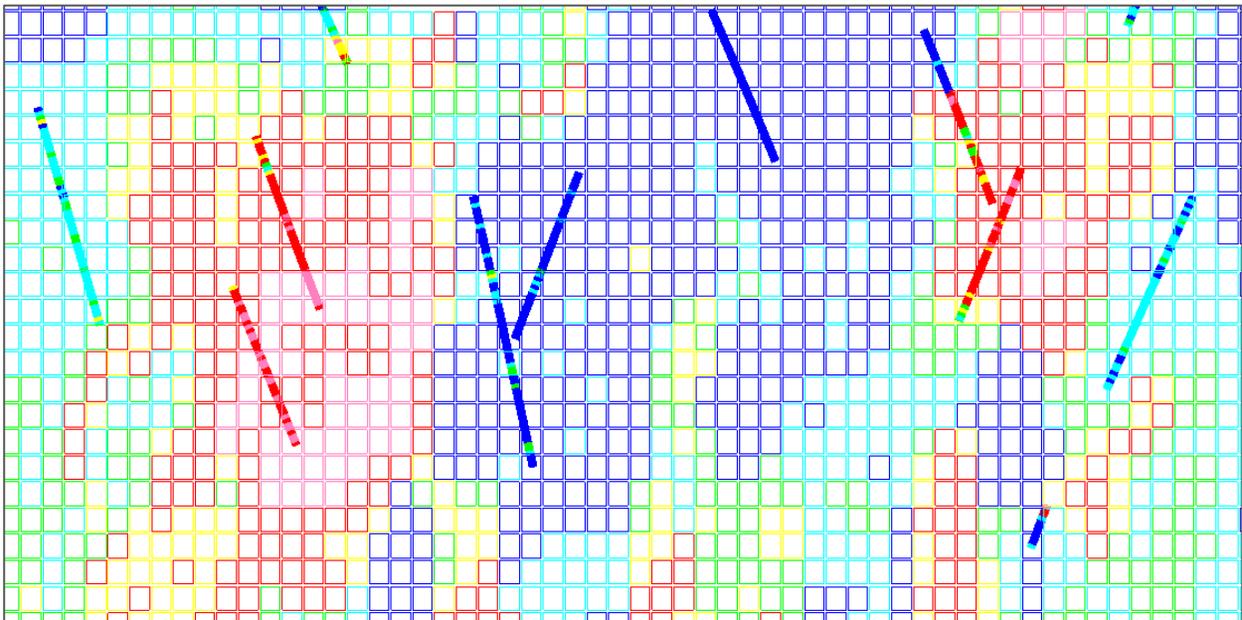
**Figura 75. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano XY (leyes de Au).**



**Figura 76. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano YZ (leyes de Au).**



**Figura 77. Comparación visual modelo de bloques y sondajes - plano XZ (leyes de Au).**



Como se puede observar en las figuras anteriores, existe correspondencia entre los sondajes y el modelo de bloques estimado mediante kriging; es decir, en zonas donde los sondajes reportan información de altas leyes los bloques estimados corresponden a altas leyes.

La misma situación ocurre para leyes bajas; con lo cual se puede validar visualmente el modelo de bloques estimado.

## 7. Categorización de Recursos

Una vez estimado el modelo de leyes de Au, es importante determinar los tipos de recursos acorde lo establecen los códigos mineros. Para este caso en particular se empleará lo definido por el código JORC (estándar Australiano), para lo cual se tienen en cuenta tres aspectos:

- Volumen: relacionado con una producción, que dependiendo del tipo de recursos podrá ser trimestral o anual.
- Medición de la incertidumbre: relacionada con el error en la estimación.
- Probabilidad de estar dentro del intervalo del error de medición.

De acuerdo entonces a estas tres características y a los volúmenes de producción suministrados en la guía, se definen los siguientes criterios para categorizar los recursos.

**Tabla 29. Criterios para categorizar los recursos de la unidad de Óxidos.**

Criterio	Recursos (óxidos)		
	Medidos	Indicados	Inferidos
<b>Volumen</b>	Una producción trimestral de 6.75 MTon y ley planificada de 2.65 ppm (bloque de dimensiones 200 x 250 x 50 m <sup>3</sup> )	Una producción anual de 148.5 MTon y ley planificada de 2.65 ppm (bloque de dimensiones 550 x 500 x 200 m <sup>3</sup> )	Los recursos restantes dentro del modelo de bloques
<b>Medición de Incertidumbre</b>	+/- 15% error	+/- 15% error	
<b>Probabilidad</b>	90%	90%	

**Tabla 30. Criterios para categorizar los recursos de la unidad de Sulfuros.**

Criterio	Recursos (óxidos)		
	Medidos	Indicados	Inferidos
<b>Volumen</b>	Una producción trimestral de 6.75 MTon y ley planificada de 3.77 ppm (bloque de dimensiones 200 x 250 x 50 m <sup>3</sup> )	Una producción anual de 148.5 MTon y ley planificada de 3.77 ppm (bloque de dimensiones 550 x 500 x 200 m <sup>3</sup> )	Los recursos restantes dentro del modelo de bloques
<b>Medición de Incertidumbre</b>	+/- 15% error	+/- 15% error	
<b>Probabilidad</b>	90%	90%	

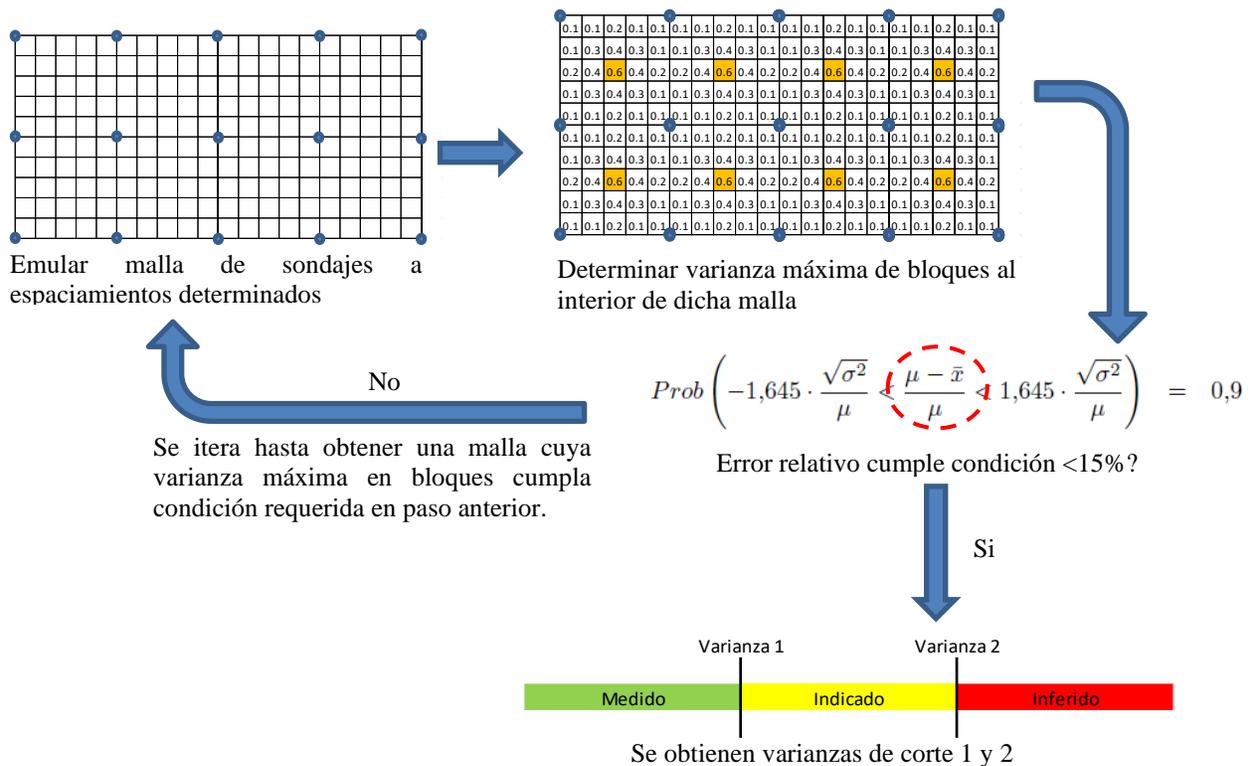
Para poder determinar esta categorización, existen diversos métodos tales como la varianza relativa del kriging, simulación, simulación con campos de anisotropía variables.

Para este caso particular se empleará una categorización empleando una varianza relativa empleando kriging ordinario, mediante los siguientes pasos:

- Se emula una malla de sondajes a determinadas separaciones acorde a los volúmenes de producción definidos para cada categoría.
- Se calcula la varianza máxima dentro de bloques (de igual tamaño al del modelo de bloques estimado – 10 x 10 x 12 m) al interior de la malla emulada. Para este caso no se requieren datos de leyes, dado que la varianza depende solo de la configuración y separación de los datos.
- La varianza máxima calculada en el bloque central, como se muestra en la Figura 78, que cumpla que el error relativo es menor al 15% para una probabilidad del 90%, será definida como la varianza de corte que permite clasificar los recursos como medidos, indicados o inferidos.

En la Figura 78 se esquematiza el proceso a seguir para clasificar los recursos.

**Figura 78. Metodología para categorizar recursos.**



De acuerdo a la metodología propuesta, se presentan a continuación las varianzas de corte encontradas, con el correspondiente error relativo calculado y el tamaño de la malla de sondaje que permiten categorizar los recursos (ver Tabla 31). En el anexo 10.5 se presentan los parámetros empleados en el software para determinar estas varianzas de corte.

**Tabla 31. Varianzas de corte, errores relativos y mallas de sondaje.**

	Óxidos		Sulfuros	
	Varianza 1	Varianza 2	Varianza 1	Varianza 2
<b>Varianza</b>	5.829825	7.977484	10.163880	17.970236
<b>Error relativo</b>	15.2 [%]	14.5 [%]	15.4 [%]	14.1 [%]
<b>Malla de sondaje</b>	58.3 x 58.3 [m]	95.0 x 95.0 [m]	68.3 x 68.3 [m]	118.3 x 118.3 [m]

Definidas las varianzas de corte es posible entonces clasificar los recursos del modelo de bloques. Aquellos bloques que tengan una varianza inferior a la varianza 1 serán categorizados como recursos medidos, los que tengan varianzas entre la varianza 1 y la

varianza 2 serán categorizados como recursos indicados y los que tengan una varianza mayor a la varianza 2 serán categorizados como recursos inferidos.

## 7.1 Inventario de recursos

De acuerdo entonces a las varianzas determinadas en el numeral anterior, se procederá a presentar un inventario de recursos en términos del tonelaje y cantidad de fino. Para ello se supondrá una densidad de la roca de 2.7 ton/m<sup>3</sup>. Igualmente se presentarán las curvas tonelaje ley para los recursos medidos, indicados e inferidos. Igualmente, dado que los recursos minerales o geológicos están definidos como aquellos que son susceptibles de ser extraídos económicamente se supondrá igualmente una ley de corte de 2.65 ppm para los óxidos y de 3.77 ppm para los sulfuros (según la ley esperada para los volúmenes de producción); como leyes que hacen viable la extracción económica del mineral contenido en la roca.

En primer lugar se presenta un resumen de los recursos “in situ” a modo de ejercicio académico; puesto que es bien conocido que un reporte de recursos y reservas debe tener en cuenta unas condiciones mínimas para poder considerar parte de dichos recursos “in situ” como recursos potencialmente explotables. Posteriormente, se definen los recursos acordes a las leyes de corte mencionadas y que por ende corresponderían a recursos que son económicamente explotables dado estudios previos que garanticen esto.

**Tabla 32. Reporte de recursos “in situ”.**

<b>Categoría</b>	<b>Inventario</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Sulfuros</b>	<b>Total</b>
<b>Medidos</b>	Tonelaje [Ton]	19,666,800	96,292,800	115,959,600
	Ley Media [ppm]	2.114	4.244	3.883
	Oro [oz]	1,466,318	14,415,048	15,881,366
<b>Indicados</b>	Tonelaje [Ton]	7,464,960	80,883,360	88,348,320
	Ley Media [ppm]	1.665	3.832	3.649
	Oro [oz]	438,543	10,933,945	11,372,488
<b>Inferidos</b>	Tonelaje [Ton]	19,524,240	180,276,840	199,801,080
	Ley Media [ppm]	1.052	3.647	3.393
	Oro [oz]	724,413	23,188,500	23,912,913

**Tabla 33. Reporte de recursos bajo ley de corte**

<b>Categoría</b>	<b>Inventario</b>	<b>Óxidos</b>	<b>Sulfuros</b>	<b>Total</b>
------------------	-------------------	---------------	-----------------	--------------

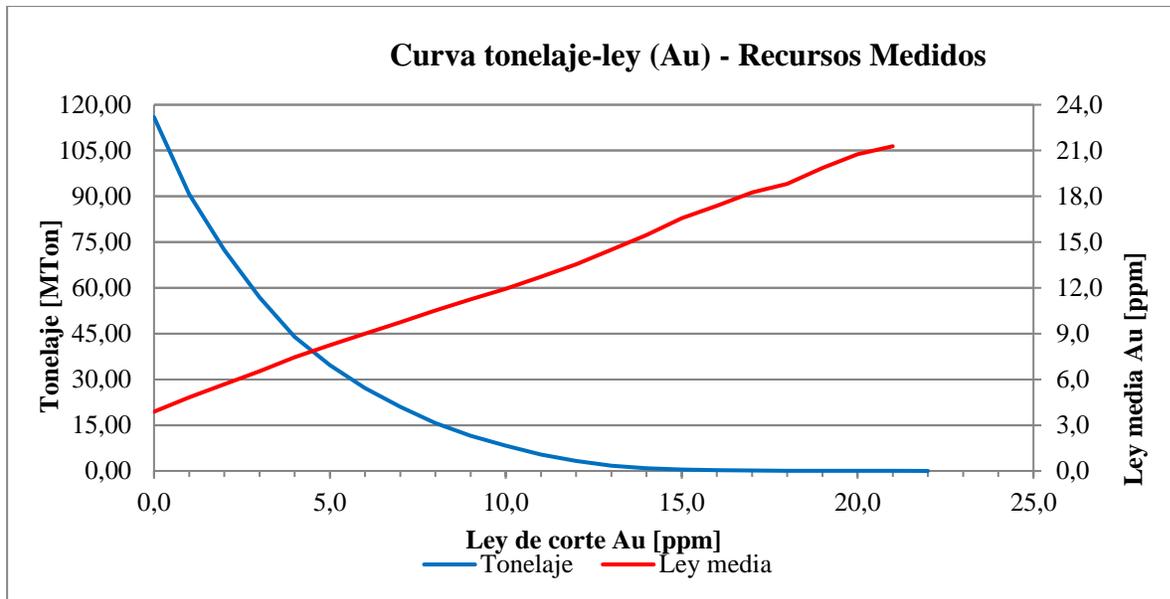
	Ley de Corte [ppm]	2.65	3.77	
<b>Medidos</b>	Tonelaje [Ton]	5,686,200	43,396,560	49,082,760
	Ley Media [ppm]	4.839	7.328	7.040
	Oro [oz]	970,486	11,217,835	<b>12,188,321</b>
<b>Indicados</b>	Tonelaje [Ton]	1,493,640	31,939,920	33,433,560
	Ley Media [ppm]	4.567	7.099	6.986
	Oro [oz]	240,636	7,997,680	<b>8,238,316</b>
<b>Inferidos</b>	Tonelaje [Ton]	1,785,240	64,913,400	66,698,640
	Ley Media [ppm]	3.882	6.654	6.580
	Oro [oz]	244,439	15,235,331	15,479,769

Luego de analizar las tablas anteriores, se observa como al establecer un criterio o envolvente económica que define una ley de corte para explotar un yacimiento, se reducen los recursos “in situ” de manera importante y por eso la necesidad de tener siempre unos costos bajos de extracción con el fin de poder explotar la mayor cantidad de recursos disponibles en el yacimiento. Son importante igualmente aspectos geotécnicos, ambientales, precios de los commodities, legales, entre otros temas que igualmente definen la envolvente económica. Por otro lado, se aprecia una cantidad importante de recursos inferidos, para lo cual se debe continuar la exploración y ampliar la malla de perforación de manera que se disminuya la incertidumbre sobre dichos recursos y puedan ser convertidos a recursos indicados y posteriormente a medidos.

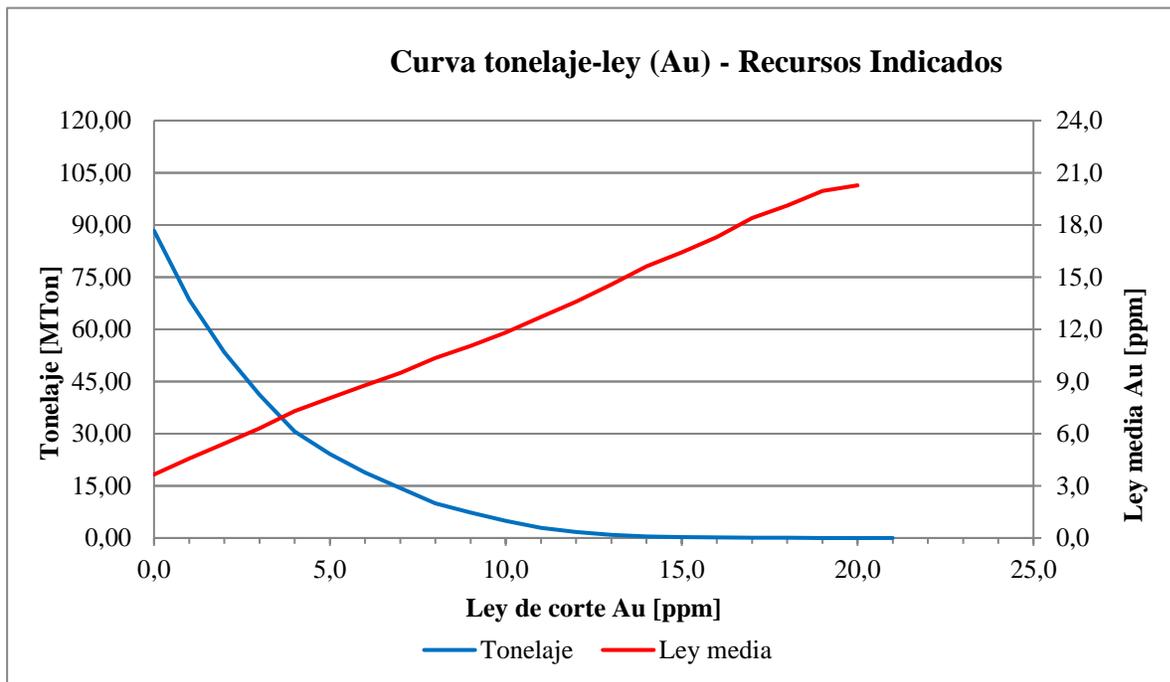
## 7.2 Curvas tonelaje-ley

A continuación se presentan las curvas tonelaje ley de las diferentes categorías de recursos: medidos, indicados e inferidos.

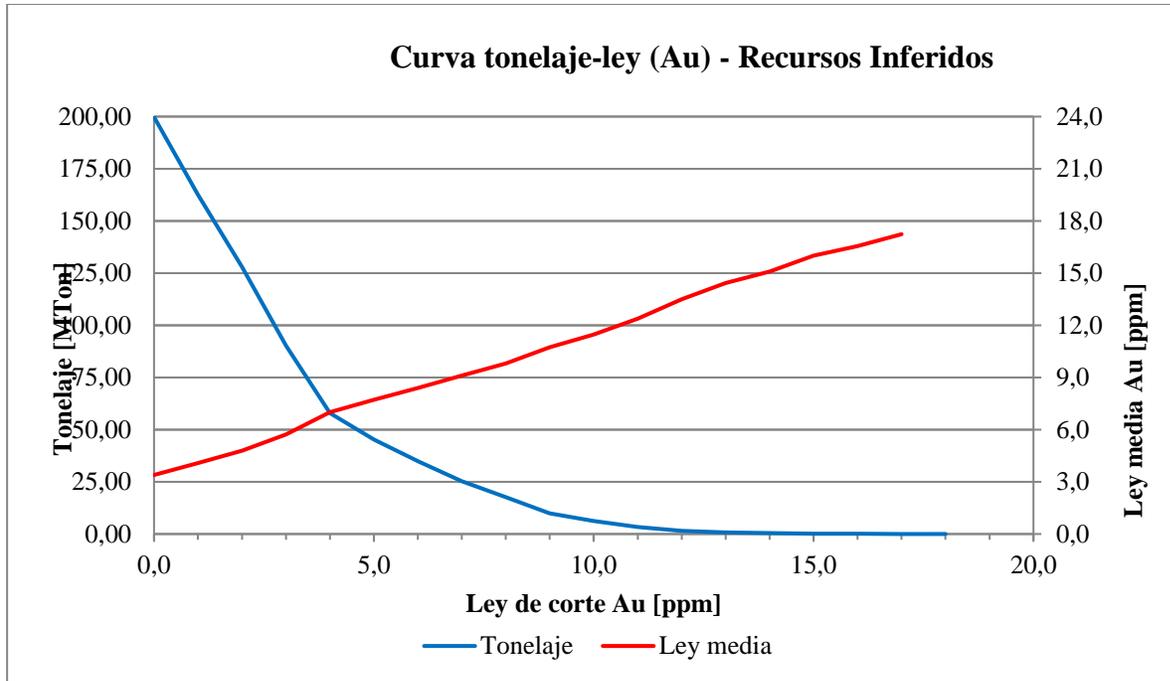
**Figura 79. Curva tonelaje-ley recursos medidos.**



**Figura 80. Curva tonelaje-ley recursos indicados.**



**Figura 81. Curva tonelaje-ley recursos inferidos.**



### 7.3 Despliegue gráfico de categorización de recursos

A continuación se presentan isométricos y secciones que dan cuenta de la categorización de los recursos como medidos, indicados e inferidos. Posteriormente se efectúa un análisis visual donde es posible como que a medida que un bloque se aleja de la información disponible en los sondajes la varianza de kriging de asociada a este bloque se hace más grande.

**Figura 82. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques en 3D.**

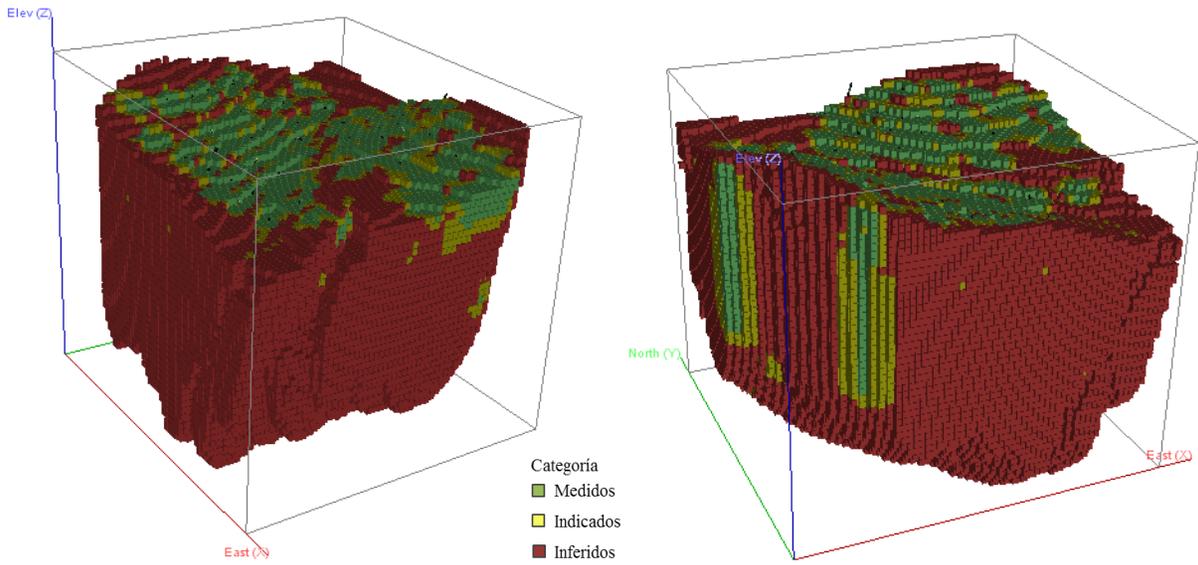


Figura 83. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección XY.

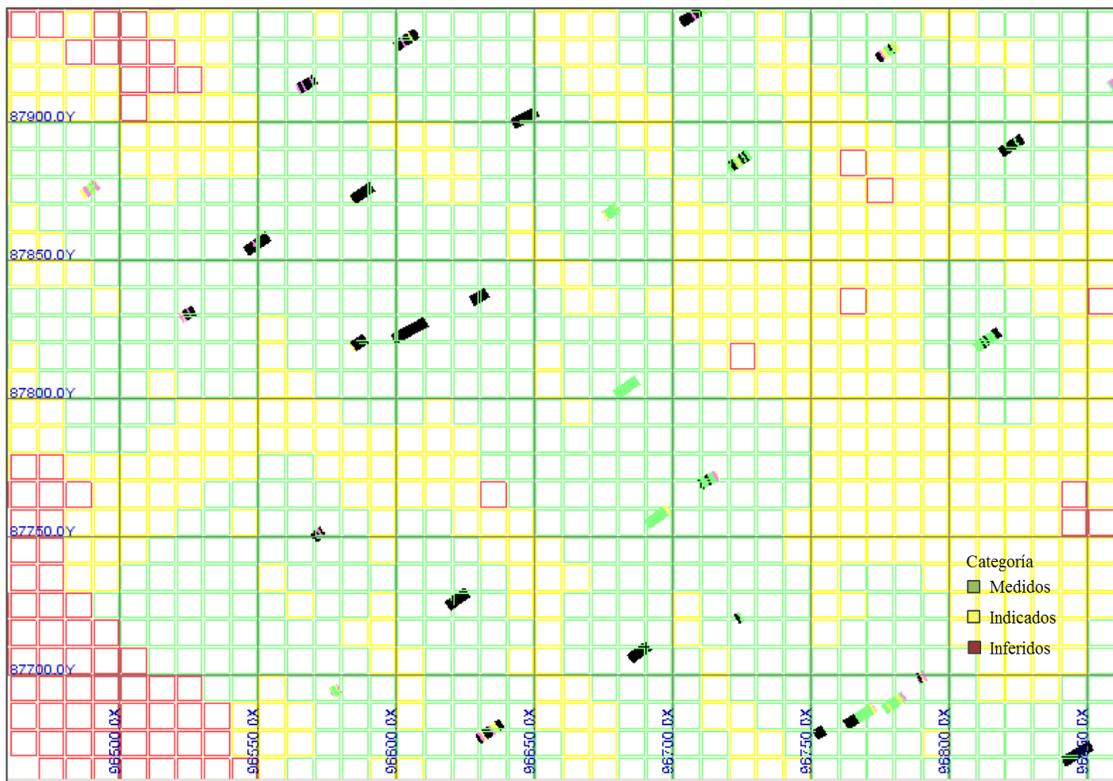
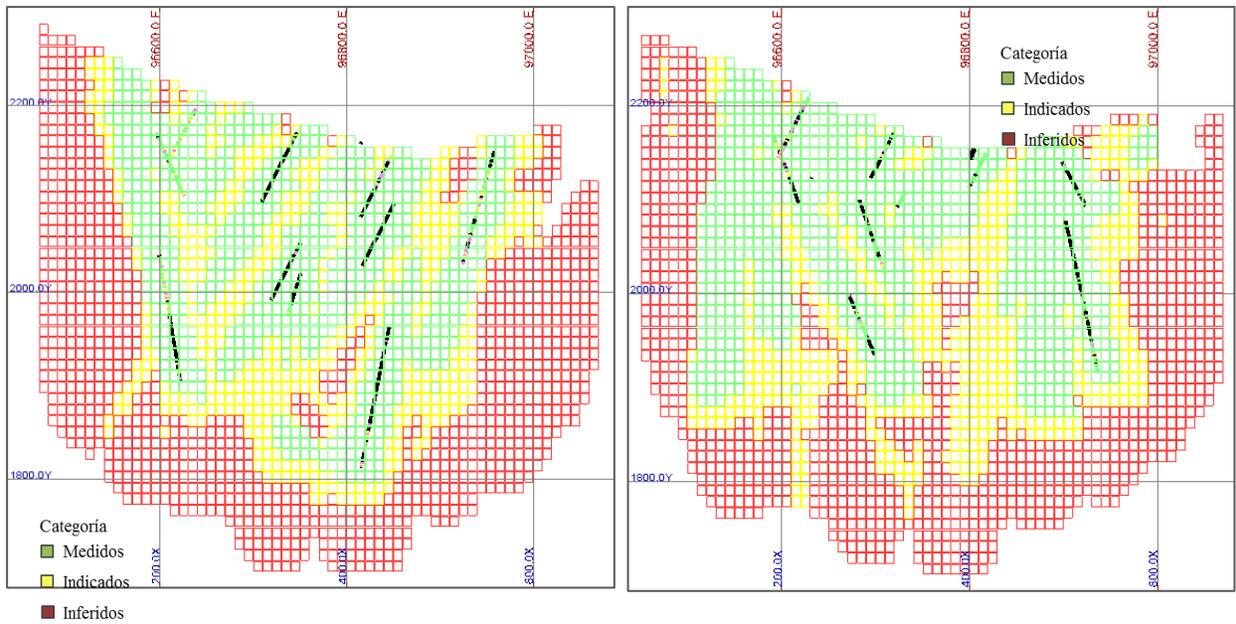
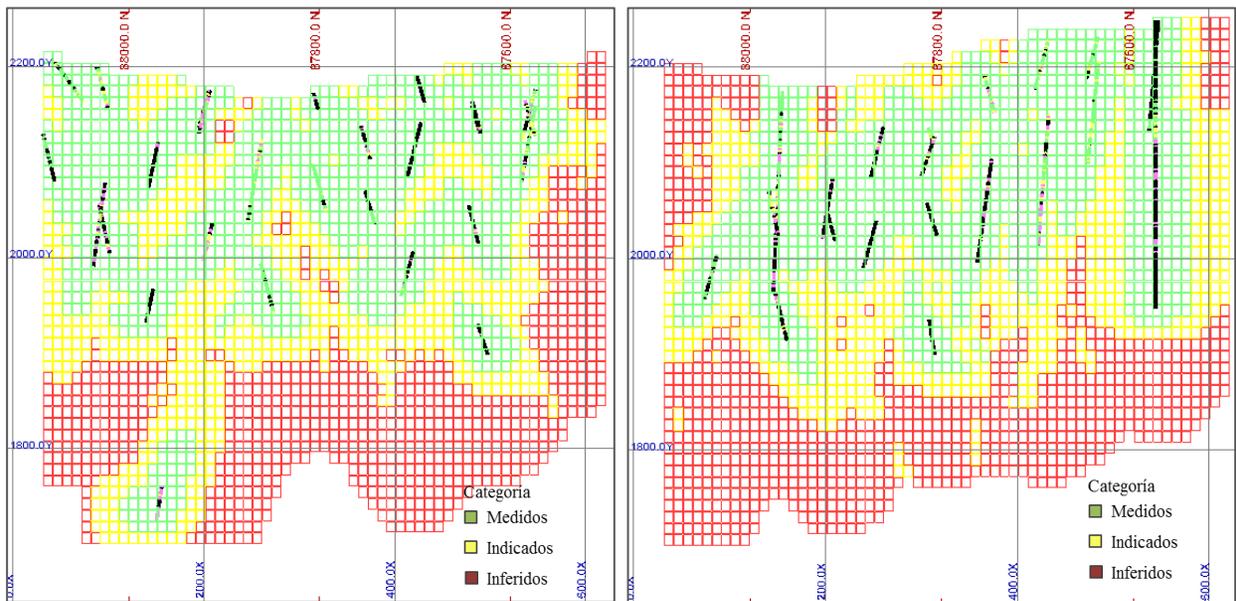


Figura 84. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección XZ.

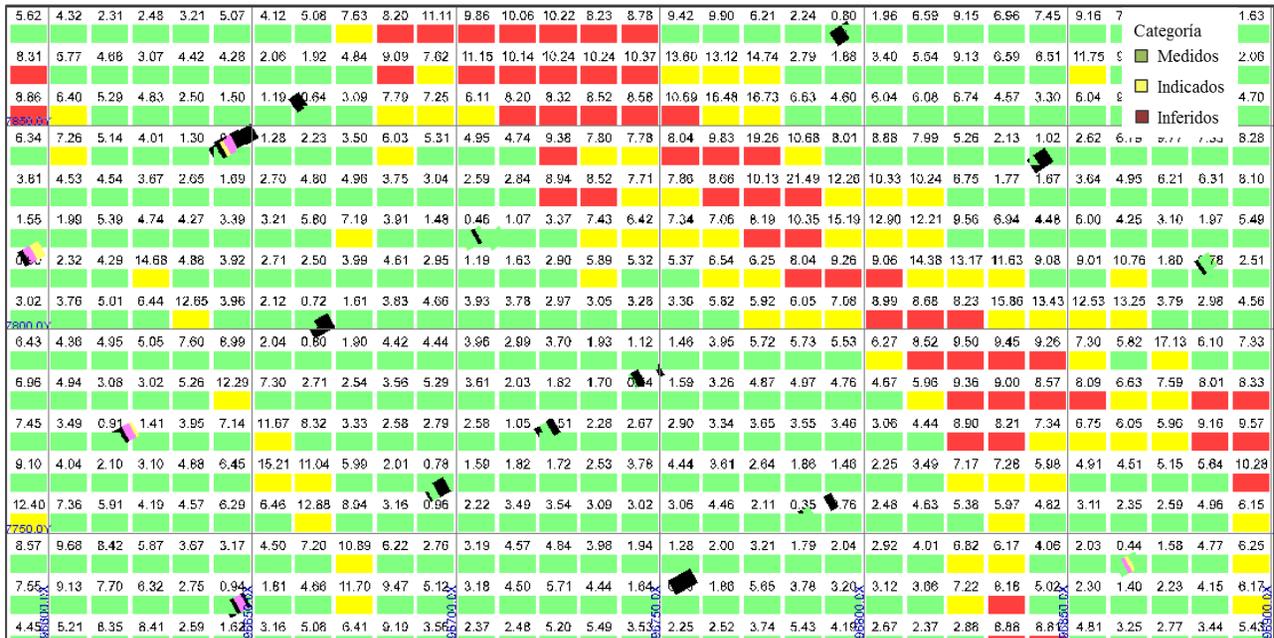


**Figura 85. Despliegue gráfico de categorización del modelo de bloques – sección YZ.**



Finalmente, es posible analizar como a partir de la información representada en los sondajes la varianza empieza a crecer a medida que se aleja de las zonas con datos, tal como se puede apreciar en la siguiente figura. Como se puede observar en las zonas rojas los datos están más alejados. Cerca de los sondajes la varianza es más pequeña.

**Figura 86. Comportamiento de varianza del kriging respecto a ubicación de sondajes.**



## 8. Conclusiones

Un resultado fundamental al efectuar un Análisis Exploratorio de Datos es determinar las unidades de estimación a ser empleadas posteriormente en la modelación, se tiene la confirmación de definir dos unidades de estimación: óxidos y sulfuros. Si bien la data ya consideraba una zonificación definida (óxidos y sulfuros) a lo largo de la zona de estudio se corroboró que éstas efectivamente pueden ser empleadas como unidades de estimación, dado su comportamiento más homogéneo (condición esencial para la posterior modelación). Se hace evidente en las gráficas qq-plot, box plot y probabilidad, la existencia de dos zonas con características distintas (óxidos y sulfuros), que complementado con el análisis de deriva, se confirman las dos zonas como unidades de estimación ante la ausencia de información más detallada como litologías y alteraciones que permitirían efectuar un análisis más exhaustivo de la génesis del yacimiento y los procesos determinadores de las leyes de oro.

En relación a las leyes informadas en los sondajes suministrados se observó que gran parte de las leyes obtenidas en los análisis (alrededor del 70%) están por debajo de una ley de

5 ppm. Otro 20% de las leyes se encuentran entre 5 y 10 ppm y el restante 10% son superiores a 10 ppm. De este último menos del 1% corresponde a leyes superiores a 20 ppm.

A partir de las estadísticas obtenidas de las muestras de sondajes suministradas en la base de datos, se pudo establecer que un tamaño de compósito óptimo para los datos entregados era de 2 metros, conclusión basada principalmente en que una gran cantidad de muestras (superior del 90% de ellos) presentaban longitudes de 2 metros. Sin embargo, considerando temas de selectividad y efectos operacionales al momento de la explotación, es posible emplear compósitos múltiples de dicho valor, y el valor de 4 m representaba un valor adecuado con el cual se obtenía una cantidad de datos representativa para los análisis posteriores, considerando adicionalmente que un compósito mayor genera menor incertidumbre asociado a una menor varianza de los datos (efecto soporte).

En relación al análisis de outliers, se identificaron valores anómalos para los datos compositados a 4 metros por lo cual se realizó el proceso de capping (fueron transformados 6 datos con capping a 20 ppm y 25 ppm para las categorías de óxidos y sulfuros respectivamente), con el objetivo de mejorar la data, esto condujo a una reducción de la media y varianza de los datos. Finalmente se observa la necesidad de realizar un desagrupamiento a los datos debido a la presencia de un muestreo preferente, con esto se obtienen estadísticas más representativas.

Los análisis efectuados para determinar algún tipo de anisotropía en el depósito objeto de este proyecto académico, dan cuenta de una dirección preferencial N35°W. Este análisis fue efectuado a partir de la poca información con la cual se dispone, tal como sondajes con sus respectivos muestreos y el mapa variográfico. Este último, si bien entrega información relacionada con la dirección preferencial de mayor correlación espacial (más claramente para el caso de la unidad de óxidos, que para la de sulfuros); debería ser utilizado como una de las fuentes y no como una única fuente para determinar dicha dirección. Sería importante poder contar con información geológica local que caracterice el área de estudio en aspectos litológicos, de alteraciones, mineralización y geología estructural permitiendo un análisis e interpretación geológica que aporte mayor información respecto a las direcciones de mineralización del depósito y la génesis de este. Esto aportaría información valiosa para

determinar con mayor grado de confianza la decisión tomada respecto al ángulo de anisotropía mayor (identificado en este proyecto).

El comportamiento espacial de los datos pudo representarse con un modelo de variograma esférico anidado y la presencia de efecto pepa, más notorio en la unidad de los sulfuros. En total el modelo se compuso de 4 estructuras una para el efecto pepa y los 3 restantes en tres direcciones: N35°W, su ortogonal (N55°E) y la dirección vertical.

Para comparar los diferentes planes de kriging (vecindades de búsqueda), la técnica de validación cruzada permitió comparar el desempeño en 4 criterios: insesgo global, insesgo condicional, coeficiente de correlación al cuadrado y varianza del error mínima. Para ambas unidades de estimación, el denominado plan 1 (consistente en una búsqueda elipsoidal con mínimo de datos 4 y máximo de datos 8) fue el plan seleccionado. Esta selección facilita además el desempeño computacional dado que es la menos exigente en cuanto a la cantidad de datos a ser consultados para la estimación.

La estimación de dominios arrojó que de 166855 bloques disponibles en el modelo de bloques, entre las unidades de óxidos y de sulfuros (17039 de óxidos y 149816 de sulfuros), se estimaron 124728 bloques (14400 para óxidos y 110328 para sulfuros). Esto quiere decir que 42127 bloques no fueron estimados dado que se encontraban por fuera de la vecindad del kriging definida para la estimación. Esto en gran parte debe a que el modelo de bloques solicitado para este proyecto presentaba unos límites muy grandes en el extremo sur-oeste respecto a la información de sondajes disponibles. Para disminuir esto se debería haber generado un modelo de bloques más ajustado al dominio comprendido por los sondajes; sin embargo como ejercicio académico se conservó el tamaño del modelo de bloques solicitado.

Como es bien conocido, la categorización de los recursos es una de las etapas más críticas en la evaluación de un yacimiento. Para este proyecto en particular, el proceso de categorización fue llevado a cabo considerando el criterio de una varianza de corte. Los análisis efectuados arrojaron una varianza de corte de 5.830 ppm<sup>2</sup> para diferenciar entre recursos medidos e indicados en la unidad de óxidos y una varianza de corte de 7.977 ppm<sup>2</sup> para diferenciar entre recursos indicados e inferidos. En el caso de los sulfuros, las varianzas de corte fueron 10.164 ppm<sup>2</sup> y 17.970 ppm<sup>2</sup> respectivamente.

Del total de bloques estimados, el 28.70% de ellos correspondieron a bloques categorizados como recursos medidos. El 21.86% correspondió a bloques categorizados como recursos indicados y el 49.44% como recursos inferidos. En cuanto a los óxidos los porcentajes de bloques en recursos medidos, indicados e inferidos fueron del 42.15%, 16.00% y 41.85% respectivamente y en sulfuros los porcentajes de bloques fueron del 26.94% para recursos medidos, 22.63% para recursos indicados y del 50.43% para recursos inferidos.

Finalmente, la categorización de recursos al aplicar leyes de corte de 2.65 ppm para la unidad de óxidos y de 3.77 ppm para la unidad de sulfuros arrojó los siguientes resultados: 12.19 millones de oz. de oro en recursos medidos de los cuales el 7.96% es aportado por la unidad de óxidos y el 92.04% por la unidad de sulfuros. En recursos indicados se obtuvieron 8.24 millones de oz. de las cuales el 2.92% está asociado a la unidad de óxidos y el 97.08% a la unidad de sulfuros. Los recursos inferidos fueron del orden de 15.48 millones de oz.

## 9. Bibliografía

[1] ORTIZ C., Julián M. Universidad de Chile, Dpto. Ing. de Minas. Apuntes MI57E Explotación de Minas (otoño 2008).

[2] ORTIZ C., Julián M. Universidad de Chile, Dpto. Ing. de Minas. Apuntes MI5041 Evaluación de Yacimientos (Otoño 2015).

[3] SRK Consulting. Updated Mineral Resource Statement, Bomboré Gold Project (Abril 2013).

[4] GUSTAVSON ASSOCIATES. Amended NI43-101, Preliminary economy assessment – Round Top project. Texas Rare Earth Resources (Abril 2014).

[5] Documentación de Categorización. Universidad de Chile – ALGES. Mauricio Garrido. 2014.

[6] Álvarez Tapia, María Fernanda. Geología, alteración y mineralización de Au-ag del proyecto Purén oeste, Región de Atacama, Chile. Tesis, 2009.

[7] Deutsch, C., A. Journel. 1998. Gslib: geostatistical software library and user's guide. 2ª edición. New York. Oxford Press. 368 p.

## 10. Anexos

### 10.1 Histogramas de óxidos y sulfuros

Figura 87. Histogramas de óxidos y sulfuros datos originales.

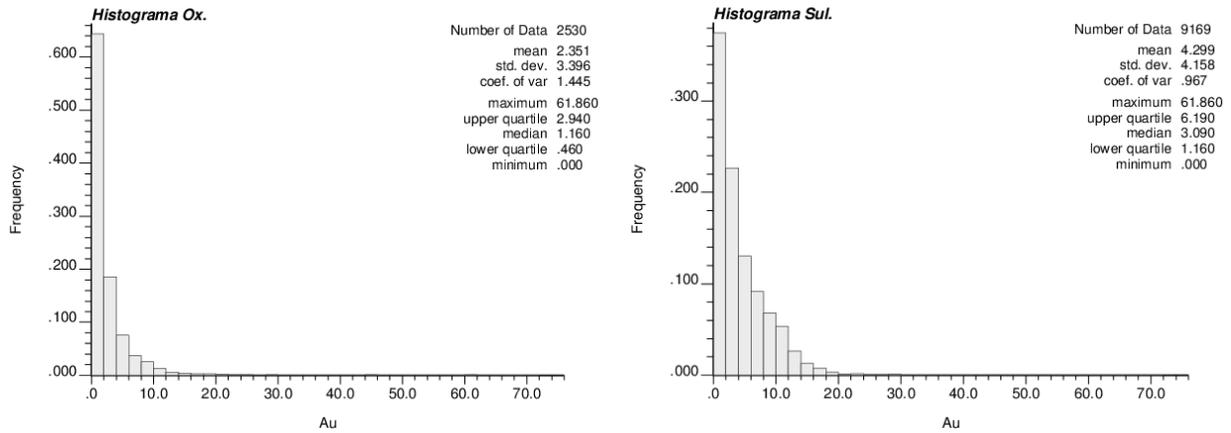
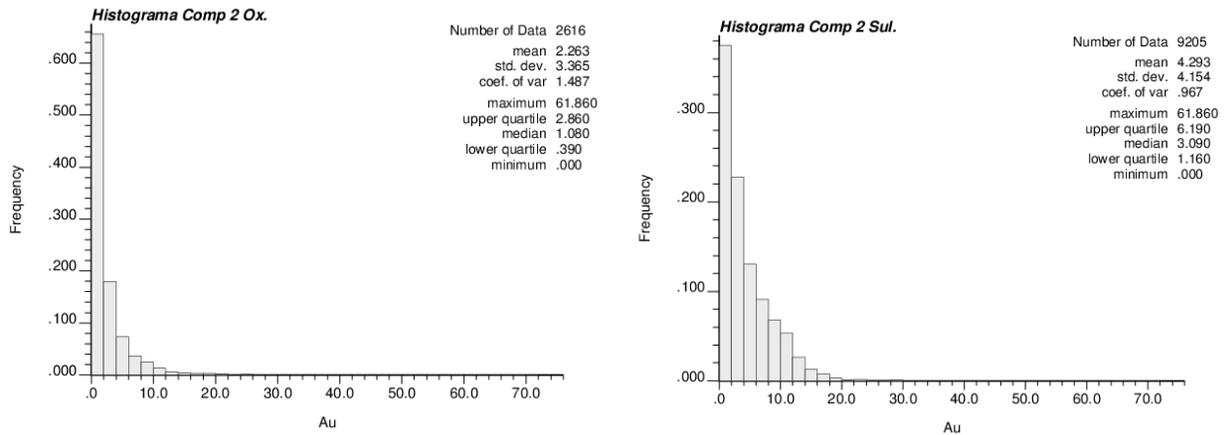
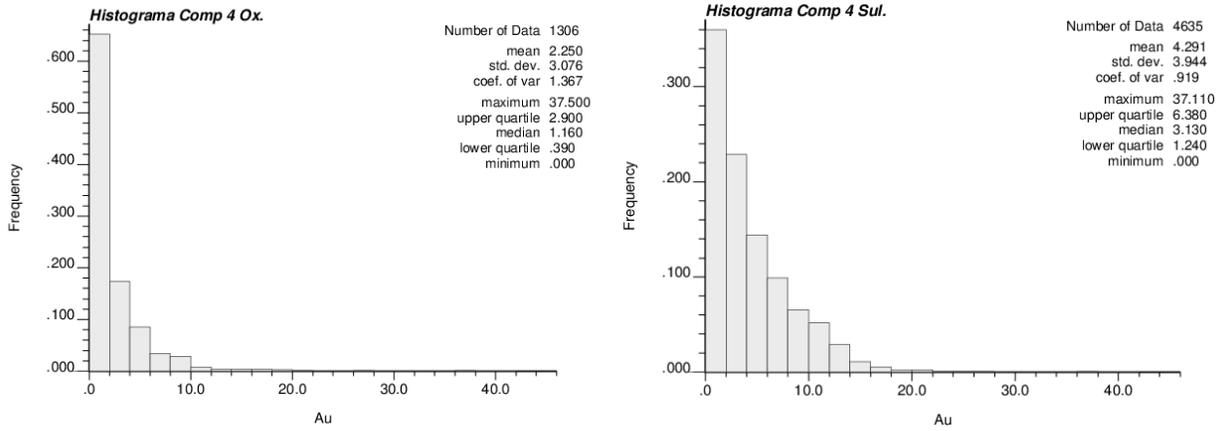


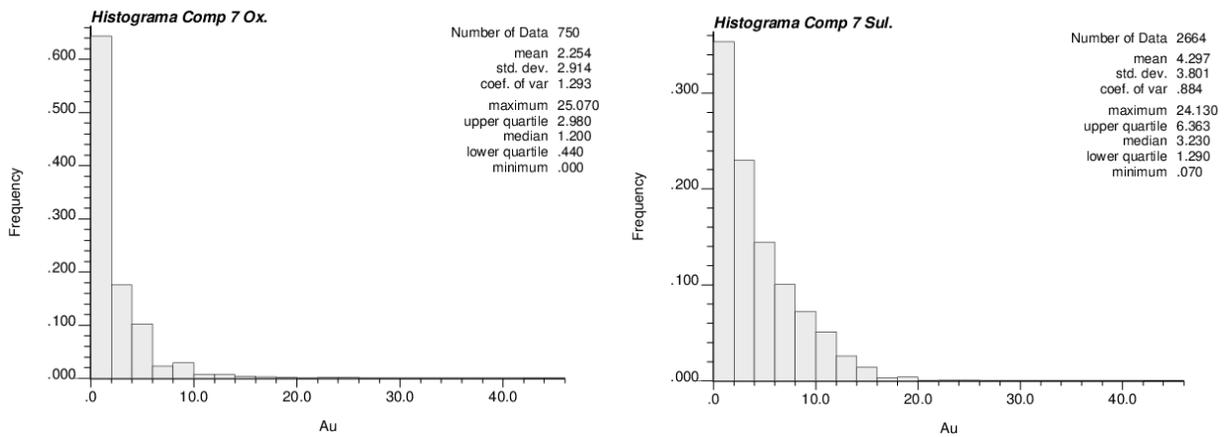
Figura 88. Histogramas de óxidos y sulfuros compuesto 2 m.



**Figura 89. Histogramas de óxidos y sulfuros compósito 4 m.**



**Figura 90. Histogramas de óxidos y sulfuros compósito 7 m.**



## 10.2 Análisis de deriva para compósitos de 2 y 7 m.

Figura 91. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Este (Comp. 2 m).

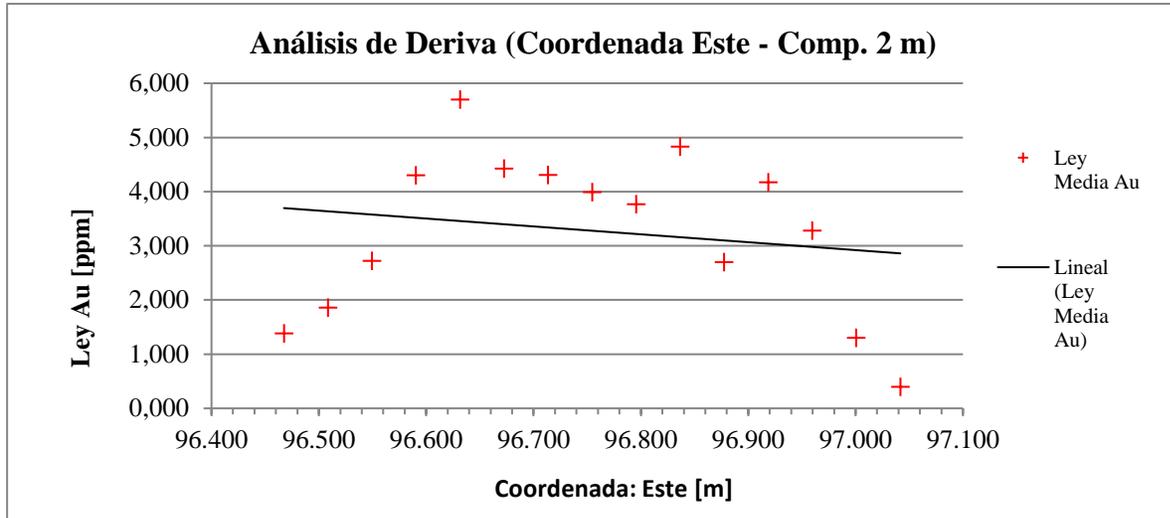
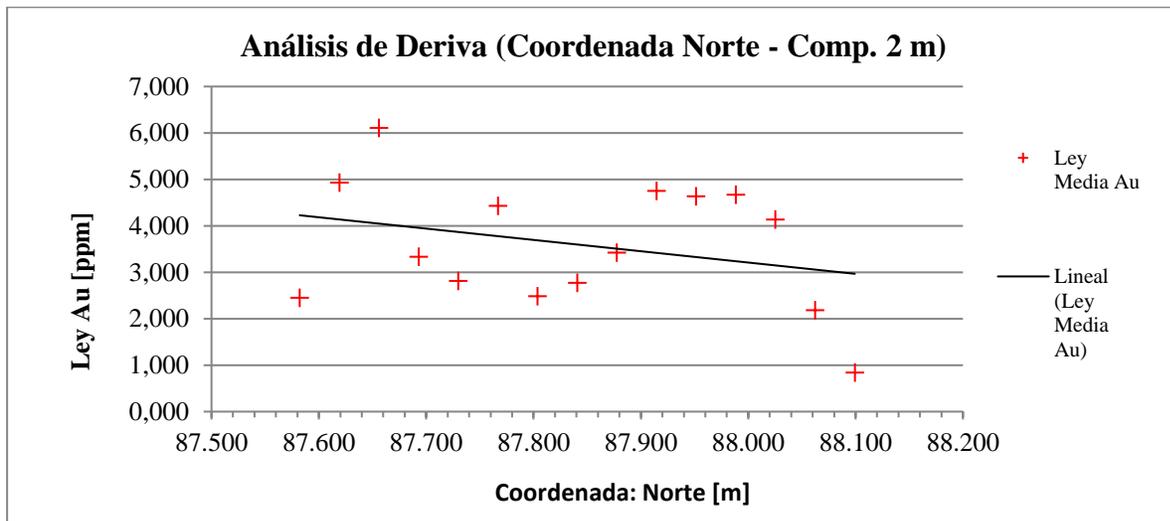
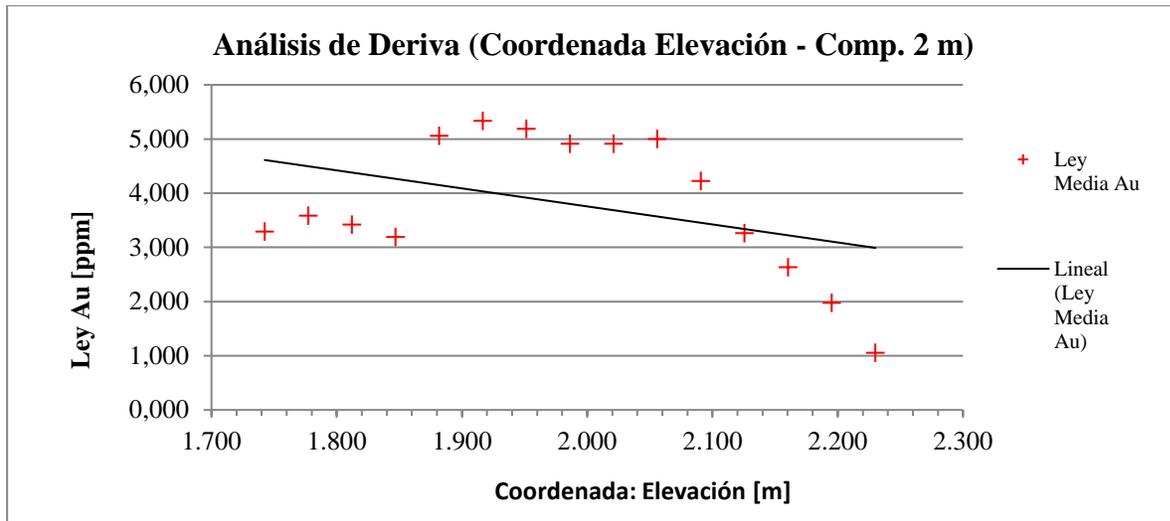


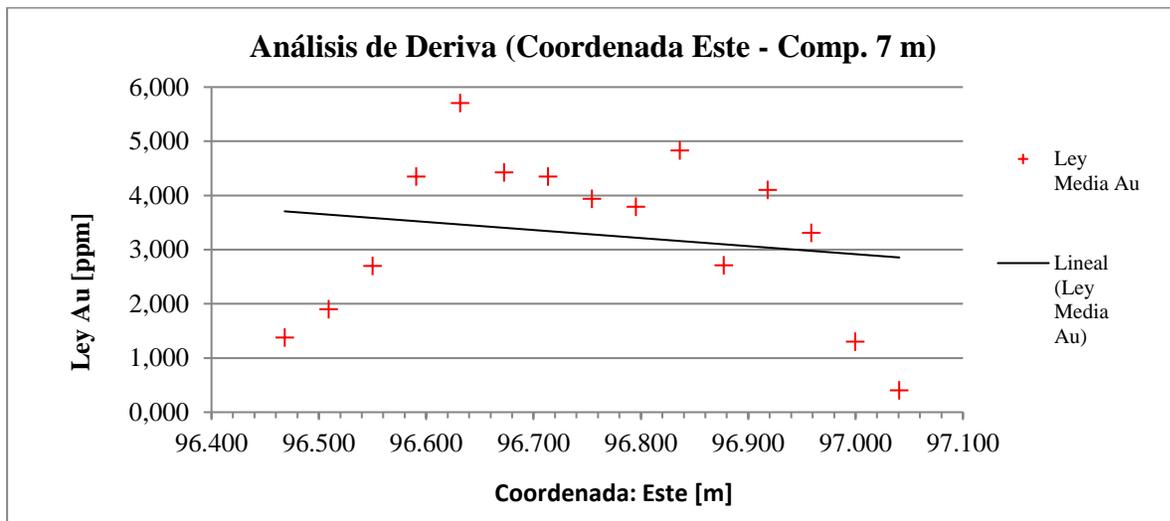
Figura 92. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Norte (Comp. 2 m).



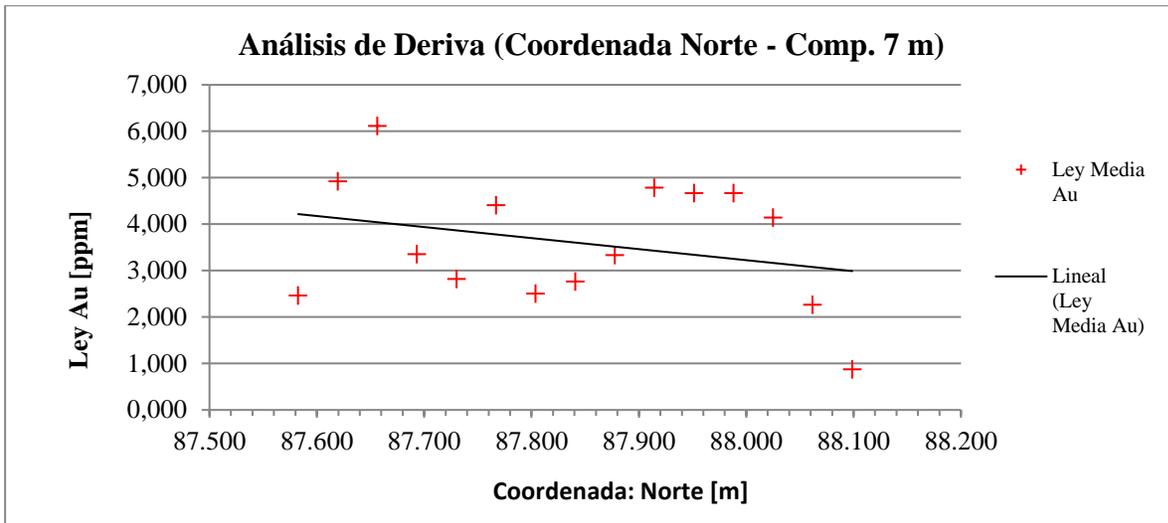
**Figura 93. Media condicional ley de oro vs. coordenadas elevación (Comp. 2 m).**



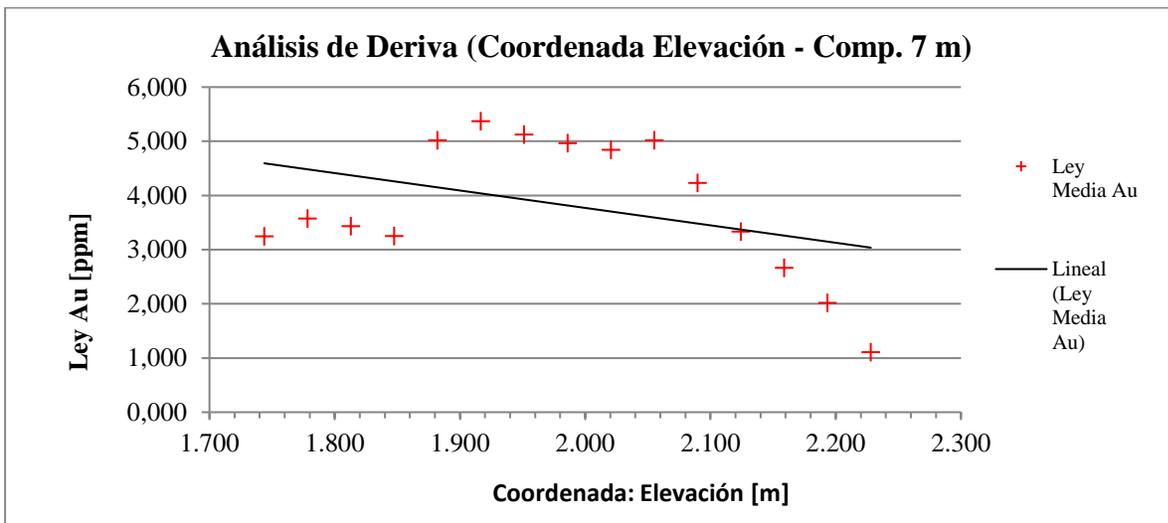
**Figura 94. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Este (Comp. 7 m).**



**Figura 95. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Norte (Comp. 7 m).**



**Figura 96. Media condicional ley de oro vs. Coordenada Elevación (Comp. 7 m).**



### 10.3 Gráficos de dispersión para los planes de kriging.

Figura 97. Gráfico de dispersión – validación plan 2 óxidos.

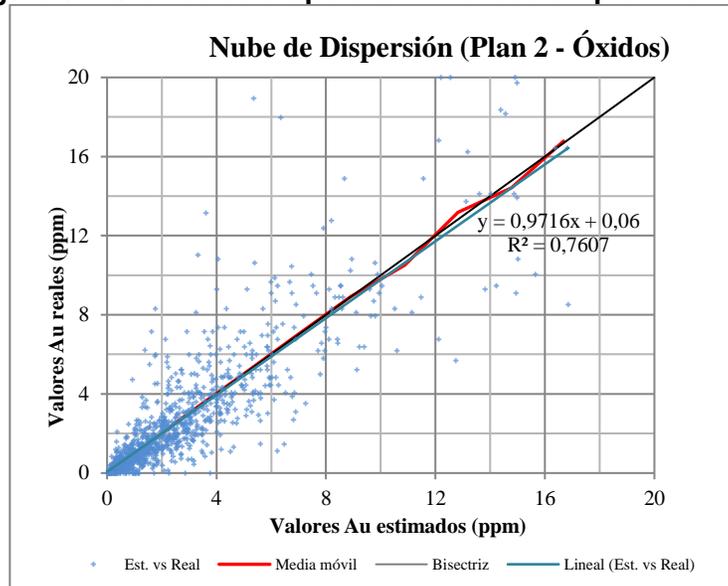


Figura 98. Gráfico de dispersión – validación plan 3 óxidos.

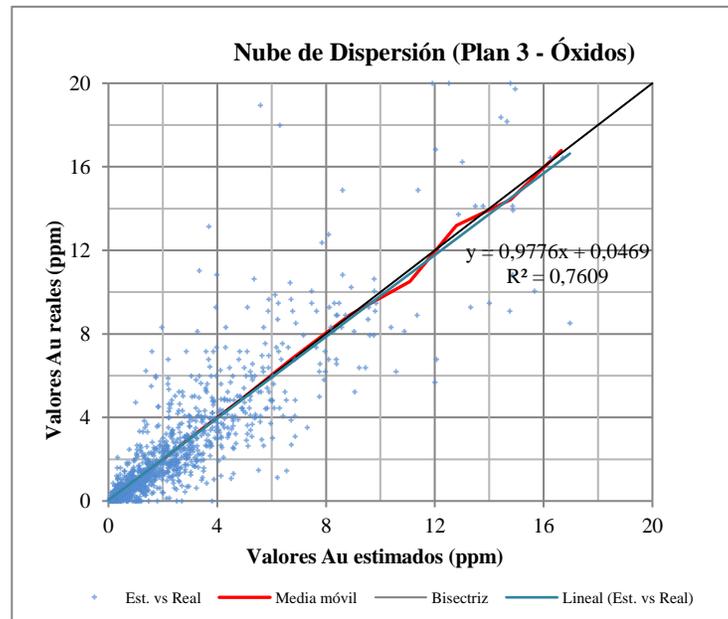


Figura 99. Gráfico de dispersión – validación plan 4 óxidos.

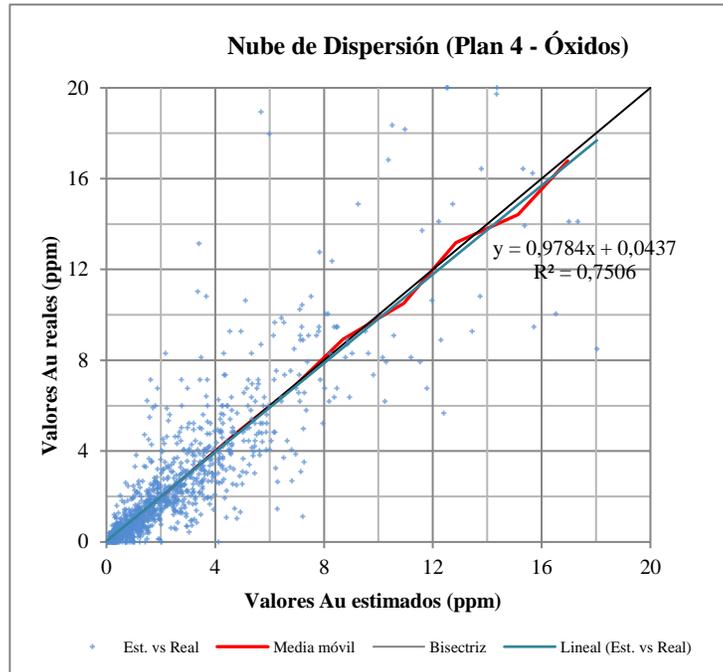


Figura 100. Gráfico de dispersión – validación plan 5 óxidos.

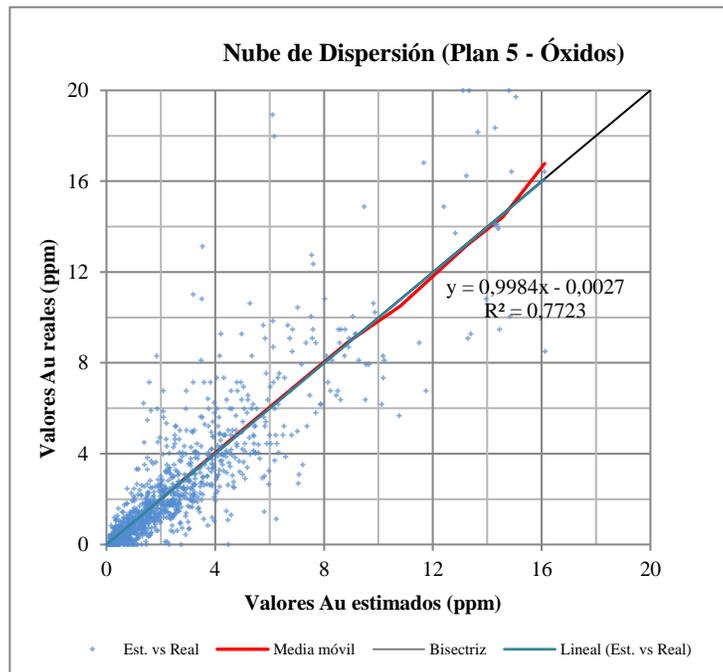


Figura 101. Gráfico de dispersión – validación plan 6 óxidos.

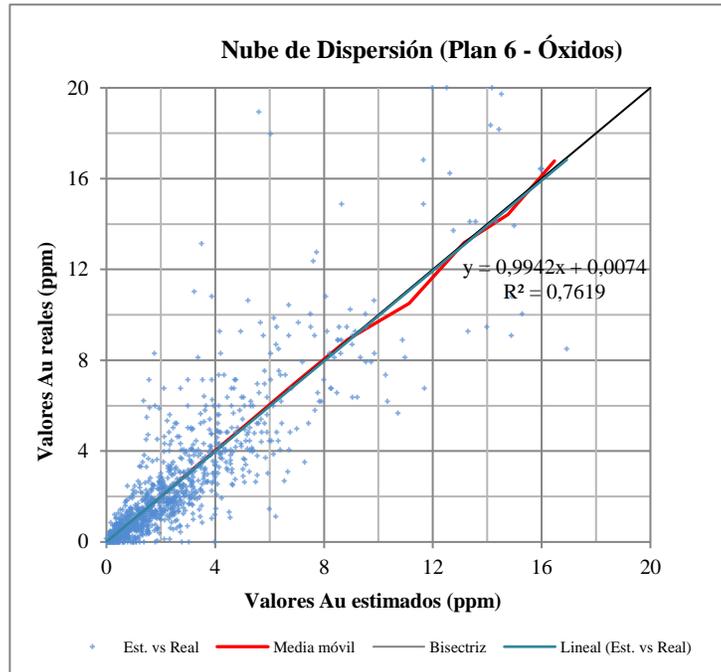


Figura 102. Gráfico de dispersión – validación plan 7 óxidos.

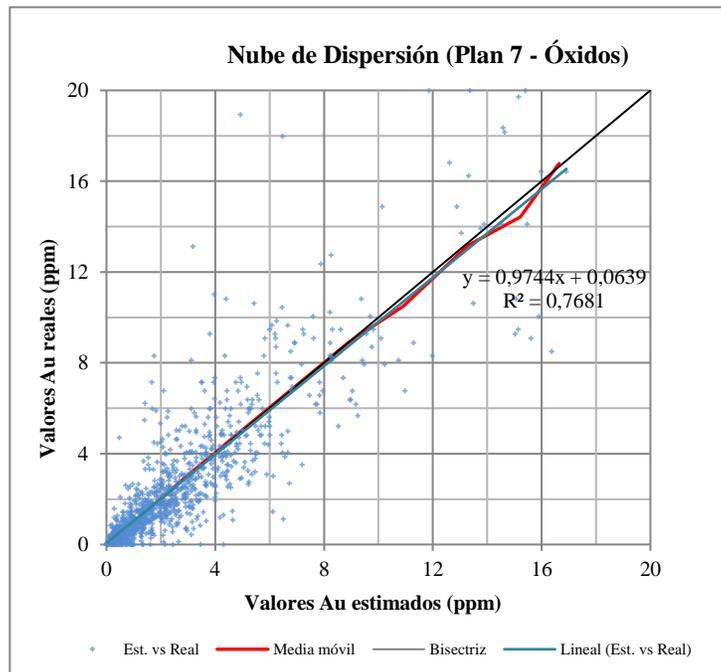


Figura 103. Gráfico de dispersión – validación plan 2 sulfuros.

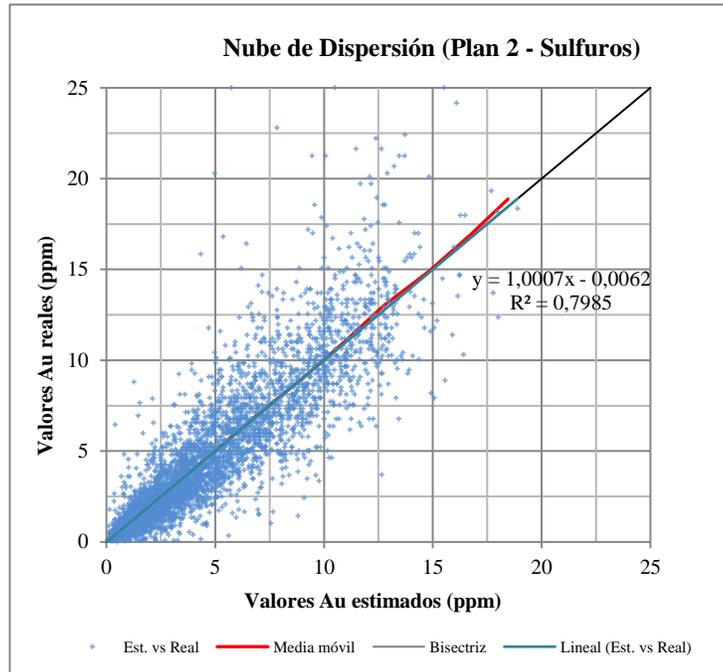


Figura 104. Gráfico de dispersión – validación plan 3 sulfuros.

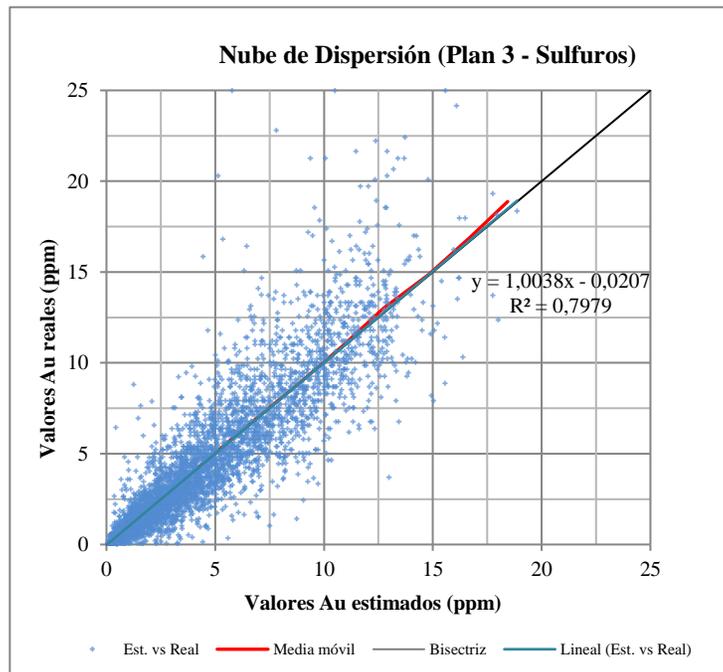


Figura 105. Gráfico de dispersión – validación plan 4 sulfuros.

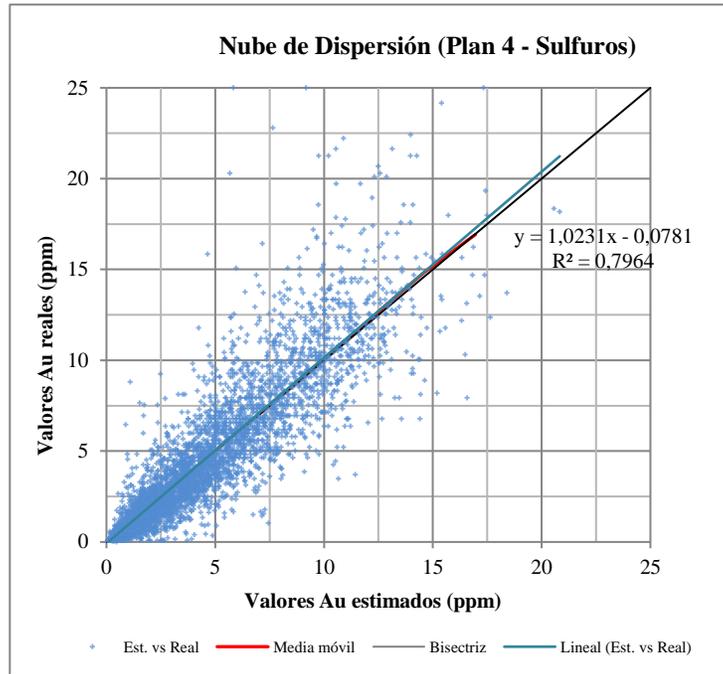


Figura 106. Gráfico de dispersión – validación plan 5 sulfuros.

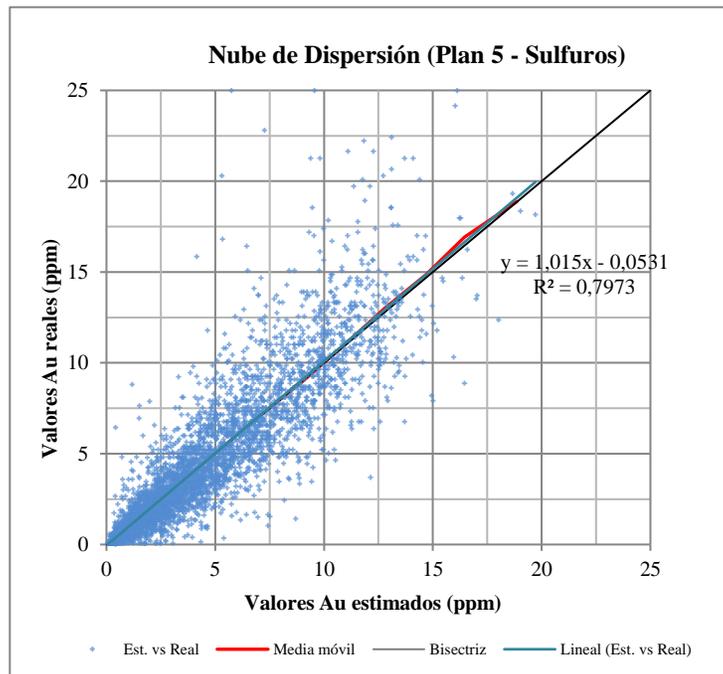


Figura 107. Gráfico de dispersión – validación plan 6 sulfuros.

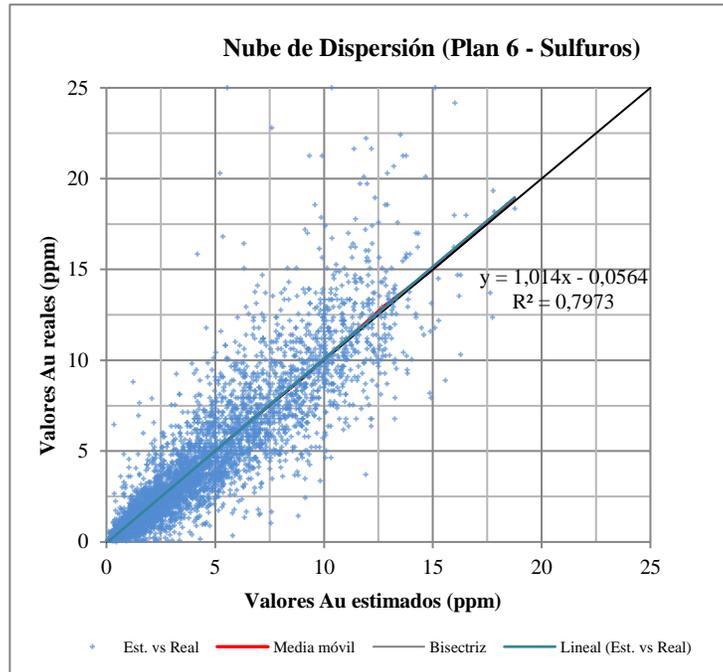
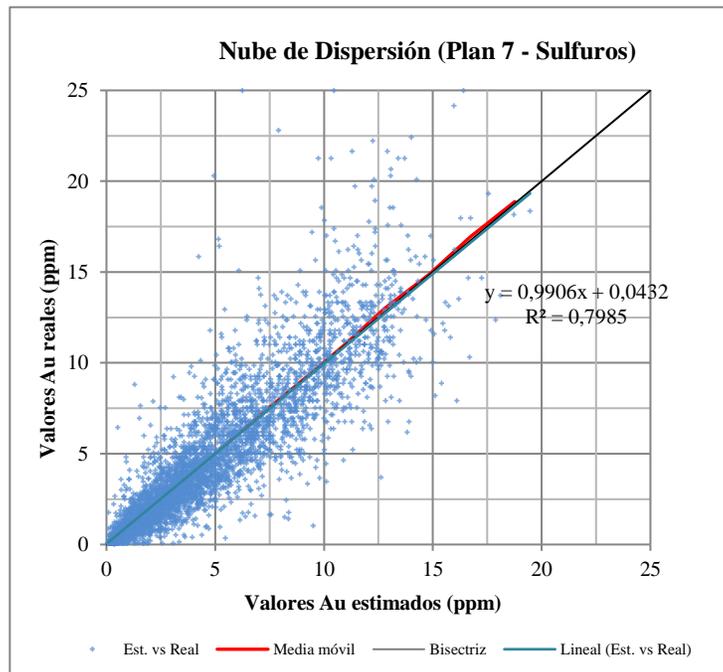


Figura 108. Gráfico de dispersión – validación plan 7 sulfuros.



#### 10.4 Parámetros para determinar varianzas de corte.

Tabla 34. Parámetros para determinar varianza de corte recursos medidos - óxidos.

<b>Parámetros</b>			
<b>Bloque Planificado</b>			
Dimensiones del bloque	x:	200	m
	y:	250	m
	z:	50	m
Discretización	x:	10	
	y:	10	
	z:	10	
Radio de búsqueda Kriging	x:	5000	m
	y:	5000	m
	z:	5000	m
Ley media planificación temporal:	2.65	[%]	
<b>Bloque de Estimación</b>			
Dimensiones del bloque	x:	10	m
	y:	10	m
	z:	12	m
Discretización del bloque	x:	4	
	y:	4	
	z:	4	
Radios de búsqueda Kriging	x:	200	m
	y:	150	m
	z:	50	m
Ángulos de Rotación	a1:	325	
	a2:	0	
	a3:	0	
Cantidad de datos	Min:	4	
	Max:	8	
Datos por Octante	1		
<b>Sondajes y Tolerancia</b>			
Espaciamiento de sondajes	x:	60	
	y:	60	
	z:	4	
Cantidad de Sondajes	x:	4	
	y:	5	
	y:	14	
Iteraciones para refinamiento	0		
<b>Parámetros de Convergencia</b>			
Máximo de iteraciones:	5		
Error porcentual de estimación	15	[%]	
Tolerancia	1	[%]	
Porcentaje de Confianza	90	[%]	

**Tabla 35. Parámetros para determinar varianza de corte recursos indicados - óxidos.**

<b>Parámetros</b>			
<b>Bloque Planificado</b>			
Dimensiones del bloque	x:	550	m
	y:	500	m
	z:	200	m
Discretización	x:	20	
	y:	20	
	z:	20	
Radio de búsqueda Kriging	x:	5000	m
	y:	5000	m
	z:	5000	m
Ley media planificación temporal:	2.65	ppm	
<b>Bloque de Estimación</b>			
Dimensiones del bloque	x:	10	m
	y:	10	m
	z:	12	m
Discretización del bloque	x:	4	
	y:	4	
	z:	4	
Radio de búsqueda Kriging	x:	200	m
	y:	150	m
	z:	50	m
Ángulos de Rotación	a1:	325	
	a2:	0	
	a3:	0	
Cantidad de datos	Min:	4	
	Max:	8	
Datos por Octante	0		
<b>Sondajes y Tolerancia</b>			
Espaciamiento de sondajes	x:	90	
	y:	90	
	z:	4	
Cantidad de Sondajes	x:	7	
	y:	6	
	y:	52	
Iteraciones para refinamiento	0		
<b>Parámetros de Convergencia</b>			
Máximo de iteraciones:	5		
Error porcentual de estimación	15	[%]	
Tolerancia	1	[%]	
Porcentaje de Confianza	90	[%]	

**Tabla 36. Parámetros para determinar varianza de corte recursos medidos - sulfuros.**

<b>Parámetros</b>			
<b>Bloque Planificado</b>			
Dimensiones del bloque	x:	200	m
	y:	250	m
	z:	50	m
Discretización	x:	10	
	y:	10	
	z:	10	
Radio de búsqueda Kriging	x:	5000	m
	y:	5000	m
	z:	5000	m
Ley media planificación temporal:	3.77	ppm	
<b>Bloque de Estimación</b>			
Dimensiones del bloque	x:	10	m
	y:	10	m
	z:	12	m
Discretización del bloque	x:	4	
	y:	4	
	z:	4	
Radio de búsqueda Kriging	x:	200	m
	y:	150	m
	z:	50	m
Ángulos de Rotación	a1:	325	
	a2:	0	
	a3:	0	
Cantidad de datos	Min:	4	
	Max:	8	
Datos por Octante	1		
<b>Sondajes y Tolerancia</b>			
Espaciamiento de sondajes	x:	60	
	y:	60	
	z:	4	
Cantidad de Sondajes	x:	4	
	y:	5	
	y:	14	
Iteraciones para refinamiento	0		
<b>Parámetros de Convergencia</b>			
Máximo de iteraciones:	5		
Error porcentual de estimación	15	[%]	
Tolerancia	1	[%]	
Porcentaje de Confianza	90	[%]	

Tabla 37. Parámetros para determinar varianza de corte recursos indicados - sulfuros.

<b>Parámetros</b>			
<b>Bloque Planificado</b>			
Dimensiones del bloque	x:	550	m
	y:	500	m
	z:	200	m
Discretización	x:	20	
	y:	20	
	z:	20	
Radio de búsqueda Kriging	x:	5000	m
	y:	5000	m
	z:	5000	m
Ley media planificación temporal:	3.77	ppm	
<b>Bloque de Estimación</b>			
Dimensiones del bloque	x:	10	m
	y:	10	m
	z:	12	m
Discretización del bloque	x:	4	
	y:	4	
	z:	4	
Radio de búsqueda Kriging	x:	200	m
	y:	150	m
	z:	50	m
Ángulos de Rotación	a1:	325	
	a2:	0	
	a3:	0	
Cantidad de datos	Min:	4	
	Max:	8	
Datos por Octante	1		
<b>Sondajes y Tolerancia</b>			
Espaciamiento de sondajes	x:	110	
	y:	110	
	z:	4	
Cantidad de Sondajes	x:	6	
	y:	6	
	y:	52	
Iteraciones para refinamiento	0		
<b>Parámetros de Convergencia</b>			
Máximo de iteraciones:	5		
Error porcentual de estimación	15	[%]	
Tolerancia	1	[%]	
Porcentaje de Confianza	90	[%]	

-Editorial-  
**CILADI**  
Centro de Investigación Latinoamericano  
para el Desarrollo e Innovación

ISBN: 978-9942-7239-9-4

