



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Control Mineralógico en la Distribución de leyes en el cuerpo
Nora del yacimiento Mantos Blancos,
II Región de Antofagasta,
Chile

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CÉSAR EDUARDO ULLOA CARRASCO

PROFESOR GUÍA:

CARLOS PALACIOS MONASTERIO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VÍCTOR MAKSAEV JURCHUC

BRIAN TOWNLEY CALLEJAS

SANTIAGO DE CHILE

DICIEMBRE DEL 2009

RESUMEN EJECUTIVO

El yacimiento de cobre con plata subordinada Mantos Blancos se encuentra ubicado 45Km al noreste de la ciudad de Antofagasta, en el borde este de la Cordillera de la Costa. El depósito es explotado por Anglo American Chile en la actualidad a través de un rajo abierto, alimentando mineral oxidado para una planta de lixiviación por solventes y electroobtención, y mineral sulfurado para una planta concentradora de sulfuros. En la actualidad Mantos Blancos produce alrededor de 90000Ton de cobre fino en cátodos y concentrado, y tiene un horizonte de vida aprobado por Anglo American Chile hasta el año 2015.

El distrito Mantos Blancos presenta rocas sedimentarias, volcánicas e ígneas cuyas edades varían entre el Paleozoico y el Cenozoico que representarían un paleo arco volcánico desarrollado durante el Jurásico. Estructuralmente estas rocas se encuentran inmersas en el dominio de la zona de Falla de Atacama.

El yacimiento Mantos Blancos se encuentra hospedado en rocas pertenecientes a la Formación La Negra datadas en alrededor de 181Ma, con una alteración hidrotermal que comprende un metasomatismo potásico, una asociación propilítica y la sobreimposición de una fuerte alteración sódica. La mineralización sulfurada de cobre está integrada por calcosina-digenita, covelina, bornita y calcopirita, mientras que la mineralización oxidada consta de atacamita, crisocola y en forma restringida, malaquita, tenorita, cuprita y almargres. La mineralización hipógena del yacimiento se encuentra datada entre los 155Ma y los 141Ma.

El cuerpo mineralizado Nora que se encuentra ubicado en Bárbara Central, fue perforado mediante sondajes tipo aire reverso entre Octubre del 2008 y Marzo del 2009 (17560m). La revisión de las muestras de control y aseguramiento de calidad indica que estas muestras son confiables y pueden ser incorporadas en la base de datos histórica del sector.

Para definir el volumen mineralizado en el cuerpo Nora se realiza un kriging de indicadores sobre la variable IND2, que tiene valor 1 si se cumple la condición que $CuT \geq 0.2$. Este valor de mineral tiene relación con la ley de corte marginal en Mantos Blancos. En el volumen que genera el kriging de indicadores se define como mineral aquel que tiene sobre un 50% de probabilidad de que $CuT \geq 0.2$.

Usando los mapeos mineralógicos que se hacen a los sondajes se estima la distribución de la mineralización mediante un kriging ordinario. De la revisión de estos pozos se definen especies que coexisten en el cuerpo mineralizado Nora, lo que guía para establecer dos zonas minerales:

Zona 1: Predominancia de las especies calcosina-digenita, covelina y bornita

Zona 2: Predominancia de las especies calcopirita y piritita ocasional.

Las zonas mineralógicas definidas son utilizadas para estimar las leyes de cobre total. Ambas zonas se estiman con las muestras incluidas en ellas mediante un kriging ordinario. Para verificar los resultados de la estimación se validan las leyes de los bloques con las muestras desclusterizadas, obteniendo resultados satisfactorios. Además, se reconcilia los resultados de la estimación en las zonas tronadas entre los años 2005 y 2009, y se compara estos resultados con la estimación del modelo oficial vigente para Mantos Blancos. El modelo generado en el cuerpo Nora tiene -1% de error en tonelaje y -5% de error en fino, mostrando mejores resultados que el modelo oficial de Mantos Blancos, el cual no usa la mineralogía para la estimación de las leyes de cobre.

Se concluye con este trabajo que es conveniente usar la mineralogía presente en el cuerpo mineralizado Nora para mejorar los resultados del modelamiento del mineral que va a planta. Se recomienda realizar esta estimación en otros cuerpos mineralizados de Mantos Blancos donde no haya interacción con laboreos subterráneos, para verificar hay mejoras de los resultados en términos de cobre fino.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ubicación y Accesos	1
1.2 Pertenencias mineras asociadas al distrito Mantos Blancos	3
1.3 Antecedentes históricos del distrito Mantos Blancos	3
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 Metodología de trabajo	6
1.6 Agradecimientos	7
CAPÍTULO 2: GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MANTOS BLANCOS	8
2.1 Geología Distrital	8
2.1.1 Marco Geológico Distrital	8
2.2 Geología del yacimiento Mantos Blancos	17
2.2.1 Geología del yacimiento	17
2.2.2 Estructuras del yacimiento	19
2.2.3 Alteración y Mineralización	23
2.2.3.1 Alteración	23
2.2.3.2 Mineralización	24
2.2.3.3 Interpretación de las paragénesis de Alteración y Mineralización	25
2.2.3.4 Dataciones de la mineralización	26
2.2.4 Discusión sobre la génesis del yacimiento	27
CAPÍTULO 3: REVISIÓN DE SONDAJES NUEVOS	31
3.1 Revisión de Blancos en la Base de Sondajes nuevos	31
3.2 Revisión de duplicados gruesos en los Sondajes nuevos	33

3.3 Revisión de duplicados pulpas en los Sondajes nuevos	36
3.4 Revisión de estándares en los Sondajes nuevos	38
3.5 Resultados de la revisión del Qa/Qc de los Sondajes nuevos	42
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	43
4.1 Trabajo estadístico con la base de sondajes disponible	43
4.2 Definición del volumen mineralizado: Kriging de indicadores	44
4.3 Kriging de mineralización de Cobre presente en el yacimiento	46
4.4 Kriging de CuT(%).	51
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	54
5.1 Validación de la estimación realizada	54
5.2 Comparación de la estimación realizada con el modelo oficial y las áreas tronadas	60
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
6.1 Conclusiones	62
6.2 Recomendaciones	63
CAPÍTULO 7: REFERENCIAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación del distrito Mantos Blancos	2
Figura 1.2: Pertenencias Mineras Anglo American Chile en Distrito Mantos Blancos	3
Figura 2.1: Marco estructural del depósito Mantos Blancos	9
Figura 2.2: Geología en el área del Distrito Mantos Blancos	14
Figura 2.3: Columna estratigráfica esquematizada de las rocas presentes en la mina Mantos Blancos	20
Figura 2.4 Principales fallas presentes en el depósito Mantos Blancos	22
Figura 2.5 Sección esquemática de la geología del yacimiento Mantos Blancos. En la figura se observan los sucesivos eventos genéticos y los principales sistemas estructurales de rumbo NW reconocidos en el yacimiento.	29
Figura 3.1: Mapa de Ubicación del cuerpo mineralizado Nora en Bárbara Central	32
Figura 3.2 Diagrama de muestras blancas gruesas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	33
Figura 3.3 Explicación gráfica de la diferencia entre Precisión y Exactitud.	34
Figura 3.4 Diagrama de dispersión de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	35
Figura 3.5 Diagrama de diferencias relativas de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	35
Figura 3.6 Diagrama de diferencias de concentración del error de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	36
Figura 3.7 Diagrama de dispersión de duplicados pulpas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	37
Figura 3.8 Diagrama de diferencias relativas de duplicados pulpas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	37
Figura 3.9 Diagrama de diferencias de concentración del error de duplicados pulpas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora	38
Figura 3.10: Estándares 114 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	39

Figura 3.11: Estándares 115 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	40
Figura 3.12: Estándares 116 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	40
Figura 3.13: Estándares 117 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	41
Figura 3.14: Estándares 118 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	41
Figura 3.15: Estándares 119 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora	42
Figura 4.1: Histograma de la variable CuT(%) de los compósitos presentes en el cuerpo mineralizado Nora	44
Figura 4.2: Definición del volumen mineralizado en el cuerpo mineralizado Nora, banco 600	45
Figura 4.3: Definición del volumen mineralizado en el cuerpo mineralizado Nora, banco 660	46
Figura 4.4: Bornita, covelina lamelar intersticial y digenita entre no metálicos y hematita fina.	47
Figura 4.5: Bornita y calcopirita reemplazada por digenita y covelina lamelar fina.	47
Figura 4.6 Calcosina con abundante cristalización fina de hematita.	48
Figura 4.7 Digenita y covelina lamelar fina. Cristales de hematita con relieve mas alto y ganga no metálica.	48
Figura 4.8 Covelina lamelar y pirita, asociadas a no metalicos.	49
Figura 4.9: Distribución de la mineralización, de acuerdo a riqueza de especies minerales en cuerpo mineralizado Nora, banco 600	50
Figura 4.10: Distribución de la mineralización, de acuerdo a riqueza de especies minerales en cuerpo mineralizado Nora, banco 660	50
Figura 4.11: Mapa de distribución de las leyes de Cobre Total en el cuerpo mineralizado Nora, banco 600	52
Figura 4.12: Mapa de distribución de las leyes de Cobre Total en el cuerpo mineralizado Nora, banco 660	53
Figura 5.1 Reconciliación Bloques - Muestras desclusterizadas mediante bloque móvil para la Zona cc-bo-cv (Zona 1)	55
Figura 5.2 Reconciliación Bloques - Muestras desclusterizadas mediante bloque móvil para la Zona cpy-(py) (Zona 2)	56
Figura 5.3 Reconciliación por franjas Este entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.	57

Figura 5.4 Reconciliación por franjas Norte entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.	57
Figura 5.5 Reconciliación por franjas verticales entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.	58
Figura 5.6 Reconciliación por franjas Este entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy – (py)	58
Figura 5.7 Reconciliación por franjas entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy-(py).	59
Figura 5.8 Reconciliación por franjas verticales entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy-(py)	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Comparación bloques – muestras desclusterizadas para ambas zonas de estimación	54
Tabla 5.2 Reconciliación modelo de cuerpo Mineralizado Nora en zonas tronadas y comparación con Modelo Oficial.	60

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Variogramas y plan de kriging variable IND2

ANEXO 2: Plan de kriging y validaciones estimación mineralógica en zona del cuerpo mineralizado Nora

ANEXO 3: Variogramas y plan de kriging variable CUT

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Mantos Blancos, en la actualidad perteneciente a la empresa Anglo American Chile Ltda., es un depósito de Cobre con plata subordinada de tamaño relevante en el ambiente minero chileno. Presenta mineralización oxidada y sulfurada de Cobre que ha sido explotada desde el siglo pasado. En la actualidad el mineral es extraído mediante un rajo abierto cuyas dimensiones máximas son 3.4Km en la este, 1Km en la Norte y 400m de profundidad, con una altura de bancos de 12m.

La mina Mantos Blancos cuenta con dos líneas de producción:

- Una planta de lixiviación por solventes y electroobtención para procesar los minerales oxidados de Cobre. Se envían diariamente a chancado alrededor de 15,000Ton de mineral oxidado.
- Una planta concentradora para el tratamiento de minerales sulfurados de Cobre. Se envían diariamente a chancado alrededor de 15,000Ton de mineral sulfurado.

Actualmente la mina tiene una producción de aproximadamente 90.000Ton de Cu fino al año y presenta un horizonte de vida aprobado por Anglo American hasta el año 2015.

1.1 Ubicación y Accesos

El yacimiento Mantos Blancos se localiza en el borde este de la Cordillera de la Costa, en la Región de Antofagasta a una altura media de 800 m.s.n.m. Se encuentra ubicado a 45 km al noreste de la ciudad de Antofagasta y aproximadamente a 20 km al suroeste del pueblo de Baquedano (**Figura 1.1**). Se encuentra limitado por las coordenadas U.T.M. 7.406.500 – 7.409.000 N y 389.000 – 494.500 E, ocupando una superficie de 273 km².

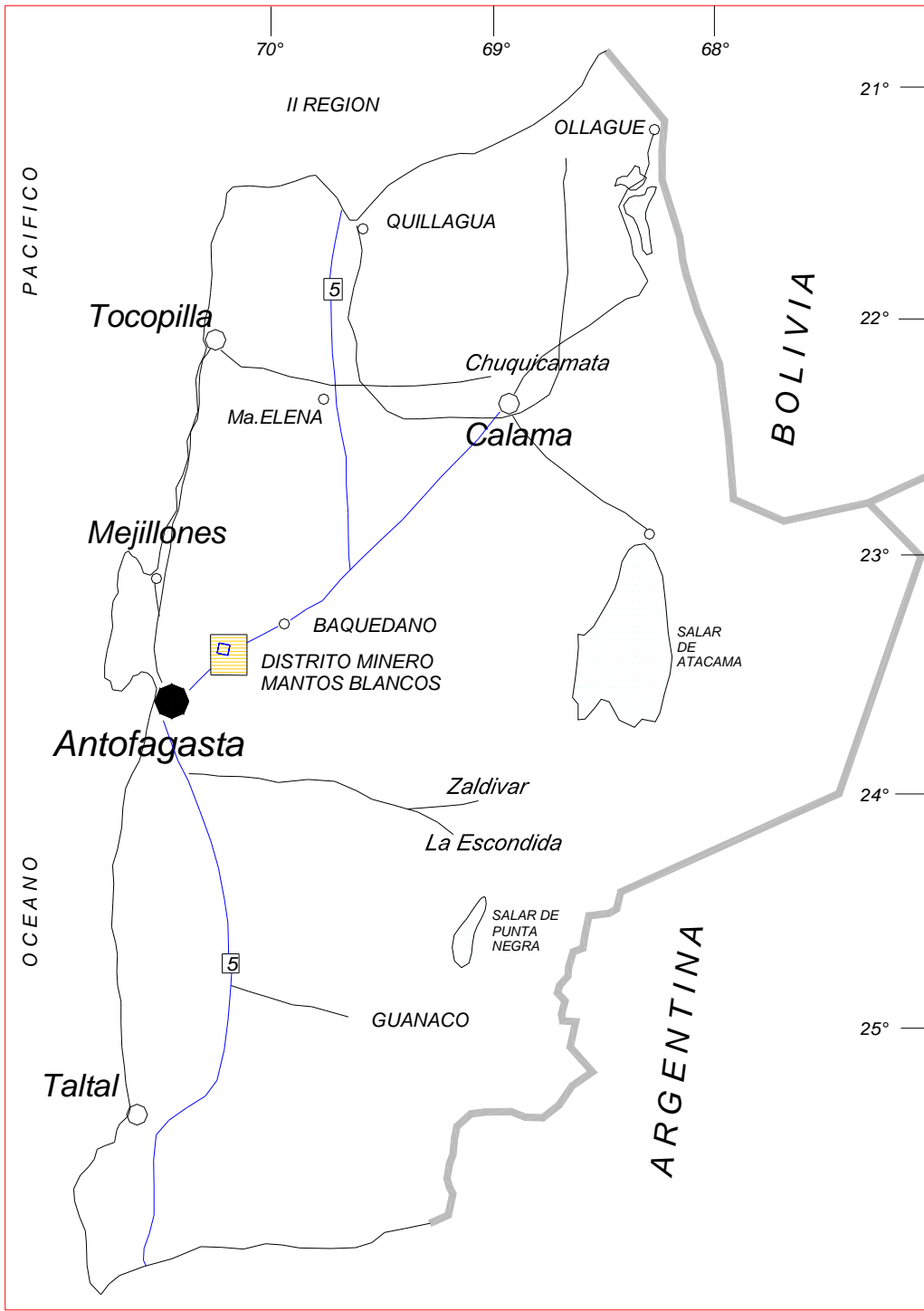


Figura 1.1 Ubicación del distrito Mantos Blancos (Tomado de Infanta, 2002)

El acceso al yacimiento se encuentra ubicado en el kilómetro 1390 de la Ruta 5 Norte, la cual cruza el distrito Mantos Blancos de manera oblicua, tal como se verifica en la figura 1.1.

1.2 Pertenencias mineras asociadas al Distrito Mantos Blancos

El distrito Mantos Blancos está completamente protegido por 73 derechos de extracción minera que abarcan 6,744ha. y 32 derechos de exploración que totalizan 8,300ha. Por otro lado, en los sectores aledaños al distrito se encuentran blancos de interés geológico protegidos por permisos de exploración (Figura 1.2).

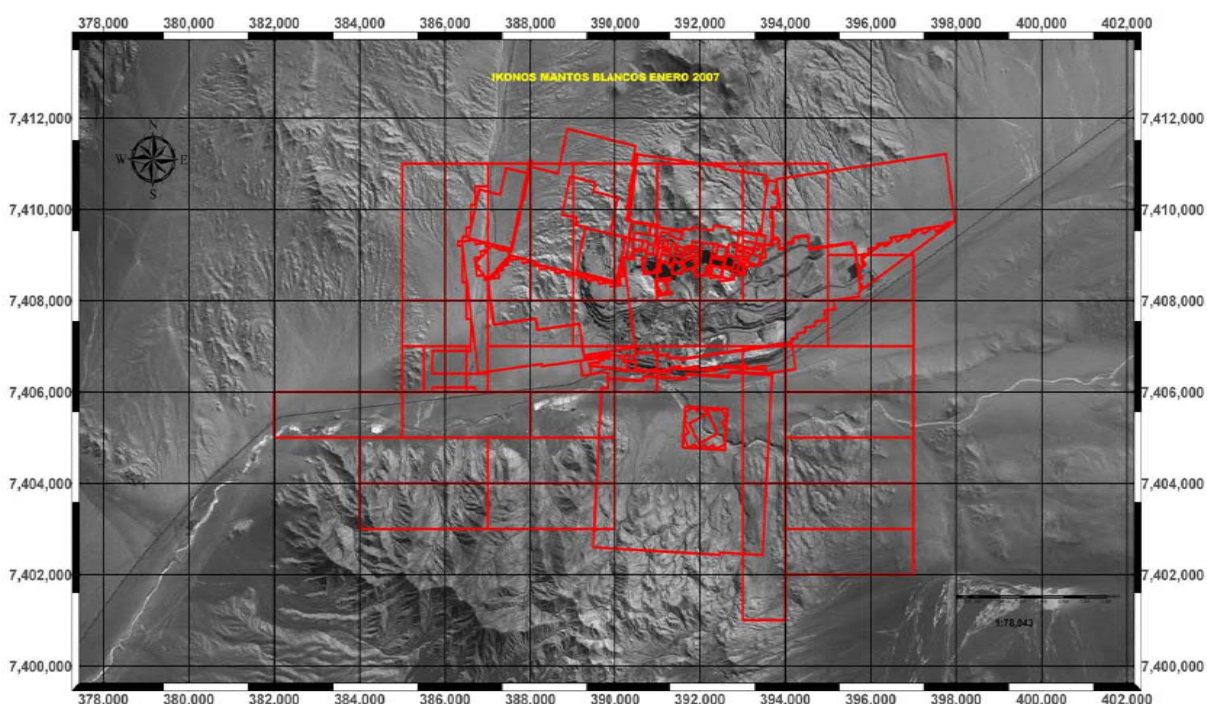


Figura 1.2: Pertenencias Mineras Anglo American Chile en Distrito Mantos Blancos

1.3 Antecedentes históricos del distrito Mantos Blancos

La importancia económica de este distrito es conocida desde 1883, año en que don David Cervantes y Carlos Mercado, solicitan bajo el nombre de pertenencia Buena Esperanza algunas vetas de mineral oxidado de cobre emplazadas en los cerros ubicados al norte del camino que une Antofagasta y Lomas Bayas (actual Carretera Panamericana).

En el año 1953, luego de diversos trabajos de exploración, el grupo Hochschild adquirió parte de la propiedad de este yacimiento. Posteriormente, en el año 1955 y luego de haberse iniciado los primeros trabajos de exploración mediante sondajes Churn-Drill, el grupo Hochschild junto con otros inversionistas y la CORFO, formaron la Empresa Minera de Mantos Blancos S.A. Los estudios de prefactibilidad indicaron la presencia de 11 millones de toneladas de mineral con una ley promedio de 1.90% de cobre soluble.

A partir de 1961 comienza la explotación del mineral oxidado a través de "rajos", el cual era tratado en una planta de lixiviación, con capacidad de 100.000 Ton métricas/mes. La disminución paulatina de las leyes llevó a la empresa a una expansión de la planta con el objeto de mantener la producción; y es así, como en 1967, la capacidad aumentó a 200.000 ton/mes. Con algunas modificaciones, en el año 1978 se llegó a una capacidad de 250.000 ton/mes.

Entre los años 1963 y 1964 la mina Mala Suerte de la Compañía Minera Andrómeda (propiedad del señor Bartolomé Marré), abasteció parcialmente la planta de Mantos Blancos, con una producción de 2000 toneladas mensuales con leyes de 3.5 % CuS. Antecedentes de producción anteriores a esta fecha son imprecisos. Entre los años 1965 y 1968, la producción alcanzó un promedio de 3000 toneladas mensuales, con una ley promedio 2.5 % de cobre soluble.

Antecedentes de producción de Mina Argentina y los laboreos de Naranja y Verónica no se han encontrado. Sin embargo se tiene conocimiento que por lo menos Mina Argentina fue propiedad del mismo Bartolomé Marré.

En 1974 se inicia la explotación subterránea del yacimiento Mantos Blancos, gracias al descubrimiento de importantes reservas de mineral sulfurado de alta ley.

A comienzos de 1980, se inicia la construcción de la planta de flotación para el tratamiento de sulfuros, la que se pone en marcha en marzo de 1981, con una capacidad de 4.000 ton/día, y con una ley de cabeza de 1.90% Cu Insoluble y 19 gr/ton de plata.

A mediados del año 1993, comenzaron los trabajos de remoción de estéril, para el proyecto "Santa Bárbara", el cual consiste, básicamente, en la unión de los cuatro rajos existentes (Elvira, Marina, Tercera y Quinta, incluyendo el laboreo subterráneo), con el objeto de maximizar la recuperación de las zonas mineralizadas del yacimiento.

En diciembre de 1996, finaliza temporalmente la explotación en forma subterránea del mineral de Mantos Blancos, con la extracción del cuerpo mineralizado Patricia.

Actualmente se sigue la explotación del proyecto Santa Bárbara, el cual alimenta a la planta de lixiviación por solventes y electroobtención con 4.7Mt de mineral oxidado de cobre con una ley de cabeza de 0.70%CuS, y la planta concentradora con 4.5Mt de mineral sulfurado de cobre con una ley de cabeza de 1.10%CuI.

1.4 Objetivos

Este trabajo tiene la intención de utilizar el modelamiento geoestadístico de las leyes de Cobre en el yacimiento Mantos Blancos y la distribución de la especies mineralógicas sulfuradas presentes en uno de los cuerpos mas ricos del yacimiento, con el fin de diferenciar el comportamiento de las leyes de CuT(%) en las distintas asociaciones mineralógicas. Se pretende poder aplicar dicho modelamiento al resto de los cuerpos sulfurados presentes en el yacimiento.

1.4.1 Objetivo General

Establecer la relación existente entre la mineralogía sulfurada presente en el cuerpo mineralizado Nora del yacimiento Mantos Blancos y las leyes de Cobre, con el fin de predecir de mejor manera las leyes y mineralogías de alimentación a la planta de sulfuros. Se pretende con el establecimiento de esta relación, su utilización en otras zonas del yacimiento que presentan cuerpos sulfurados de características similares.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Obtener una base de datos limpia del cuerpo mineralizado Nora. Utilizar la información agregada en las últimas campañas de perforación, en las cuales serán verificados los controles y Aseguramientos de Calidad (Qa/Qc) realizados, con el fin de asegurar la veracidad de los datos a utilizar.
2. Modelar el volumen mineralizado del cuerpo Nora utilizando kriging de indicadores
3. Definir asociaciones mineralógicas para diferenciar zonas de comportamiento de las leyes de CuT(%). Utilizar el modelamiento geoestadístico de la mineralización en Mantos Blancos.
4. Modelar CuT(%) separado en las distintas asociaciones mineralógicas presentes en Nora.
5. Reconciliar los resultados obtenidos en este proceso de estimación con los resultados de la explotación en dicha área y el modelo oficial, con el objetivo de validar la estimación realizada.

1.5 Metodología de Trabajo

En el desarrollo de este informe se efectuarán los siguientes pasos con el fin de lograr los objetivos planteados en la sección anterior:

1. Recopilación de información relevante y actualizada del distrito Mantos Blancos, con el fin de establecer el Marco Geológico actualizado del depósito.
2. Recopilar la información de sondajes agregada al cuerpo mineralizado Nora en las últimas campañas de perforación. Revisar el estado del Control y Aseguramiento de Calidad (QA/QC) realizado a estos sondajes.
3. Validar la información de los sondajes nuevos y agregarla a la base de datos histórica del cuerpo mineralizado Nora en Mantos Blancos.
4. Realizar marcación por medio de indicador para CuT(%) con el fin de definir el volumen mineralizado
5. Establecer los variogramas para el modelamiento del indicador de CuT(%)
6. Realizar kriging del indicador de cobre total.
7. Definir asociaciones mineralógicas para diferenciar zonas de comportamiento de las leyes de CuT(%). Utilizar el modelamiento geoestadístico de la mineralización en Mantos Blancos.
8. Realizar análisis variográfico de la variable CuT(%) en el volumen definido por el kriging del indicador.

9. Ejecutar kriging ordinario de la variable CuT, en los volúmenes definidos por las asociaciones mineralógicas
10. Validar la estimación realizada.
11. Reconciliar los resultados obtenidos en este proceso de estimación con los resultados de la explotación en dicha área y el modelo oficial, con el objetivo de validar la estimación realizada.

1.6 Agradecimientos

CAPÍTULO 2

GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MANTOS BLANCOS

2.1 GEOLOGÍA DISTRITAL

2.1.1 Marco Geológico Distrital

En un contexto general, la Cordillera de la Costa en el Norte de Chile se encuentra formada principalmente por rocas volcánicas de edad Jurásica, intruidas por granitoides emplazados entre el Jurásico y Cretácico inferior (Cornejo et al., 2006). En el Distrito Minero Mantos Blancos se observan rocas sedimentarias, volcánicas e ígneas cuyas edades varían entre el Paleozoico y el Cenozoico, que representarían un paleo-arco volcánico desarrollado durante el Jurásico que estaría conformado por la Secuencia Volcánica Mantos Blancos y la Formación la Negra (Infanta, 2002).

Estas unidades están afectadas por un conjunto de fallas ubicadas al oeste del distrito, que se encuentran inmersas en el dominio de la zona de Falla de Atacama y forman parte del segmento Salar del Carmen (Figura 2.1) (Ulloa, 2007).

Se puede hacer una descripción de las unidades litológicas presentes en el yacimiento, de acuerdo a su edad y tipo (Figura 2.2). Este registro se puede detallar de la siguiente manera:

Formación Sierra del Tigre (Niemeyer *et al.*, 1997)

Devónico

La Formación Sierra del Tigre, consiste en una secuencia de metasedimentitas plegadas y afectadas por metamorfismo de contacto. Niemeyer *et al.* (1997), definen estas rocas como una secuencia de rocas sedimentarias compuesta por una alternancia turbidítica de bancos de areniscas y lutitas, de edad devónica. Afloran de forma discontinua, a unos 10 km al noroeste de la Mina Mantos Blancos en quebrada Zig - Zag y a 15 km al sureste en la localidad de Sierra del Tigre. En el distrito tanto la base como el techo de esta unidad no se exponen, observándose solamente una zona de cizalle dúctil, que la pone en contacto con las tonalitas del Plutón Ancla (Cortés, 1998). El fuerte plegamiento y a la mala exposición de

las rocas pertenecientes a la Formación Sierra del Tigre, impiden precisar su potencia. Sin embargo, Niemeyer *et al.* (1997), estiman un espesor de 1.500 a 2.000 m para la formación.

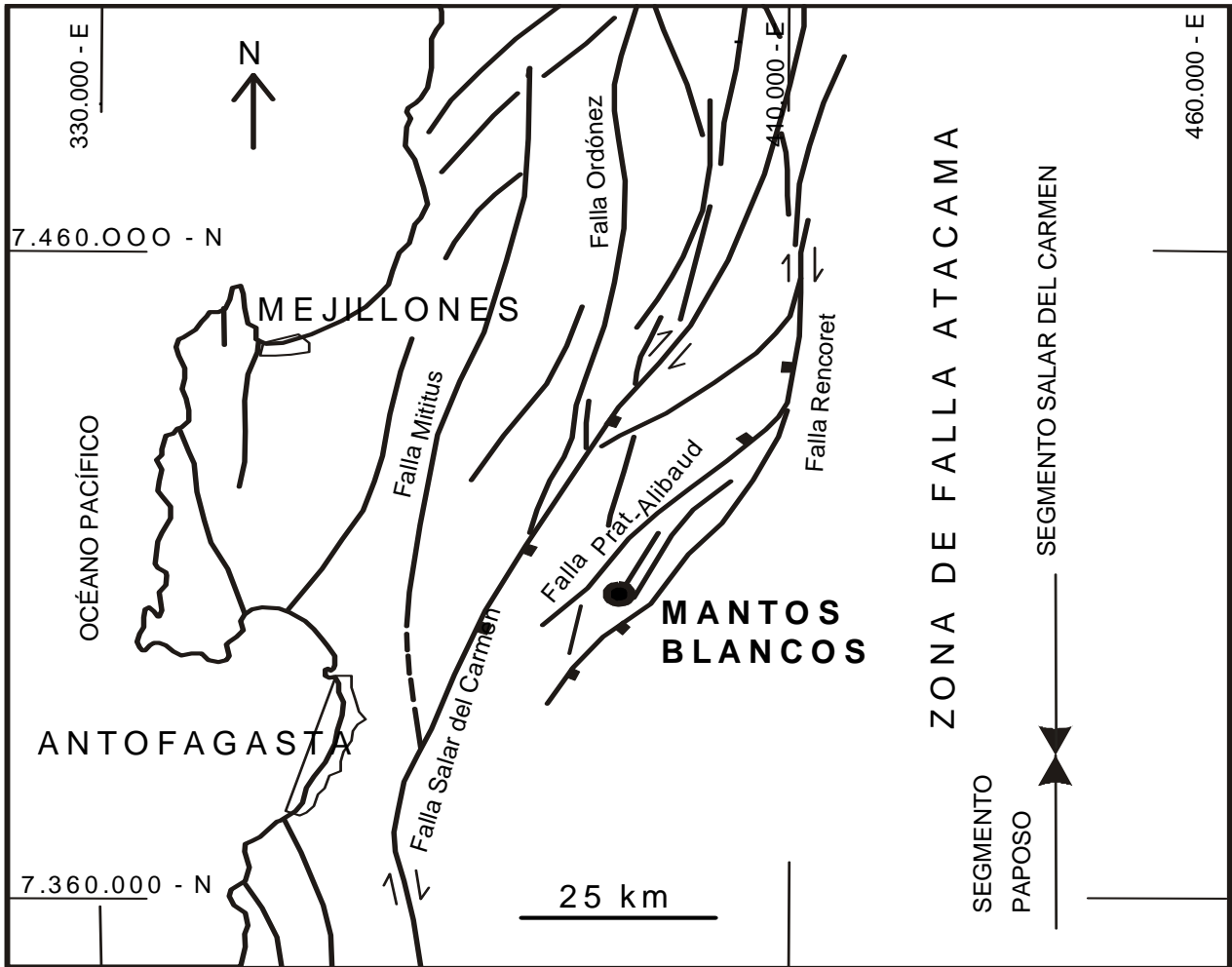


Figura 2.1: Marco estructural del depósito Mantos Blancos

Metasedimentitas del Cerro Alibaud (Cortés, 1998)

Triásico

Se define informalmente por Cortés (1998) como una serie de afloramientos discontinuos de rocas sedimentarias marinas bien estratificadas e intensamente silicificadas, constituidas por areniscas calcáreas y niveles de lutitas calcáreas que alternan con calizas, cuarcitas, estratos de conglomerados y algunos niveles andesíticos. La secuencia se encuentra fuertemente afectada por un metamorfismo de contacto generado por la intrusión de granodioritas y monzogranitos del Plutón Alibaud, reflejado por la intensa silicificación y la presencia de cuarcitas. Se exponen típicamente en el Cerro Alibaud, a unos 4 km al norte

del yacimiento Mantos Blancos, cubriendo una superficie aproximada de 1 km². La secuencia se dispone de manera homoclinal con rumbos de N(25-60)°W y manteos de 56°-85° al SW. La base de la unidad no está expuesta y su límite superior lo constituye la actual superficie de erosión. De acuerdo a la disposición de los estratos de esta unidad se presume que las metasedimentitas se encuentran infrayaciendo a la Secuencia Volcánica Mantos Blancos. Dataciones realizadas por Cortés (1985), en biotitas por el método K/Ar a la granodiorita arroja edades mínimas de: 188 ± 4 Ma (al noreste de cerro Alibaud), 186 ± 4 Ma (quebrada Esperanza) y 172 ± 4 Ma (quebrada Zig-Zag) (Cortés – Sernageomin, 2003). Por otro lado, existe una edad anterior de Puig y Bóric (citados en Chávez, 1985) por el método K/Ar de 182 ± 3 Ma (quebrada Zig-Zag), por lo que con todo lo anterior se le asigna una edad mínima Jurásica Inferior. Sin embargo, Cortés (1998) le asigna una edad triásica por correlaciones litológicas con sedimentitas que infrayacen a rocas con fósiles del Hettangiano. En el distrito se ha estimado para esta unidad una potencia aproximada de 300 m (Cortés, 1998) y una potencia mínima de 100 m (Breitkreuz, 1986).

Formación La Negra (García, 1967)

Jurásico inferior – Jurásico Superior

Se denomina a la secuencia volcánica constituida principalmente por lavas de composición andesítica, tobas de lapilli de composición dacítica, brechas, areniscas y aglomerados volcánicos (Chávez, 1985; Boric *et al.*, 1990). Las lavas andesíticas que se exhiben en el Cerro Mantos Blancos fueron incluidas en esta formación por Chávez (1985), Téllez (1986), Buchelt & Téllez (1988) y Muñoz *et al.* (1988) y, constituyen los afloramientos mas orientales de esta unidad. Hacia el oeste de Cerros Mantos Blancos, se exponen afloramientos aislados de tobas de composición dacítica con características de ignimbritas, las cuales en base a sus rasgos petrológicos y texturales, fueron incluidos en esta formación.

Téllez (1986), Buchelt & Téllez (1988); basados en la división realizada por García (1967), subdividieron las rocas de la Formación La Negra en tres miembros, de acuerdo a su litología y ubicación geográfica. De esta manera definieron: Miembro inferior Cuevitas compuestos de basaltos y andesitas, expuesto en los sectores Rencoret y Cerro de Cuevitas; Miembro medio La Chimba compuesta de andesitas, basaltos y andesitas basálticas, expuestas en cerros Mantos Blancos, Quebrada la Chimba, travesa Antofagasta-estación Portezuelo y la parte este de la estación La Negra; Miembro superior La Negra, de composición andesítica y expuesto al sur de Antofagasta. De acuerdo a estos autores, las rocas de la Formación La Negra que afloran en los Cerros Mantos Blancos, constituirían la parte basal a media

del miembro La Chimba. En el flanco SW del Cerros Mantos Blancos, las volcanitas andesíticas son intruídas por la granodiorita del Plutón Alibaud, generando una importante deformación dúctil, evidenciado por la milonitización de las volcanitas, presentando una intensa foliación y un tono negro por la gran cantidad de magnetita aportada por el intrusivo durante el metamorfismo (Cortés, 1998).

Infanta (2002), indica que la base de la Formación La Negra constituye un paso gradual desde volcanitas riódacíticas y brechas dacíticas, a volcanitas andesíticas amigdaloidales, en donde parte de esta paso gradual se encuentra cubierto por aluvios y su límite superior lo limita una discordancia angular bajo los Depósitos de Gravas Aterrazadas. En un contexto regional, el límite inferior es concordante y engrana a los sedimentos marinos de las formaciones Cerros de Cuevitas y Estrato de Rencoret, e infrayace en forma discordante a la Formación Caleta Coloso (García, 1967).

La unidad compuesta por volcanitas riódacíticas y brechas dacíticas fue definida por Chávez (1985) como Secuencia Volcánica Mantos Blancos, la que corresponde a flujos de lavas dacíticas, andesíticas y brechas volcánicas, con intercalaciones de tobas y la intrusión de pequeños cuerpos subvolcánicos dacíticos y daciandesíticos (Cortés, 1998). Se distribuye en el área del yacimiento Mantos Blancos y en zonas aledañas. La secuencia tiene una disposición de rumbos N(40-50)°W y manteos entre 20° a 30° al SW, la cual aloja una importante mineralización de sulfuros, oxidados de cobre y plata subordinada. La secuencia tiene una composición ácido-intermedio y puede ser separada en dos miembros de carácter bimodal: una de composición andesítica compuesta por andesitas porfídicas y amigdaloidales, brechas volcánicas de composición similar y dacitas porfídicas; la otra dacítica, compuesta por lavas y tobas dacítico-riolíticas con intercalaciones de tobas líticas, dacitas y epiclastitas (areniscas y brechas), con pórfidos subvolcánicos asociados (Ulloa, 2007).

La base de la secuencia no está expuesta, pero se presume que su límite inferior esta en contacto posiblemente concordante con las Metasedimentitas de Cerro Alibaud, contacto obliterado por la intrusión de la granodiorita del Plutón Alibaud; su límite superior lo constituye la actual superficie de erosión. Cortés (1998), propone una disposición concordante con las lavas de la Formación La Negra por similitudes en la actitud de los estratos, mientras que Infanta (2002), propone un paso gradual de dacitas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos a andesitas amigdaloidales de la Formación La Negra.

Cortés (1998), realiza una datación radiométrica K-Ar en sericita de una dacita porfírica, con alteración sericítica penetrativa y con mineralización de calcopirita, pirita y bornita, obteniendo una edad de 150 ± 4 Ma que es considerada como la edad de alteración-mineralización de las rocas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos. Cornejo *et al.*, (2006), realizaron dataciones por el método U/Pb en zircones no zonados en rocas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos, las que arrojaron valores entre 180,8 y 181,8 Ma, que indican una edad Jurásica inferior para la secuencia. Estas dataciones son consistentes con otras determinaciones radiométricas y paleontológicas obtenidas para la Formación La Negra (Marinovic *et al.*, 1995).

Se definió un espesor de 300 m para la SVMB (Chávez, 1985). Sin embargo, Cortés (1998), estimó una potencia mínima para esta de 2.800 m. En el caso de las andesitas amigdaloidales, en el sector de Cerros Mantos Blancos Téllez (1986), estimó un espesor mínimo de 7.850 m y una potencia de 12.000 m para el Miembro La Chimba, mientras que Cortés (1998), estimó para esta unidad una potencia mínima de 6.875 m.

Plutón Ancla (Cortés, 1998)

Jurásico Inferior

Se denomina Plutón Ancla a un cuerpo intrusivo que se expone en los alrededores del Cerro Ancla, en el sector noroccidental del distrito Mantos Blancos, en una extensa franja de orientación NE-SW y que es controlado por estructuras transcurrentes derivadas del Sistema de Falla de Atacama. Este cuerpo aflora en un área aproximada de 72 km² y esta conformado principalmente por tonalitas de grano grueso que presentan foliación moderada y aspecto gnéisico (Cortés, 1998).

Mediante una datación radiométrica K-Ar realizada en biotitas de una tonalita del sector oriental de la quebrada Zig-Zag (en Chávez, 1985), entregó una edad de 182 ± 3 Ma para la intrusión del plutón, asignándolo al Jurásico inferior. Intruye a las rocas de la Formación La Negra y Formación Sierra de Tigre, evidenciado por una intensa silicificación y zona de cizalle dúctil en las rocas estratificadas adyacentes al contacto (Cortés, 1998).

Plutón Alibaud (Cortés, 1998)

Titoniano- Berriasiano

Corresponde a un cuerpo intrusivo que se distribuye en los alrededores del Cerro Alibaud, cubriendo una superficie aproximada de 56 km², en una franja de orientación NE-SW. Está compuesto por granodioritas y monzogranitos porfídicos con escasos xenolitos. Las granodioritas corresponden al cuerpo principal y más temprano del plutón, en cambio los monzogranitos se presentan en forma restringida y asociados a diques de la misma composición que cortan tanto a las fases más tempranas como a rocas volcánicas adyacentes como a la Formación La Negra y a la Secuencia Volcánica Mantos Blancos.

Dataciones radiométricas K-Ar realizadas por Chávez (1985), en biotitas de granodioritas del cuerpo principal, a 5 km al suroeste de Mantos Blancos, entregan edades de 147 ± 1 Ma y 147 ± 4 Ma para la edad del emplazamiento de Plutón Alibaud. Intruye a las Metasedimentitas de Cerro Alibaud y a las rocas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos. Además, emplaza a las volcanitas de la Formación La Negra, evidenciado por una intensa aureola de metamorfismo de contacto (Maldonado, 2004). Estos cuerpos granodioríticos, constituyen las etapas finales del magmatismo Jurásico tanto en el área de estudio como en otras zonas de la Cordillera de la Costa (Cortés, 1998).

Cuerpos Subvolcánicos Dacíticos (Cortés, 1998)

Jurásico inferior- Jurásico superior

Estos cuerpos de composición dacítica, se distribuyen como pequeños afloramientos aislados que intruyen a las rocas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos, presentando mineralización sulfurada en los sectores del yacimiento Mantos Blancos (Chávez, 1985).

En base a que estos cuerpos cortan las rocas de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos del Jurásico inferior, son cortados por diques dioríticos del Jurásico superior y la mineralización sulfurada presente ha sido datada en 150 Ma, se le asigna un rango de edad Jurásico inferior – Jurásico superior (Cortés, 1998).

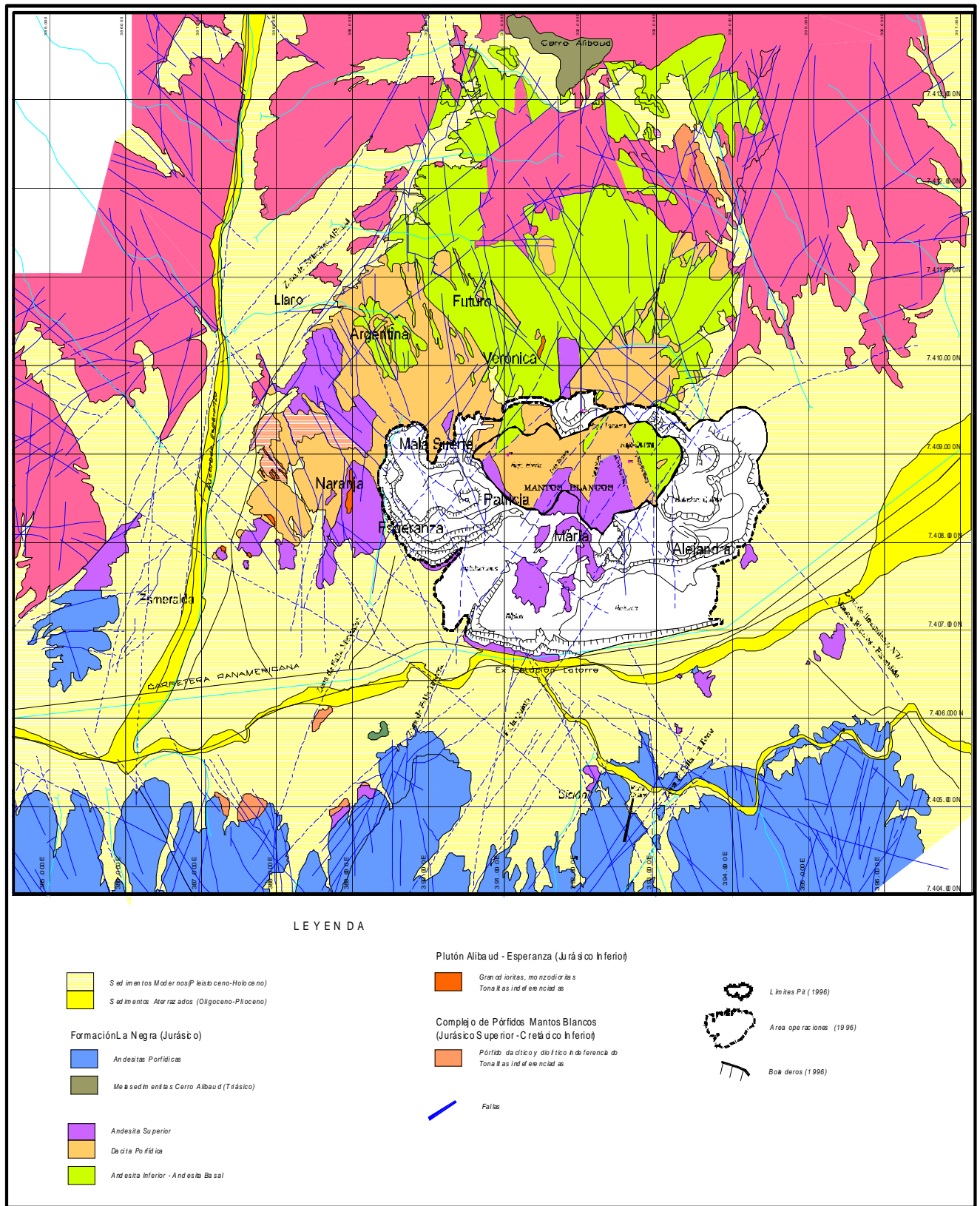


Figura 2.2: Geología en el área del Distrito Mantos Blancos (Modificada de Infanta (2002))

Cuerpos Subvolcánicos Dioríticos (Cortés, 1998)

Jurásico superior – Cretácico inferior

Estos cuerpos volcánicos se exponen en el Cerro Mantos Blancos como afloramientos de pequeñas dimensiones que se encuentran intruyendo a las lavas de la Formación La Negra, produciendo silicificación en su contacto. La relación de intrusión de estas unidades permite asignar un rango de edad relativamente amplio, entre el Jurásico superior y Cretácico inferior.

Diques

Jurásico superior – Cretácico inferior

En el Distrito Minero de Mantos Blancos, se han reconocido dos grupos principales de diques que se distribuyen ampliamente (Cortés, 1998). Un primer grupo conformado por rocas de composición monzogranítica, asociado a fases tardías y más diferenciadas de Plutón Alibaud, que presentan una orientación preferencial NW-SE (Infanta, 2002) en la periferia del yacimiento, especialmente al oeste del mismo, asociado claramente con la mineralización. El segundo grupo de diques esta compuesto por cuerpos de composición diorítica, microdiorítica y "ocoítica" de color gris oscuro a verdoso, de textura porfídica de grano fino, que se distribuyen ampliamente en el área de estudio con una orientación preferencial NE-SW y manteos subverticales (Cortés, 1998). Este grupo de diques, corta a todas las unidades de roca que afloran en el distrito.

Chávez (1985), realizó dataciones K-Ar en hornblendas obteniendo edades de 147 ± 4 Ma y 149 ± 13 Ma, que corresponden al rango Titoniano-Valanginiano. Munizaga *et al.*, (1991) dató un dique ocoítico ubicado en los alrededores del yacimiento y que arrojó una edad entre $113 \pm 0,7$ Ma y $110 \pm 0,7$ Ma, correspondientes al rango Aptiano-Albiano. Cortés (1998), realizó una datación K-Ar en roca total de un dique de hornblenda en el flanco sureste del yacimiento Mantos Blancos, obteniendo una edad de 101 ± 3 Ma, correspondiente al Albiano. En base a estas dataciones se asigna a los diques a un rango de edad Jurásico superior – Cretácico inferior.

Depósitos de Gravas Aterrazadas (Cortes, 1998)

Mioceno – Plioceno

Esta unidad informal, corresponde a antiguos rellenos de cuenca principalmente compuestos por gravas, arenas y limos que se distribuyen en toda la región. Se presentan como relieves solevados, dispuestos de manera subhorizontal con potencias entre 5 y 10 m (Cortés, 1998). Se componen de conglomerados y brechas polimícticas semiconsolidadas, mal seleccionadas, con fragmentos volcánicos andesíticos y dacíticos, clastos provenientes de rocas sedimentarias, metamórficas e intrusivos; dispuestos en una matriz de arena y limo. En algunos afloramientos se intercalan niveles cineríticos, mientras que en otros inmediatamente bajo la superficie no consolidada es común encontrar un nivel cementado por sales con espesores que varían de centímetros a metros (Cortés, 1998). Sin embargo, en los afloramiento mas cercanos al yacimiento, se observan intercalaciones de mineralización oxidada de cobre producto de la denudación del mismo (Infanta, 2002). Infrayacen en discordancia de erosión a los depósitos sedimentarios modernos y sobreyace en discordancia angular a todas las unidades estratificadas.

Mediante dataciones radiométricas K/Ar en biotitas de ceniza riolítica que se intercala con los Depósitos de Gravas Aterrazadas ubicados a 5 km del yacimiento, entregan un rango de edad de $2,87 \pm 0,03$ y $2,97 \pm 0,07$ Ma, lo que permite asignarle una edad Plioceno superior (Chávez, 1985), que contrasta con las dataciones K-Ar realizadas por Naranjo & Paskoff (1985), con edades entre $4,4 \pm 0,3$ Ma y $22,6 \pm 1,6$ Ma en biotitas de ignimbritas y cenizas re trabajadas, intercaladas en depósitos de gravas en el Norte de Chile. Según estos datos, es posible asignar a esta unidad un rango de edad Mioceno-Plioceno (Cortés, 1998).

Depósitos Sedimentarios Modernos (Cortés, 1998)

Plioceno – Holoceno

Consiste en depósitos aluviales, coluviales y eólicos, de gravas, arenas y limos, que se presentan rellenando quebradas, valles y depresiones. En sectores aledaños a las laderas de cerros, se localizan numerosos conos aluviales formados por depósitos de clastos angulosos de gran tamaño (Cortés, 1998). Estos sedimentos sobreyacen en contacto discordante a todas las unidades estratificadas, y su techo corresponde a la actual superficie de erosión. Dataciones radiométricas K-Ar, realizadas por Chávez (1985), en biotitas de una toba riolítica re trabajada intercalada en gravas a 5 km al sureste del yacimiento Mantos

Blancos, arrojaron edades de $2,87 \pm 0,03$ Ma y $2,97 \pm 0,07$ Ma, las cuales permiten asignar una edad máxima pliocena a las etapas iniciales de la sedimentación (Cortes, 1998).

2.2 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO MANTOS BLANCOS

2.2.1 Geología del yacimiento

En el área de la mina Mantos Blancos se han podido distinguir un conjunto de unidades mineras que deben sus nombres a la historia del depósito. En el año 1978 se formó el Departamento de Geología con geólogos residentes mientras, como fue señalado anteriormente, se perforaron sondajes desde la década del 60. Estas unidades forman parte de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos definida por Chávez (1985), que se ha incluido en la Formación La Negra. En el yacimiento, estas unidades locales definen una columna de rumbo N25-50°W e inclinación de (10-20)°SW, con un espesor reconocido de 700 - 800 m, sin que hasta ahora se haya detectado su base (**Figura 2.3**). Todas las unidades mineras pueden contener mineralización de cobre. La antigua unidad denominada Andesita Inferior, actualmente se considera como parte de la Diorita (Pizarro, 2004).

La unidad Andesita Superior se desarrolla sobre tobas y flujos de lavas dacíticas y riolíticas, andesitas, epiclastitas y brechas volcánicas, con una tonalidad morada a pardo rojiza por la presencia de hematita roja y hematita metálica fina diseminada, en parte de hábito especular. Presenta albitización de feldespatos, epidota, sericita-(illita) débil y silicificación. Tiene un espesor máximo reconocido de 300 m. Ocurre como una cubierta estéril de las zonas mineralizadas, en contacto gradacional con la Dacita Porfídica. La Andesita Superior fue datada en el banco 948 de Bárbara Central, obteniéndose una edad de 181.7 ± 0.2 Ma (Cornejo et al. (2006), por el método TIMS (U-Pb en zircones no zonados)).

La unidad Dacita Porfídica corresponde a riodacitas de textura porfídicas y brechas riodacíticas, que presentan un color blanco rosáceo a rojo intenso de acuerdo a la cantidad de hematita. En general, las rocas de coloraciones mas pálidas presentan escasa mineralización, mientras las rocas con un color rojo intenso presentan mineralización de cobre importante. Esta unidad desarrolla una potencia máxima de 150 m.

La unidad Dacita Cuarcifera está constituida por flujos de lavas dacíticas a riolíticas que litológicamente corresponden a una riolita cuarcífera – toba riolítica. Esta unidad desarrolla las mismas tonalidades de la dacita porfídica, siendo diferenciada de la unidad precedente por la presencia de ojos de cuarzo de 1 a 5mm y la ausencia de textura porfídica. Alberga mineralización en forma de sulfuros de cobre con oxidados de cobre subordinados y despliega un espesor mayor a 200 m. Esta unidad fue datada en el fondo del rajo Elvira (Banco 624), obteniéndose una datación de 181.8 ± 0.6 Ma (Cornejo et al. (2006), por el método TIMS (U-Pb en zircones no zonados)).

La unidad denominada Diorita corresponde a la unidad informal intrusiva tradicional del yacimiento. Corresponde a un cuerpo subvolcánico tipo *sill*, con la petrografía de una diorita porfídica de color verde, vesicular, albitizada y fuertemente cloritizada, con una potencia máxima en el yacimiento de 50 m. Puede ocurrir mineralizada, tanto con oxidados como sulfuros de cobre.

La unidad Arenisca Volcánica corresponde litológicamente a una arenisca volcanoclástica (tobácea) de grano fino a grueso, de colores rosado claro a pardo rojizo. Presenta una potencia variable de 0.5 a 5 m.

La Andesita Basal corresponde litológicamente a una andesita porfídica cloritizada. Tiene un color verde a gris verdoso producto de la fuerte alteración de cuarzo – clorita – epidota. Constituye el piso de la mineralización en el yacimiento. Se reconoce con un espesor de 100 m.

La unidad Andesita intrusiva corresponde a un filón manto riodacítico. Presenta colores entre rosados y verdes, dependiendo del grado de albitización y cloritización desarrollado. Puede presentarse en formas concordante (*sill*) o discordante (diques). Su espesor varía de 1 a 10 m. Puede presentar mineralización oxidada y sulfurada de cobre. Esta unidad fue datada en el banco 732 de Bárbara Central, obteniéndose una datación de 180.8 ± 0.2 Ma (Cornejo et al. (2006), por el método TIMS (U-Pb en zircones no zonados)).

Los Diques están constituidos por cuerpos filonianos subverticales de rumbo preferencial noreste, que composicionalmente corresponden a dioritas porfídicas gruesas de piroxeno-plagioclasa y dioritas porfídicas finas de hornblenda. Estas rocas cortan a todas las unidades del yacimiento, incluso a los cuerpos mineralizados. Son de colores verde oscuro o grises oscuros productos de la fuerte cloritización y la presencia de una gran cantidad de magnetita. Son esencialmente estériles, aunque de manera local

pueden albergar mineralización de oxidados de cobre, así como pueden presentar pirita en niveles profundos. Algunos de estos cuerpos discordantes han sido datados, con edades entre 147 a 149 Ma (Chávez (1985), por el método K/Ar en anfíbola), 147.4 ± 1.4 Ma (Munizaga *et al.* (1991), por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa) y 151.3 ± 1.2 (Cornejo *et al.* (2006), por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en plagioclasa). Estas edades se aproximan a las publicadas para la granodiorita Alibaud (Cornejo *et al.*, 2006).

Las unidades descritas anteriormente pueden ser representadas en una sección esquemáticamente (Figura 2.3), pudiendo presentar límites gradacionales o por fallas.

2.2.2 Estructuras en el yacimiento

El sistema de Fallas Mantos Blancos está constituido por fallas secundarias o estructuras menores que divergen de las fallas principales pertenecientes al Sistema Fallas Atacama y que en algunos casos se disponen de manera paralelas a éstas. A partir de las fallas Prat - Alibaúd y Latorre, se derivan fallas menores en las que se puede identificar tres sistemas principales de fallas: NW, NS y NE, los cuales de acuerdo a la magnitud de sus trazas, abundancia de las mismas y relaciones de contactos, se relacionan temporalmente en el orden indicado.

El sistema NW es el más antiguo, con fallas de rumbo N(40-60)° W y subverticales, entre las que destacan Naranja, Casino, Polvorín y Cabecera (Infanta, 2002), las cuales son muy notorias en el lado oeste del yacimiento sobre los cuerpos mineralizados de Mala Suerte y Argentina, por lo que se estima que tienen relación con la mineralización. Este sistema es paralelo a un linamiento NW de orden continental (Archibarca – Escondida – Mantos Blancos), perteneciente a una familia de estructuras que se interpretan como fallas profundas que limitan bloques de basamento.

El sistema NS corresponde a estructuras de rumbos variables NS a N25°W y manteos subverticales. Algunas de estas estructuras pueden ser de bajo ángulo y constituyen posibles sistemas conjugados, con una importante actividad tardía posterior a la mineralización, entre las que destacan Marina, Nora y Elvira.

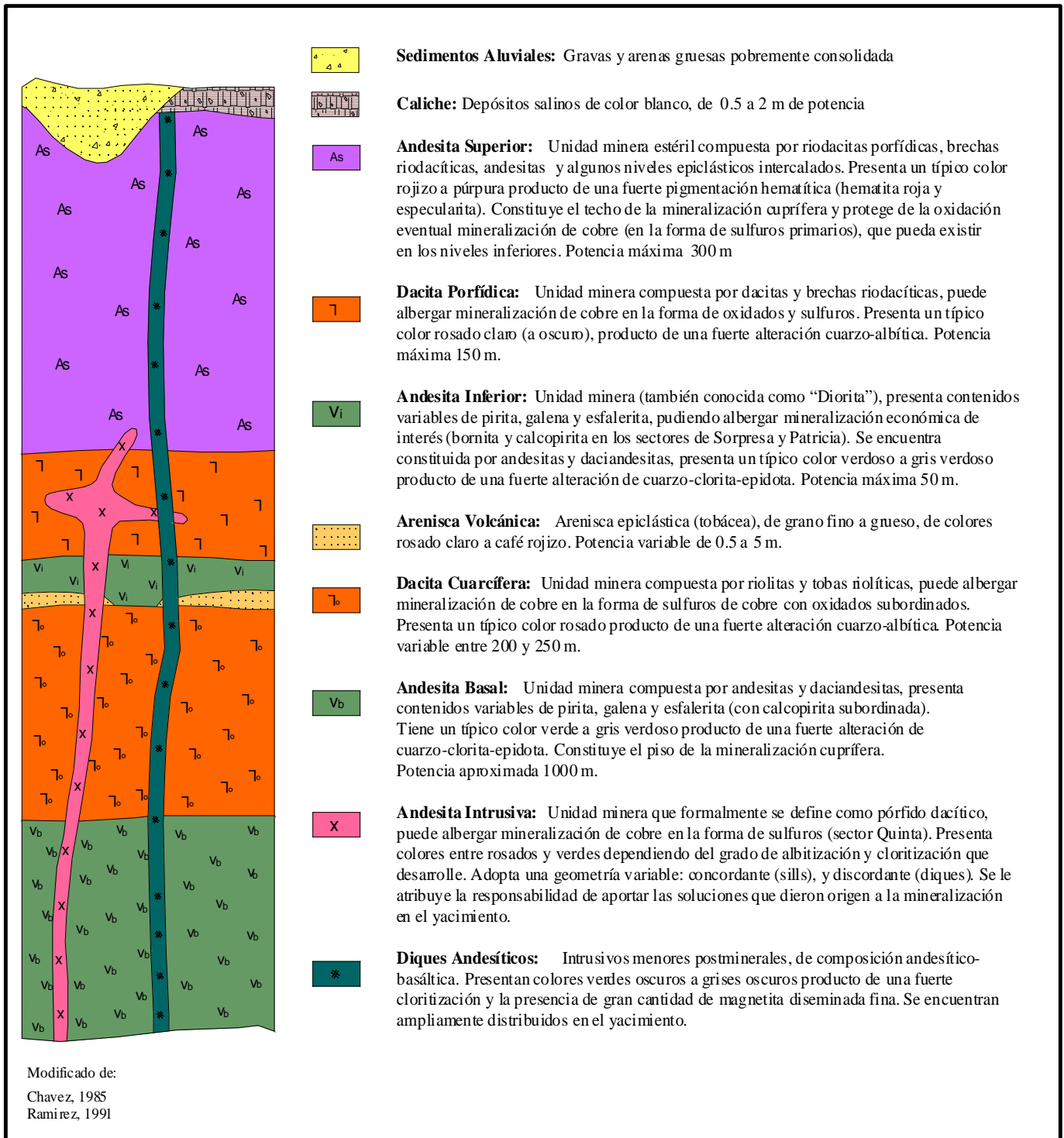


Figura 2.3: Columna estratigráfica esquematizada de las rocas presentes en la mina Mantos Blancos (Tomado de Infanta 2002).

El sistema de fallas NE (N40-55°E) son las más claras en el yacimiento, con trazas subverticales de orden regional y controlan la disposición de diques que cortan a los cuerpos mineralizados en el

yacimiento modificando así la geometría original del depósito, por lo que se deduce que su actividad principal es tardía y posterior a la mineralización. Las estructuras principales de este sistema corresponden a: Mala Suerte, Mercedes, Tercera y Quinta, donde el desplazamiento mayor en la horizontal se debe a Falla Tercera, que cruza el yacimiento en su parte central dividiéndolo en dos sectores (**Figura 2.4**). Parecen tener un control fundamental en la columna de oxidación, incluso bajo la unidad minera Andesita superior como se observa en el yacimiento, cuyo fracturamiento asociado permite que los agentes supérgenos capturen de manera más eficiente mineralización profunda de sulfuros (Orrego, 2001).

Las fallas noreste definen en el distrito cuatro bloques estructurales del tipo *horts-graben*, que de este a oeste se denominan: Latorre (fallas Latorre y Quinta), Quinta (fallas Quinta y Tercera), Tercera (fallas Tercera y Mercedes) y Mercedes (fallas Mercedes y Prat-Alibaud). En este último, existen bloques más pequeños, Argentina, Esperanza y Naranja Sur, limitados por fallas NS y NW. Entre las estructuras noreste, la información de sondajes antiguos y geología de superficie indican que el bloque Quinta ha descendido respecto a los demás, mientras que el de Mercedes sería el más alzado, aunque en este último caso con porciones que han descendido (Infanta, 2002).

Las fallas de orientación principal NW, entre las que destacan: Naranja (N40°W/70-80°SW), Casino (N35-40°W/70-80°NE) y Polvorín (N35°W/70-80°SW), conforman un corredor estructural favorable que contiene a la mineralización. Estas han sido interpretadas como fallas extensionales que controlan la distribución de los cuerpos mineralizados y el emplazamiento de diques dacíticos (Infanta, 2002).

La Falla Mala Suerte presenta longitudes aproximadamente de 3 km y siguen un comportamiento transcurrente de carácter siniestral. Corresponde a la falla más occidental, presenta un rumbo variable de N(25-30)°E y manteos aproximados de 80° al sureste, con un movimiento vertical de tipo inverso (Cortés, 1998; Cortés *et al.*, 2000).

La Falla Quinta corresponde a la estructura más oriental del sistema y limita el cuerpo mineralizado por el este, separando rocas volcánicas de rocas intrusivas. Se dispone con rumbos variables de N(15-28)°E y manteos subverticales al noroeste. Presenta un movimiento de transcurrencia dextral, combinado con movimientos verticales normales que marcan el descenso del bloque occidental (Díaz, 1998).

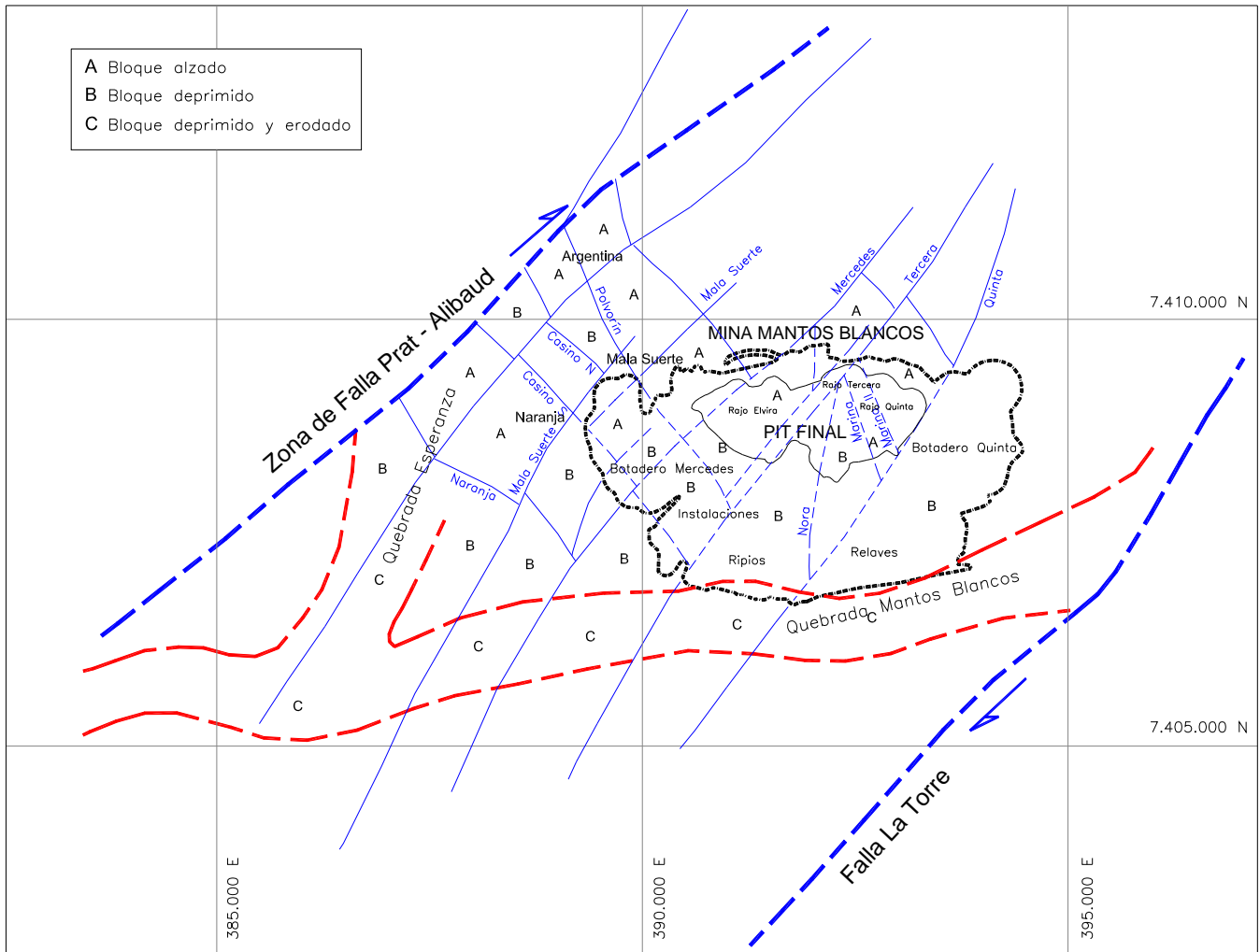


Figura 2.4 Principales fallas presentes en el depósito Mantos Blancos. Tomado de Infanta (2002).

La Falla Marina está localizada en el Rajo Marina, presenta una orientación general N5W/75SE, con variaciones en su rumbo y manto de $(15-10)^\circ$ respectivamente. La traza es irregular presentando una transcurrancia siniestral con un componente de rechazo vertical del tipo normal. En la zona de falla se exponen arreglos geométricos similares a un duplex extensional (Véliz, 1996).

La Falla Nora se localiza en el sector nororiental del yacimiento, según información de labores subterráneas, presenta una orientación de N15E/20SE, variando su rumbo y manto en unos 30° aproximadamente. Se conecta con la Falla Tercera y Quinta. Su traza es sinuosa y presenta movimientos transcurrentes siniestros con un rechazo vertical moderado del tipo normal (Lucero, 1998).

La Falla Mercedes se ubica en el borde oeste del yacimiento, limitando la zona de mineralización. Se manifiesta como una zona de falla de unos 20 m de ancho y se encuentra delimitada por dos trazas principales Falla Mercedes I y Falla Mercedes II, dispuestas en forma paralela según N35°E (Nuñez, 1998). Presenta manteos subverticales y presenta un componente oblicuo importante, pero con un desplazamiento siniestral (Díaz, 1998).

La Falla Elvira constituye la estructura principal que aflora en el área de estudio, atravesando el Rajo Elvira, con una potencia máxima de 2 m (Nuñez, 1998) y una orientación general N10E/84SE, con algunas variaciones en sus direcciones de rumbo y manteo. Presenta una transcurrancia siniestral y movimientos verticales normales (Véliz, 1996).

El Sistema de fallas Tercera presenta una orientación variable de N(20-40)°E con manteos subverticales y un ancho de 30 m. Esta falla ocasiona un importante desplazamiento en sentido siniestral con una componente oblicua, y que desplaza el cuerpo mineralizado del yacimiento Mantos Blancos del orden de unos 400 m (Cortés *et al.*, 2000).

2.2.3 Alteración y Mineralización

Usando la nomenclatura de la columna de la Figura 2.3 se identifican tres unidades de alteración-mineralización, denominadas: Andesita Superior, Dacita Porfídica y Andesita Inferior. La primera está integrada por andesitas, dacitas, brechas volcánicas, tobas y areniscas, con una típica tonalidad rojiza por la presencia de pigmentación hematítica y especuladita diseminada. La Dacita Porfídica corresponde a dacitas porfídicas y riolitas con ojos de cuarzo (Dacita Cuarcifera), tobas y andesitas, de colores pardos rosado pálido a pardo anaranjado, con alteración que incluye albita, epidota, sericita-illita, clorita y cuarzo, entre otros que acompañan a mineralización de óxidos y sulfuros de cobre. La Andesita Inferior incluye principalmente andesitas y dacitas porfídicas, por lo común de color verde por la presencia de clorita, albita, cuarzo y epidota, además de piritita y menor calcopiritita.

2.2.3.1 Alteración

La alteración hidrotermal comprende un metasomatismo potásico temprano que incluye feldespatos potásicos, cuarzo, biotita y clorita; una asociación propilítica con cuarzo, clorita, epidota, calcita y la

sobreimposición de una fuerte alteración sódica, principalmente compuesta por albita y que acompaña la generación de los cuerpos mineralizados más ricos del depósito (Ramírez *et al.*, 2006; Cornejo *et al.*, 2006). Esta albitización afecta a todas las unidades del yacimiento como reemplazo de feldespatos (fenocristales y microlitos en masa fundamental), vetillas y relleno de oquedades (Ramírez, 1991).

Por otro lado, se observa una gran presencia de hematita en el yacimiento, tanto hipógena como supérgena. La unidad denominada Andesita Superior presenta hematita especular diseminada y en vetillas. Por otro lado se observa hematita especular y hematita roja en las unidades mineralizadas, como producto directo del proceso de enriquecimiento hipógeno desde sulfuros como calcopirita (Cu:Fe=1:2) a Bornita (Cu:Fe=5:1) o digenita (Cu:Fe=9:0). Por este motivo algunos autores antiguos señalan que la intensidad del tinte hematítico de las unidades dacíticas tiene directa relación con la calidad de los sulfuros de cobre presentes.

2.2.3.2 Mineralización

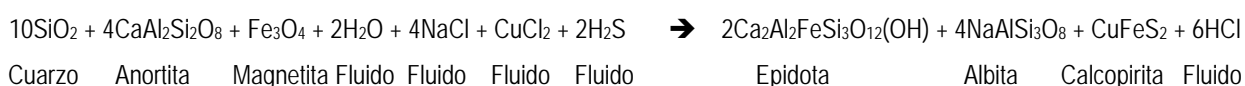
La mineralización metálica está integrada por calcosina (y/o digenita), covelina, bornita, calcopirita, pirita, especularita, magnetita, galena y esfalerita escasa, que ocurren en forma diseminada, siguiendo guías irregulares y discontinuas con espesores variables. Los oxidados de cobre corresponden a atacamita, crisocola, en forma restringida se observa malaquita, antlerita, tenorita, cuprita y almágres, según diseminación y relleno de fracturas. La plata se presenta reemplazando al cobre en la estructura cristalina de los sulfuros y, ocasionalmente, como plata nativa. Los cuerpos mineralizados corresponden a lentes irregulares de oxidados y sulfuros de cobre dispuestos en forma tabular con unos 100 a 200 m de espesor (Boric *et al.*, 1990). Se encuentran cortando la estratificación a bajo ángulo o dispuestos de manera subparalela a ella (Canales *et al.*, 1991).

La mineralización presenta una zonación vertical característica (Infanta, 2002), con especularita en la parte alta (Andesita Porfírica y Andesita Superior), a la que le sigue en profundidad una zona de oxidados de cobre (atacamita con menor crisocola), pasando a una zona de sulfuros de alta ley (calcosina-bornita). Esta última corresponde a lentes irregulares con núcleos ricos en calcosina, la disminuye hacia el borde pasando a predominar la bornita. Rodeando estos lentes, ocurre una zona de más baja ley integrado por calcopirita y bornita, terminando en profundidad con una zona pirítica, ocasionalmente en algunos sectores con calcopirita asociada. Los sectores con enriquecimiento secundario son de poca extensión,

predominando covelina sobre calcosina y ubicados en las cercanías de fallas mayores del yacimiento. Los oxidados de cobre se habrían desarrollado por la oxidación *in situ* de los sulfuros primarios.

2.2.3.3 Interpretación de las paragénesis de Alteración y Mineralización

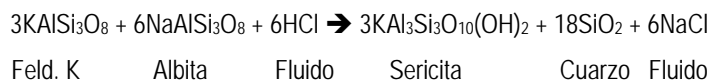
Un modelamiento de la formación de sulfuros de cobre junto a los minerales de alteración mencionados, ha sido realizado por S. Matthews. El modelo propone que el hierro es liberado por la destrucción de minerales primarios de la roca, como magnetita, biotita y piroxenos, con lo cual la depositación de sulfuros y la formación de epidota están reguladas por la disponibilidad de hierro en la roca original.



Esta reacción está indicando que la depositación de calcopirita, es posible junto a epidota y albita. La baja disponibilidad de hierro en el sistema favorece la formación de epidota rica en Al (clinozoisita) y de bornita en lugar de calcopirita. Esfeno y rutilo son productos de liberación de Ti durante la destrucción de ilmenita y/o biotita.

De acuerdo a S. Matthews, la albitización en el sistema es producto de la circulación de fluidos hidrotermales relativamente reducidos, con H₂S como la especie dominante de S, de baja sulfidización debido a la movilización de álcalis ligado a la presencia de HCl en el fluido, y rico en NaCl proveniente de un sistema más profundo.

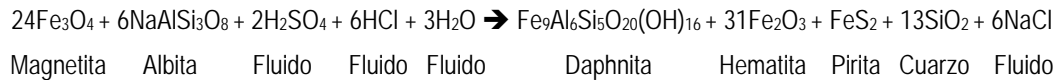
El desarrollo temprano de sericitización, de acuerdo a la siguiente reacción, puede ser un mecanismo eficiente para la liberación de sodio toda vez que altos contenidos de potasio relacionados a este tipo de alteración se ha detectado en partes profundas del depósito.



La alteración potásica temprana detectada también puede ser un mecanismo para la liberación de sodio, siguiendo el ejemplo de Mantoverde (Cornejo et al., 2000):



La formación de clorita junto a pirita, una asociación común en Mantos Blancos, puede ser explicada de la siguiente reacción siguiendo el modelo de Mantoverde (Cornejo et al., 2000), mediante la cual también es posible liberar NaCl desde la roca de caja.



Esto supone que el S en el fluido pudo encontrarse, en alguna etapa de su evolución, en la forma SO_2 . La entrada de agua meteórica al sistema derivó en la formación de H_2SO_4 , provocando una reacción tipo redox entre el Fe y S para derivar en la oxidación del Fe formando hematita y la reducción del S depositando sulfuros. Considerando que la hematita y pirita son paragenéticamente tempranos en el desarrollo del yacimiento, entonces este estado oxidado del S corresponde a una etapa temprana en la formación del depósito y, por lo tanto, la reacción anterior representaría bien la paragénesis de los estados iniciales del sistema hidrotermal. Esta interpretación concuerda en parte con las secuencias paragenéticas definidas por Chávez (1985), sobre todo con la ocurrencia de pirita y especularita (hematita) como minerales tempranos respecto a los sulfuros de cobre.

2.2.3.4 Dataciones de la Mineralización

Existen varias dataciones que se asocian a los eventos mineralizadores del distrito mantos Blancos: Oliveros *et al.* (2007), entre los $155,11 \pm 0,79$ Ma y $141,36 \pm 0,52$ Ma; Oliveros (2005), con una edad de $154,7 \pm 1,2$ a $156,6 \pm 0,5$ Ma, para las sericitas del domo riolítico y de diques máficos, y que se interpreta como el primer evento mineralizador. Munizaga *et al.* (1991), entrega una isocrona Rb/Sr de 150 a 140 ± 4 Ma, $145 - 146$ Ma por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en albita, ampliamente consistentes con un segundo grupo de sericitas con edades $145,6 - 147,5$ Ma reportados por Oliveros, 2005 (en Cornejo *et al.*, 2006) por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, con edades mas jóvenes no tan claras. Orrego *et al.* (2006), obtuvo una edad plateau de $148,7 \pm 1,5$ Ma liberado por biotita y actinolita y una isocrona de $148,2 \pm 0,8$ Ma, mediante Ar/Ar (roca total), que contrasta con las anteriores edades. El grupo de edades entre los $145 - 148$ Ma representan el mejor estimador de la edad del evento principal de mineralización, y que es concordante con las edades

obtenidas para la granodiorita Alibaud y los diques porfídicos de hornblenda que atraviesan todo el *pit* de la mina.

2.2.4 Discusión sobre la Génesis del yacimiento

La génesis del yacimiento de la misma manera que la de los yacimientos estratoligados como definición de modelo de yacimiento constituye una gran controversia. De esta polémica no se escapa Mantos Blancos y se puede señalar a modo de ejemplo las siguientes interpretaciones para la génesis del depósito:

- Gordy (1917): Lentes de granodiorita impregnados de cobre
- Ruiz et al. (1965): Tipo stockwork
- Jones, 1971 (en Infanta 2002) y Reichard, 1978: Pórfido cuprífero
- Correa, 1980: Fluidos provenientes de cúpulas intrusitas profundas
- Espinoza, 1982: Diseminado infravolcánico de sulfuros de cobre
- Bunger, 1982: Tipo sulfuro masivo
- Sato, 1984: Fluidos mineralizadores producto de la deshidratación producida en un avanzado metamorfismo de carga
- Chávez, 1985: Fluidos asociados a actividad intrusita subvolcánica con influencias de agua de mar.
- Pizarro, 1986: Singenético con el volcanismo
- Sillitoe, 1987: Fluidos metalíferos generados durante el metamorfismo de carga regional, movilizado por paleocanales sedimentarios
- Ramirez, 1991: Migración lateral de fluidos provenientes de metamorfismo de carga entrampados por estructuras o unidades litológicas impermeables
- Injoque, 1994: Manto hidrotermal tipo chileno
- Véliz, 1994: Relación de evento transtensivo y eventos termales causados por fluidos magmáticos
- Astudillo, 1995: Mineralización de cobre-hierro aportada por intrusito subvolcánico y removilizada a zonas estructurales favorables

- Henríquez y Vivallo, 1996: Manto hidrotermal originado por por emplazamiento de magma primitivo rico en hierro
- Orrego, 1997: Desgasificación en stock
- Palacios, 2003: Brechas hidrotermales desarrolladas en rocas félsicas intruidas por stocks y diques que representarían sistemas de alimentación y actividad ígnea contemporánea con la mineralización.

Como se puede rescatar del listado anterior existe una amplia gama de interpretaciones para la concentración anómala de cobre (plata) presente en el distrito Mantos Blancos.

De acuerdo a esta recopilación de información se puede describir a Mantos Blancos como un domo riódacítico e ignimbritas dacíticas asociadas, las cuales se encuentran cortadas por cuerpos subvolcánicos dacíticos a daciandesíticos (**Figura 2.5**). Esta unidad completa se encuentra intercalada por secuencias predominantemente más andesíticas, que texturalmente corresponden a andesitas porfídicas amigdaloidales y brechas volcánicas. Ambas unidades reflejan un volcanismo bimodal que es consistente con los diagramas de elementos inmóviles realizados por Bernal (2004). El domo se caracteriza por presenta pequeños "ojos de cuarzo" con plagioclasas y sanidinas con textura glomeroporfídica. La unidad superior del domo comprende a una ignimbrita dacítica soldada con hematita diseminada, además de brechas volcánicas y areniscas continentales. De esta forma, la secuencia volcánica Mantos Blancos es considerada como un centro volcánico félsico, dentro del dominio máfico del arco volcánico del Jurásico Inferior (Cornejo *et al.*, 2006).

Los cuerpos subvolcánicos que cortan al domo corresponden a dacitas gradando a daciandesitas porfídicas, que presentan fenocristales de plagioclasa y anfíbola. La secuencia volcánica se encuentra intruída por *stock* y *sill* bimodales de composición diorítica a granodiorítica (Ramírez *et al.*, 2006), y es además intruída por un extenso plutón monzodiorítico (Plutón Ancla), que forma parte del Batolito Ercilla, el cual presenta edades entre 180 - 181 Ma datado por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y U/Pb (Basso, 2004). Esta edad es similar a las edades de depositación de la secuencia volcánica. La relación entre el batolito y la superposición de la Secuencia Volcánica Mantos Blancos no es clara, debido al fallamiento y la intrusión de un pórfido más joven de composición granodiorítica a monzodiorítica (Plutón Alibaud), que arroja edades de 147 Ma (Chávez, 1985). Esta granodiorita aflora hacia el norte de la mina, donde aparentemente intruye el contacto entre, la Secuencia Volcánica Mantos Blancos y el Batolito Ercilla, relacionándolo con una serie de pequeños stock al oeste y sur de la mina (Cornejo *et al.*, 2006).

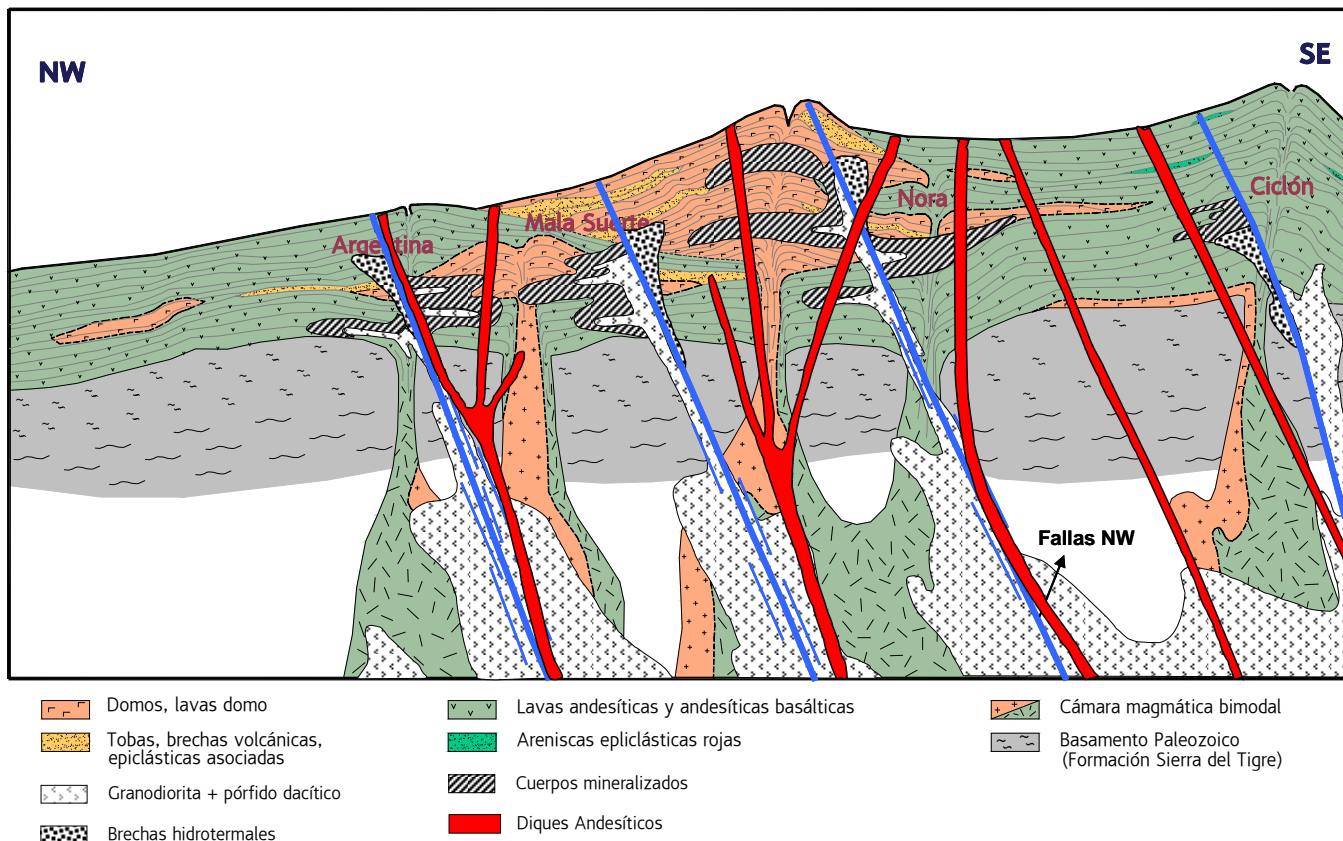


Figura 2.5 Sección esquemática de la geología del yacimiento Mantos Blancos. En la figura se observan los sucesivos eventos genéticos y los principales sistemas estructurales de rumbo NW reconocidos en el yacimiento. Tomado de Ulloa (2007).

Hacia los sectores este y oeste de los límites del yacimiento Mantos Blancos se observa la presencia de fallas con orientación preferencial NNE a NS, el cual separa el depósito mineral de las rocas plutónicas tonalíticas. Por el norte, las rocas del yacimiento son intruídas por la granodiorita del Jurásico medio (Oliveros *et al.*, 2006). En sector sur, el yacimiento está limitada por una falla de rumbo con tendencia ENE, separándolo de la secuencia de composición andesítico a basáltica, jurásica de la Formación La Negra (Cortés *et al.*, 2000). En gran parte del distrito, las fallas están cubiertas por sedimentos cuaternarios, por lo que la relación estratigráfica entre el domo riolítico hospedante y la Formación La Negra no está claro.

Según el trabajo realizado por Ramírez *et al.* (2006) existen al menos dos eventos hidrotermales: el primer evento mineralizador se encuentra acompañado de una alteración fílica mientras que el segundo evento y considerado el más importante fue acompañado por tres procesos de alteración hidrotermal: propilítica, sódica y potásica, que se asocian a la intrusión de un sistema de diques y *stock* bimodales. Además, Oliveros *et al.* (2007), indican que el segundo y principal evento mineralizador ocurrió alrededor de los 142 Ma, con una mineralización tardía relacionada con la intrusión de diques monzoníticos. Estos análisis confirman la existencia de al menos dos eventos distintos de mineralización hipógena en la génesis del depósito mineral Mantos Blancos.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN DE SONDAJES NUEVOS

Durante los años 2008 y 2009 se han perforado en el yacimiento 75413m de sondajes de aire reverso en todo el yacimiento. Estos sondajes corresponden al in-fill desarrollado en el depósito y que está enfocado a mejorar la confiabilidad de las reservas de óxidos y sulfuros en los distintos sectores de la mina. El cuerpo mineralizado denominado Nora corresponde a un volumen elongado en la dirección Norte-Sur de tamaño 700mx400mx300m aproximadamente, que se encuentra ubicado al costado oeste de la traza de la Falla Nora, hospedado en las unidades dacita porfídica y dacita cuarcífera. En su sección superior se encuentra ubicado bajo la unidad andesita superior. Este cuerpo mineralizado fue sondeado principalmente entre Octubre del 2008 y Marzo del 2009. La figura 3.1 muestra la ubicación en Bárbara Central del cuerpo mineralizado en estudio, entre las fallas Tercera, Nora y Pía.

De todos los pozos perforados en esta campaña de sondajes, 17650m corresponden al cuerpo mineralizado Nora. Para poder incorporar esta información en la base de datos histórica se debe verificar que cumple con los controles y aseguramientos de Calidad (Qa/Qc).

3.1 Revisión de Blancos en la Base de Sondajes nuevos

Las muestras blancas en la ejecución del Qa/Qc se utilizan para verificar que no haya contaminación en la preparación mecánica de las muestras, con el fin de que la información proporcionada por los pozos sea confiable.

En la figura 3.2 se puede verificar que las muestras utilizadas tienen leyes menores a la ley de corte del yacimiento que corresponde a 0.20%CuT. Es conveniente señalar que en el caso de Mantos Blancos se utilizan muestras de la Unidad Andesita Superior como blancos. Esta unidad puede presentar mineralización oxidada de cobre, por lo que no es absolutamente estéril.

Gráfico Chequeo Blanco DTH.

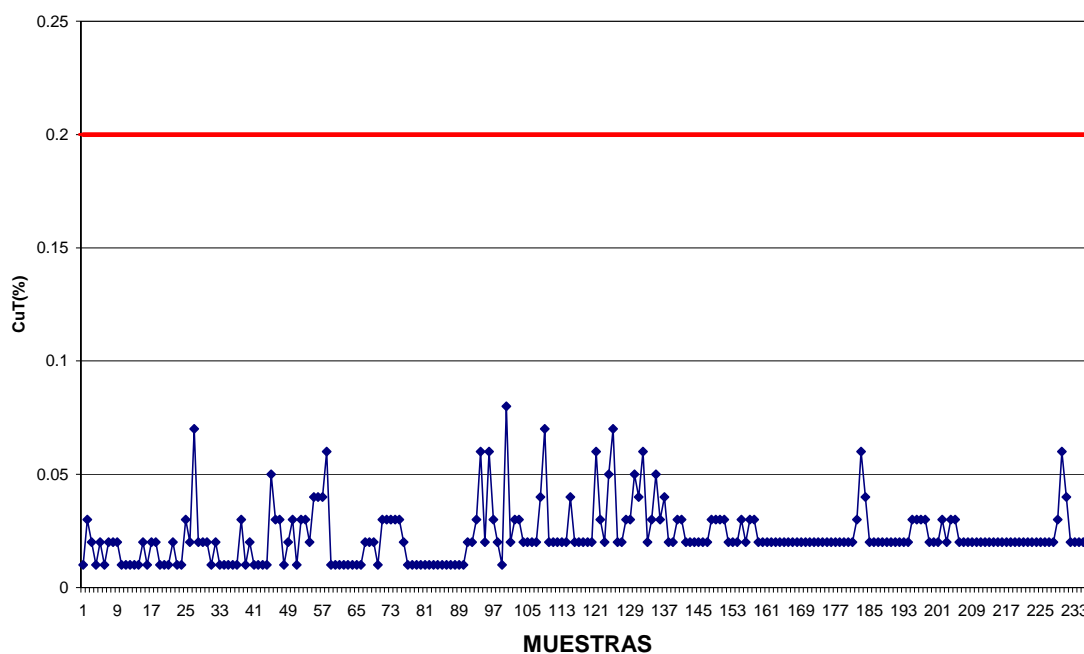


Figura 3.2 Diagrama de muestras blancas gruesas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora

En otros yacimientos se utiliza muestras de cuarzo como blanco. En el caso de Mantos Blancos no se realiza esta práctica ya que el cuarzo es fácilmente reconocible por el laboratorio debido a su coloración. Del análisis de la figura 3.2 se puede inferir que no hubo contaminación en la preparación mecánica de las muestras de los sondajes involucrados en este estudio.

3.2 Revisión de duplicados gruesos en los Sondajes nuevos

Los duplicados se utilizan en los protocolos de Qa/Qc para chequear la precisión de los análisis de las muestras (Figura 3.3), es decir la reproducibilidad del muestreo. En el caso de los duplicados gruesos se verifica la reproducibilidad del muestreo de la máquina de sondajes.

La Figura 3.4 muestra el gráfico de dispersión entre las muestras originales y sus respectivos duplicados. El gráfico muestra un leve sesgo en las altas leyes, en donde las muestras duplicadas presentan leyes mayores a las presentadas por las muestras originales. Sin embargo, esta diferencia

exhibida es menor al 20% de error, que es el aceptado en Anglo American Chile para los duplicados gruesos. La Figura 3.5 señala efectivamente que el 93% de las muestras tiene una diferencia menor al 20% de error con su respectivo duplicado, y el 7% que no cumple esta condición se concentra en las leyes cercanas al límite de detección del laboratorio (0.01%CuT), tal como lo refleja el gráfico de diferencia de la concentración del error (Figura 3.6).

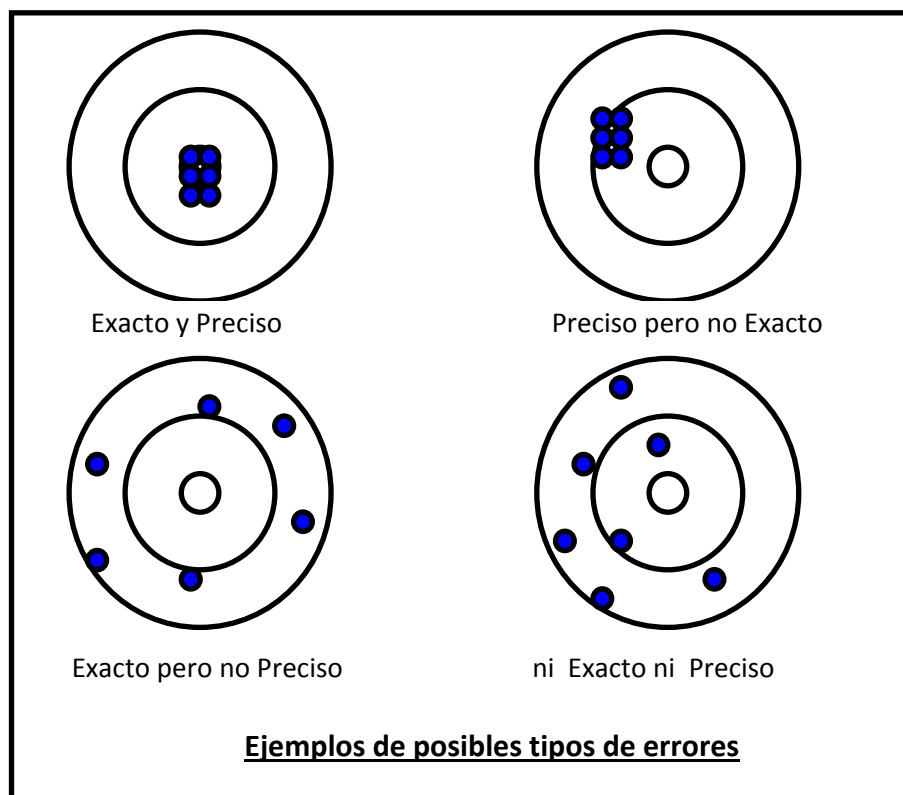


Figura 3.3 Explicación gráfica de la diferencia entre Precisión y Exactitud. (Tomado de Sullivan, 2002)

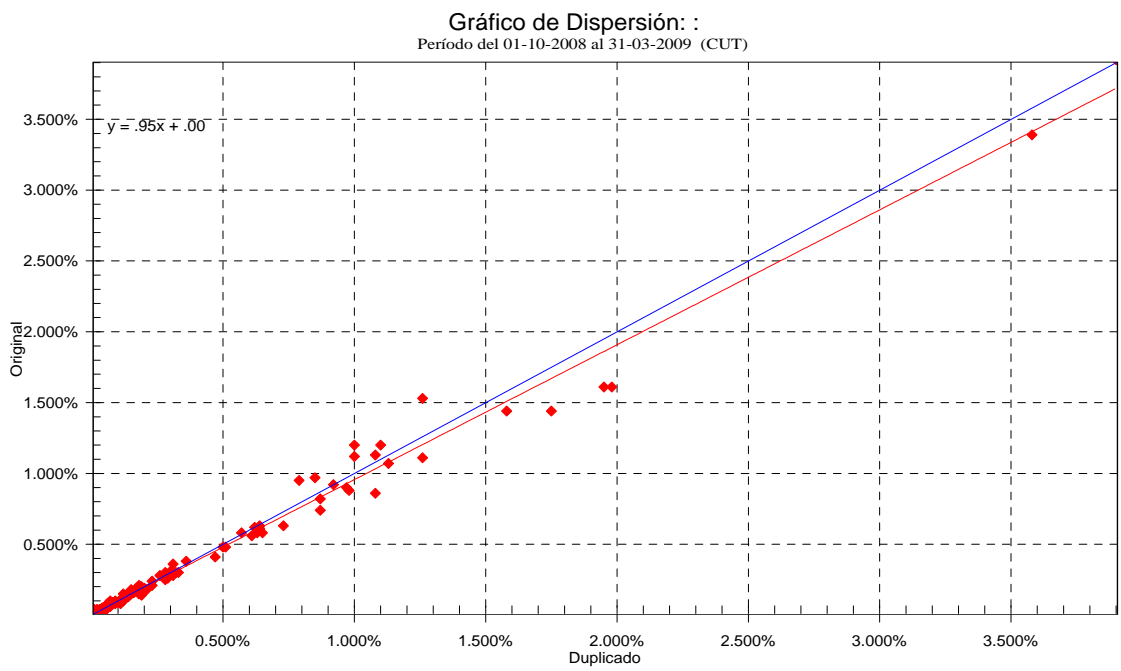


Figura 3.4 Diagrama de dispersión de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora

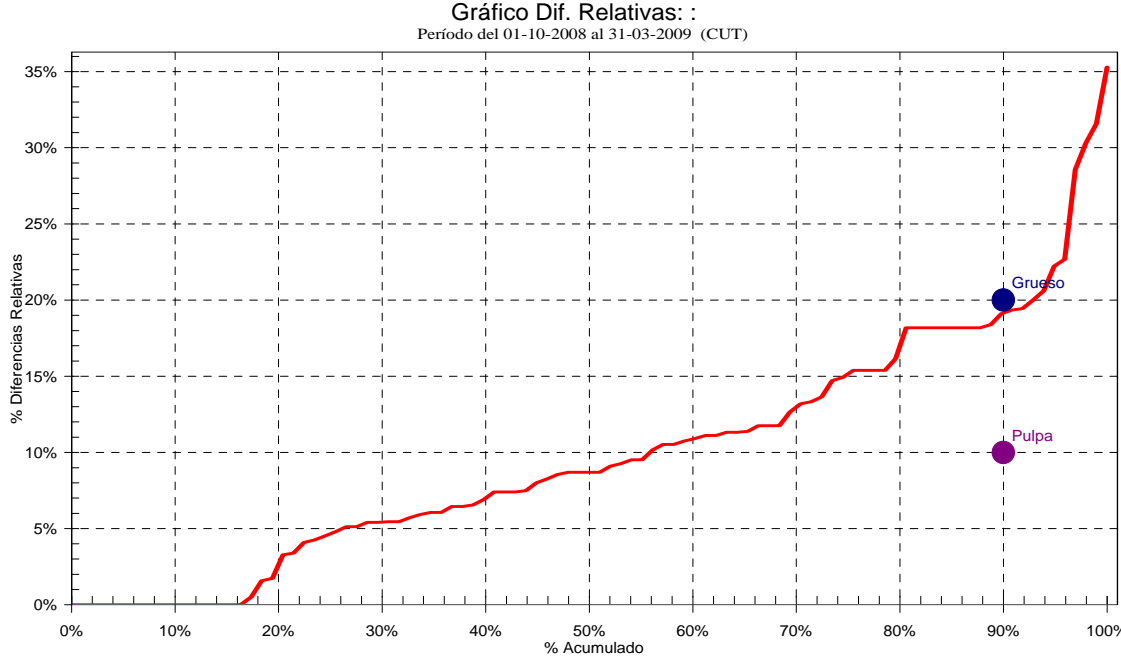


Figura 3.5 Diagrama de diferencias relativas de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora

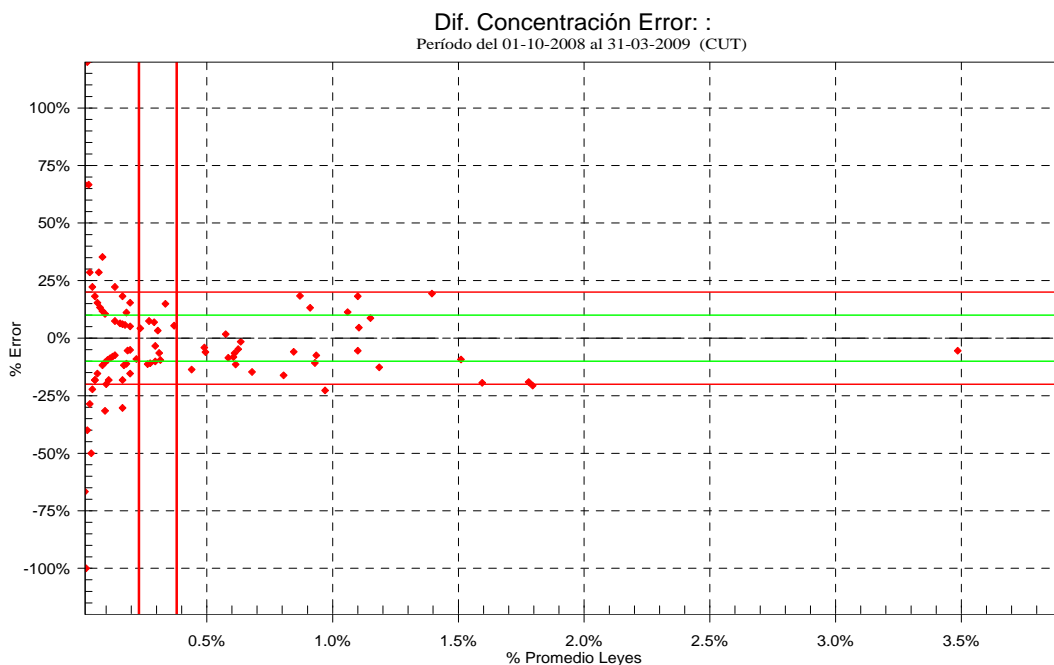


Figura 3.6 Diagrama de diferencias de concentración del error de duplicados gruesos para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora

3.3 Revisión de duplicados pulpas en los Sondajes nuevos

Los duplicados de pulpas de las muestras enviadas a los laboratorios químicos se utilizan para chequear la precisión del laboratorio. En el caso de Anglo American Chile se acepta una diferencia de 10% entre las muestras originales y duplicadas de este tipo.

La Figura 3.7 muestra el gráfico de dispersión entre las muestras originales y sus respectivos duplicados. El gráfico muestra un excelente ajuste entre duplicados y originales. La Figura 3.8 señala que el 88% de las muestras tiene una diferencia menor al 10% de error con su respectivo duplicado, y el 12% que no cumple esta condición se concentra en las leyes cercanas al límite de detección del laboratorio (0.01%CuT), tal como lo refleja el gráfico de diferencia de la concentración del error (Figura 3.9).

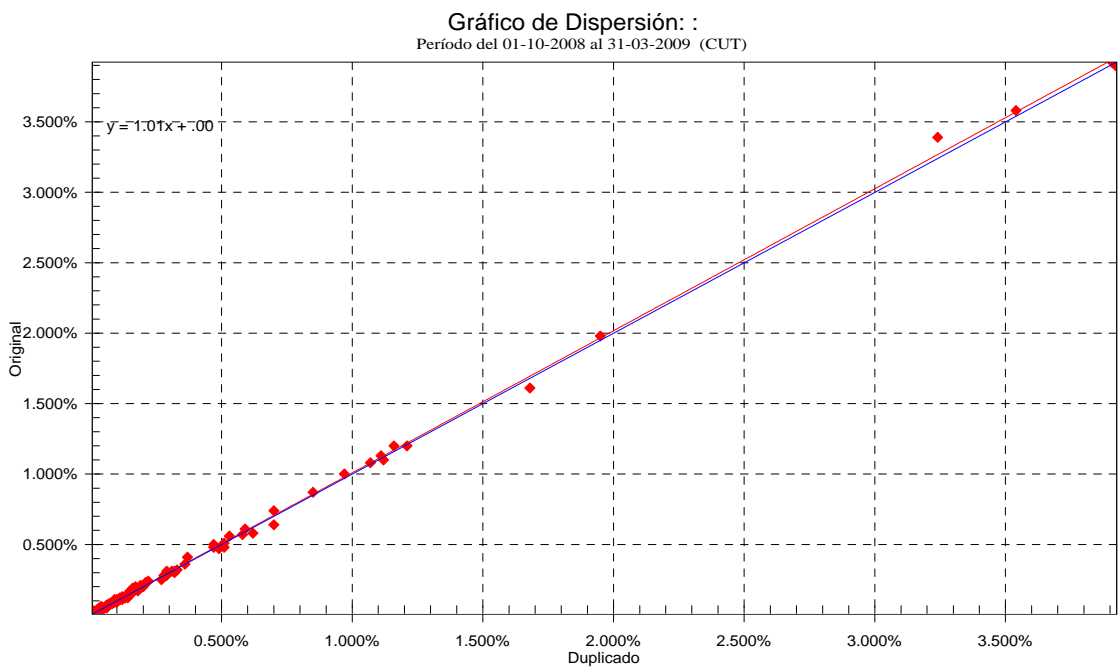


Figura 3.7 Diagrama de dispersión de duplicados pulpas para los sondeos en el cuerpo mineralizado Nora

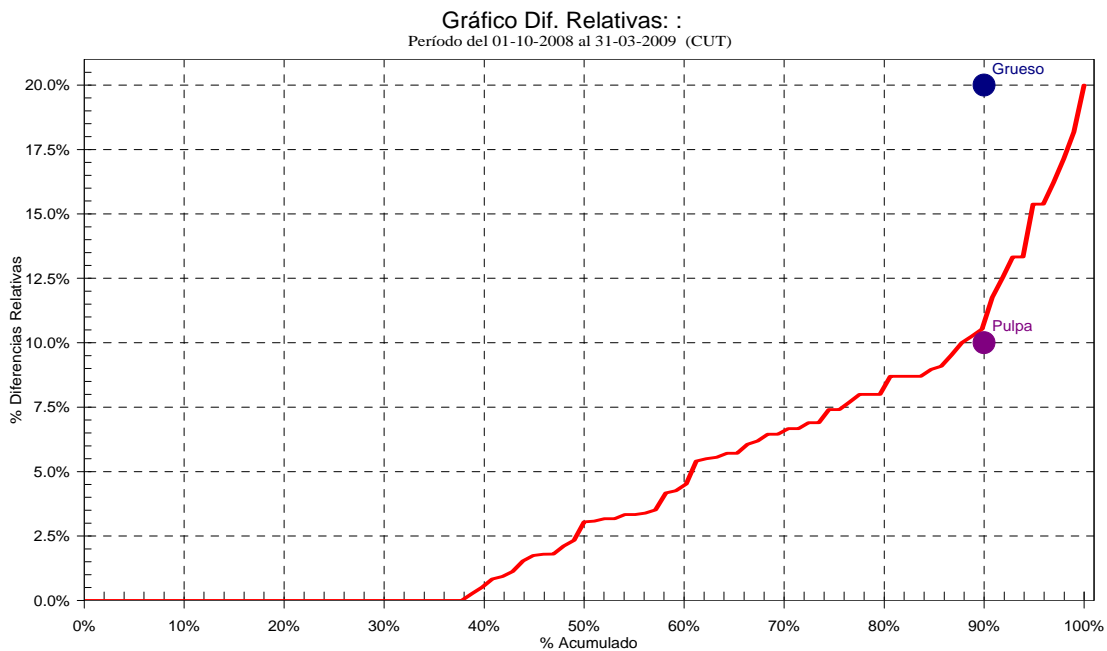


Figura 3.8 Diagrama de diferencias relativas de duplicados pulpas para los sondeos en el cuerpo mineralizado Nora

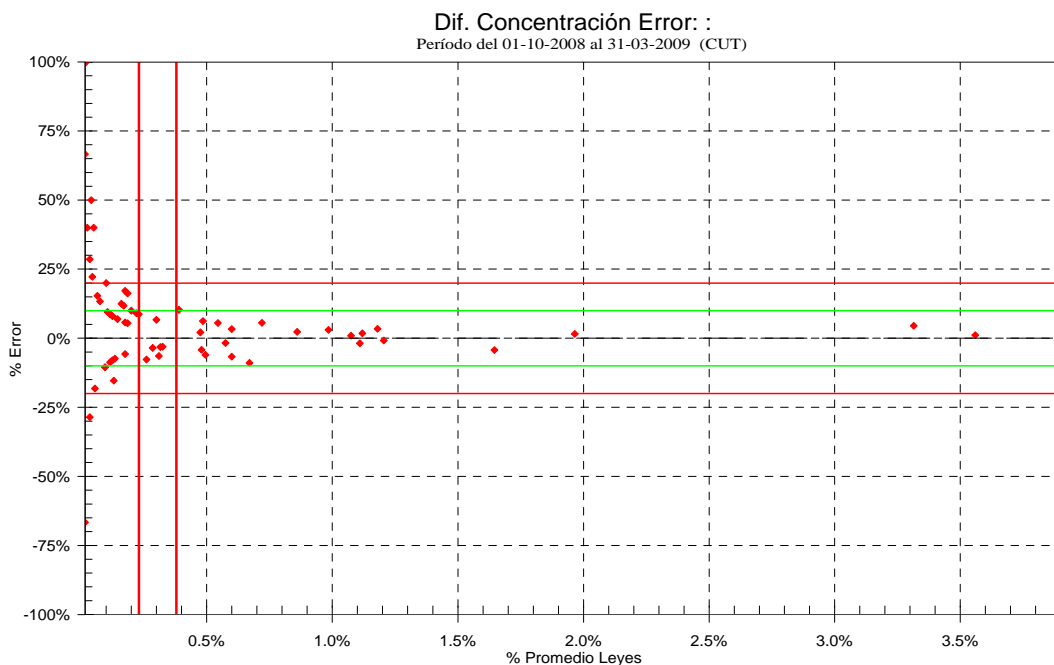


Figura 3.9 Diagrama de diferencias de concentración del error de duplicados pulpas para los sondajes en el cuerpo mineralizado Nora

3.4 Revisión de estándares en los Sondajes nuevos

En los protocolos de Qa/Qc los estándares se usan para chequear la exactitud de las muestras (Figura 3.3), es decir si las muestras analizadas se acercan al valor verdadero de las muestras. Los estándares son patrones que se mandan a preparar mediante un proceso denominado "Round Robin", en el cual se analiza un conjunto de muestras, con un protocolo estricto de preparación, en varios laboratorios de reputación con el fin de establecer un valor medio del estándar y una varianza asociada a dicho estándar. En el caso de Mantos Blancos los estándares son preparados por una entidad externa a Anglo American, con muestras del yacimiento para evitar que estos estándares muestren un aspecto diferente a las rocas del yacimiento y puedan ser detectadas por el laboratorio.

Las figuras 3.10 a 3.15 muestran los resultados obtenidos para los estándares intercalados en los lotes de las muestras de sondajes. Se puede observar de las gráficas que los estándares utilizados cubren una amplia gama de leyes de cobre que permiten detectar comportamientos diferentes a distintas leyes. Como el límite de detección del laboratorio utilizado para el análisis de las muestras es 0.01%CuT, no se observan sesgos significativos para los estándares intercalados. En algunos gráficos se observan muestras

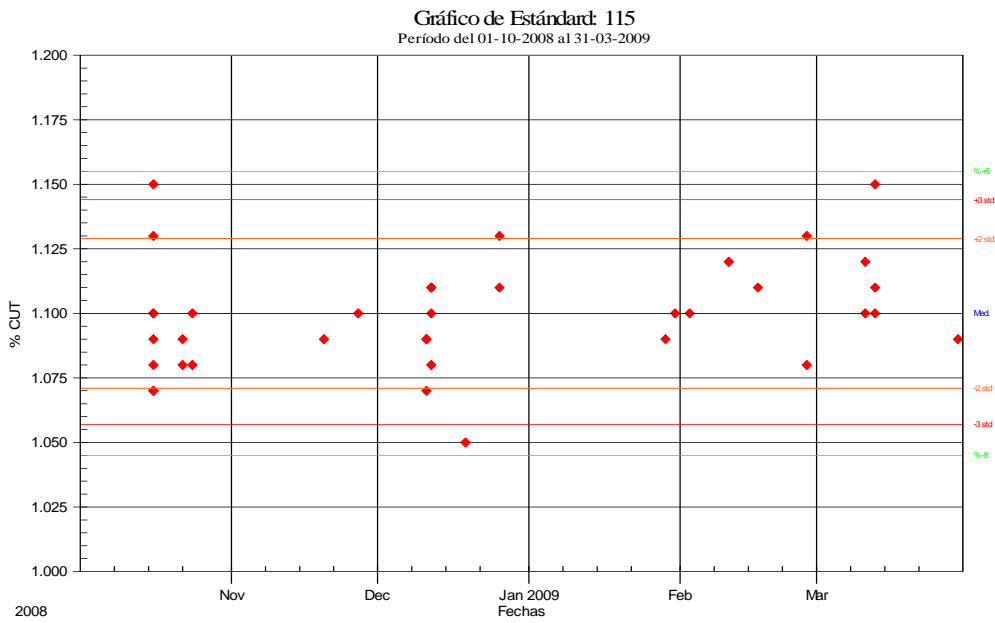


Figura 3.11: Estándares 115 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora

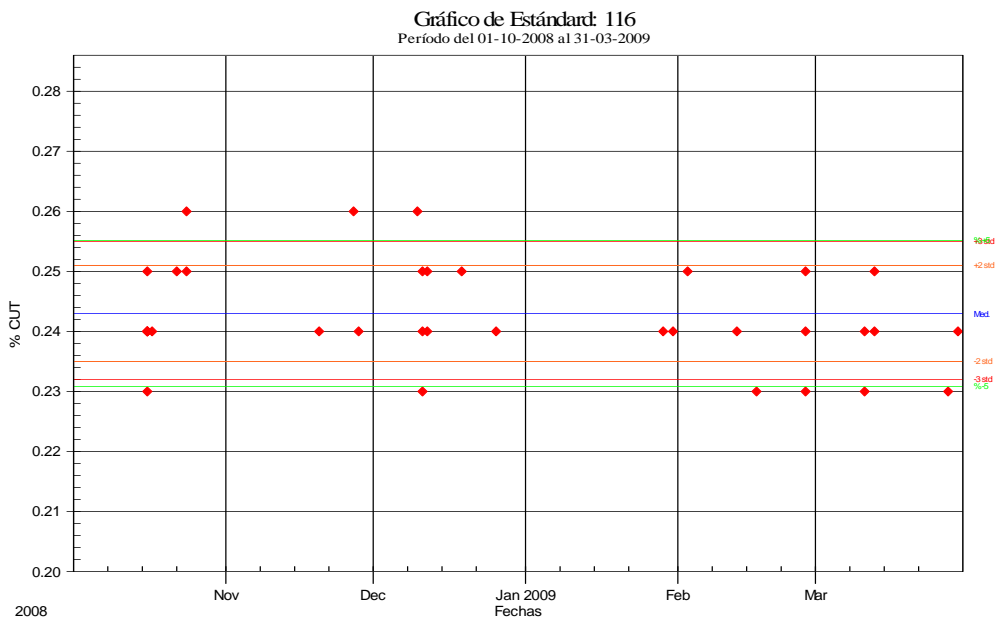


Figura 3.12: Estándares 116 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora

Gráfico de Estándar: 117
 Período del 01-10-2008 al 31-03-2009

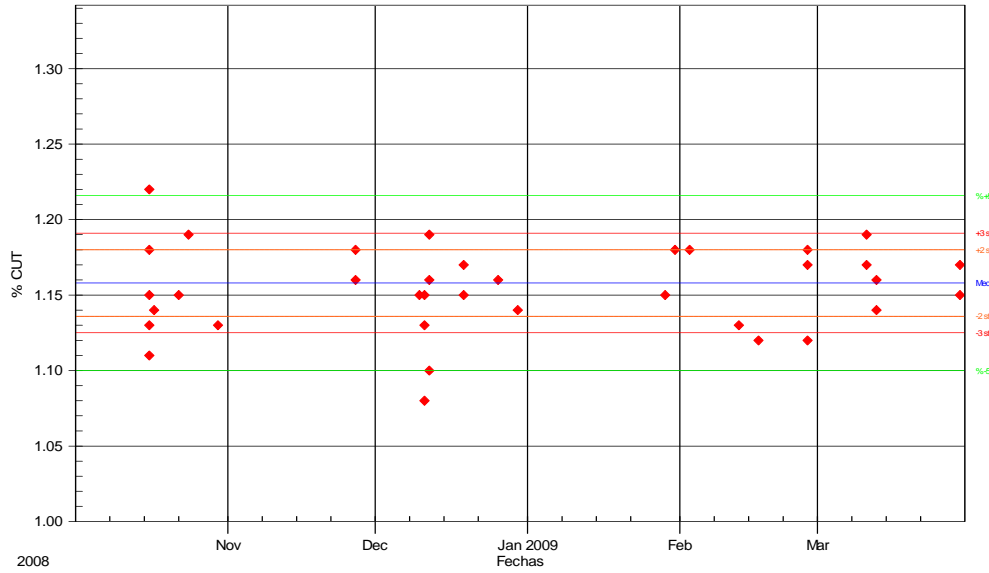


Figura 3.13: Estándares 117 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora

Gráfico de Estándar: 118
 Período del 01-10-2008 al 31-03-2009

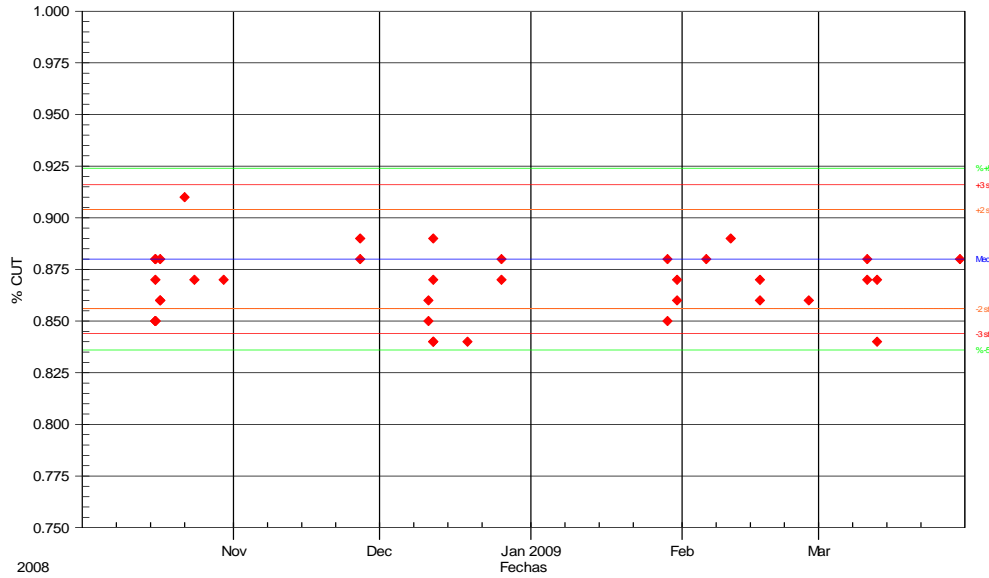


Figura 3.14: Estándares 118 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora

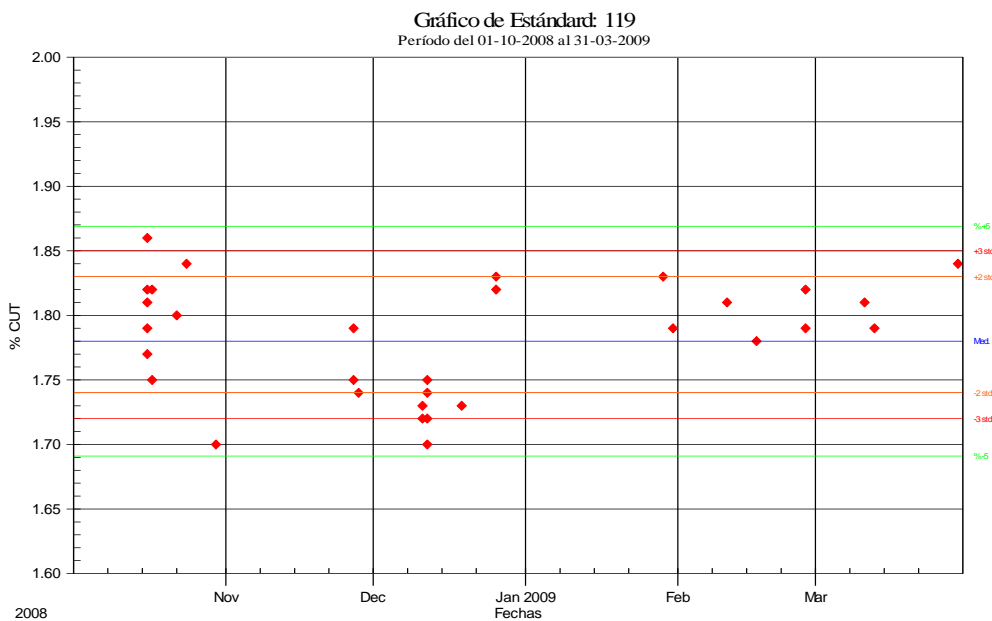


Figura 3.15: Estándares 119 intercalados en los sondajes nuevos del cuerpo mineralizado Nora

3.5 Resultados de la revisión del Qa/Qc de los Sondajes nuevos

De la revisión de muestras blancas, duplicados gruesos, duplicados pulpas y estándares se puede establecer que no hay razones para no utilizar las muestras perforadas en el año 2008 y 2009 para la estimación del cuerpo mineralizado Nora en Bárbara Central.

Los resultados obtenidos en esta campaña serán adjuntados a la información histórica que ha sido perforada y validada previamente, en este cuerpo mineralizado. Con toda esta información se realizarán los siguientes pasos de este trabajo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

Luego que se ha verificado la consistencia de los sondajes perforados durante el año 2008 y 2009 en el cuerpo mineralizado Nora se agregan estos datos a la base de sondajes histórica en el sector con el fin de contar con la información mas acabada de este cuerpo para realizar el estudio.

4.1 Trabajo estadístico con la base de sondajes disponible

Las muestras de sondajes realizadas en el depósito Mantos Blancos han sido perforadas a distintos soportes durante la explotación del yacimiento (1.5m, 2m, 3m y 6m). Para que cada muestra tenga el mismo peso estadístico se compositan a un soporte de 6m, que es mínimo común múltiplo de todos los largos de muestreo. La estrategia de composición separa las muestras con litología dique, debido a que estos son estériles y no tienen relación temporal con las rocas mineralizadas y, por lo tanto, con el evento mineralizador (Ver Capítulo #2).

La figura 4.1 muestra el histograma de la variable CuT(%) para los compósitos en el cuerpo mineralizado Nora. Este gráfico muestra una distribución que se asemeja a una log-normal, típica distribución para metales base. Por otro lado, aparecen en la esquina superior derecha de la figura las estadísticas básicas para la base de datos a estudiar. Se cuenta con 44656 datos disponibles, con un valor promedio de 0.81. El valor promedio del área es bastante alto, lo que demuestra que es uno de los sectores mas ricos del yacimiento. Sin embargo, la varianza también es bastante alta siendo la diferencia entre la ley mínima y máxima 14.76%.

La distribución estadística de la mineralización de CuT(%) permite señalar que se puede usar geoestadística para analizar y modelar las leyes de CuT(%) en el cuerpo mineralizado objeto del estudio. En primer lugar se realizará un kriging de indicadores para definir el volumen mineralizado, usando una probabilidad de 50% para este indicador. Una vez definido este volumen se estimará la mineralización presente en cada bloque estimado haciendo un kriging ordinario (de media desconocida), con el cual se

definirán las zonas en donde se realizará la estimación de la ley de CuT(%) mediante un kriging ordinario. Se utilizará el kriging para el proceso de estimación debido a que es un estimador insesgado y minimiza la varianza de esta estimación.

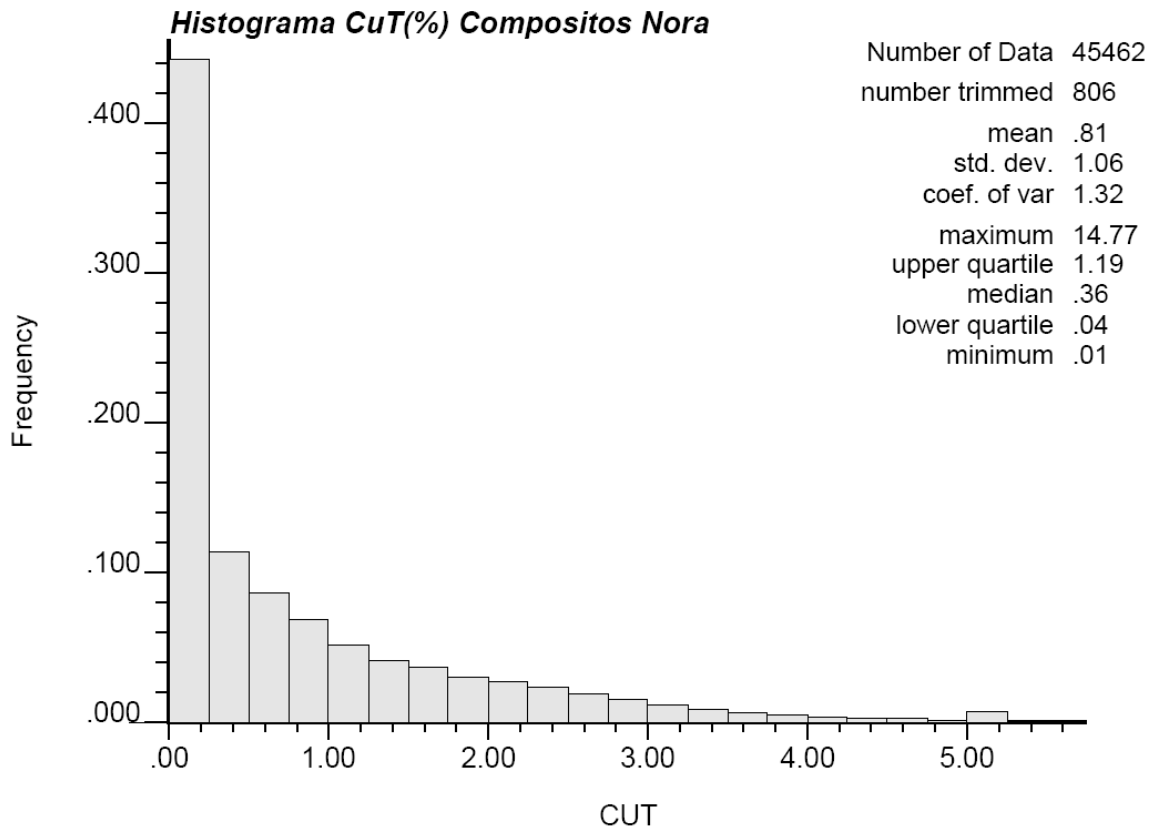


Figura 4.1: Histograma de la variable CuT(%) de los compósitos presentes en el cuerpo mineralizado Nora.

4.2 Definición del volumen mineralizado: Kriging de indicadores

Para definir el volumen del cuerpo mineralizado utilizamos una herramienta geoestadística denominada kriging de indicadores. El kriging de indicadores consiste en la ejecución de un kriging de una variable que tiene solo dos valores, 0 o 1 dependiendo de si se cumple o no cierta condición. El hecho de hacer el análisis en un espacio entre 0 y 1 hace que el comportamiento del resultado sea como una distribución de probabilidades y se observan mejores continuidades al hacer el análisis variográfico de la variable generada.

En el caso de Mantos Blancos, la ley de corte marginal de ambos procesos productivos es 0.18%CuS para la planta de óxidos y 0.20%CuI para la planta de sulfuros. Por lo tanto, para definir el volumen mineralizado marcamos los sondajes creando la variable IND2 de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{IND2}=0 \quad \text{si CuT}(\%)<0.2$$

$$\text{IND2}=1 \quad \text{si CuT}(\%) \geq 0.2$$

Para realizar el kriging de indicadores se hace el análisis variográfico de la variable IND2. Los variogramas direccionales establecidos para esta variable se encuentran en el Anexo#1 de este informe.

Con las direcciones preferenciales establecidas en el análisis variográfico se realiza el kriging de la variable IND2. En el Anexo#1 se encuentra el plan de kriging realizado. El resultado del kriging de indicadores se puede definir como una distribución de probabilidades, ya que cada bloque estimado tiene un valor entre 0 y 1. De acuerdo a los resultados históricos en Mantos Blancos y a las reconciliaciones de recursos, se define como volumen mineralizado el que cumple con una probabilidad mayor a 50% ($\text{IND2} \geq 0.5$). Las figuras 4.2 y 4.3 muestran el volumen mineralizado en los bancos 600 y 660 respectivamente.

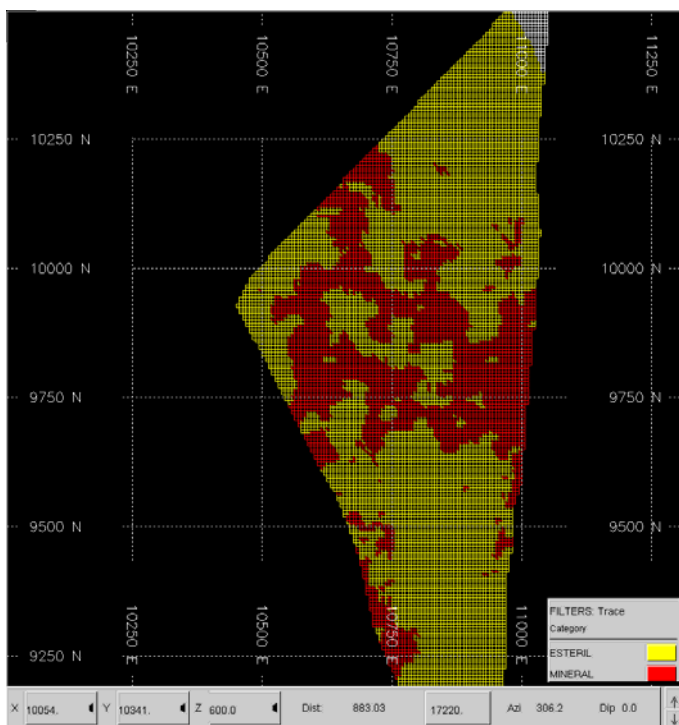


Figura 4.2: Definición del volumen mineralizado en el cuerpo mineralizado Nora, banco 600

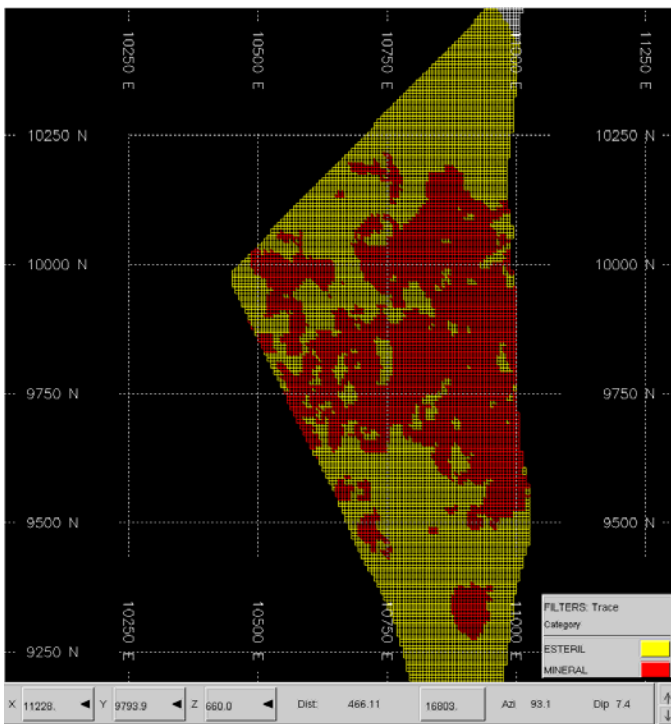


Figura 4.3: Definición del volumen mineralizado en el cuerpo mineralizado Nora, banco 660

4.3 Kriging de mineralización de Cobre presente en el yacimiento

Los sondajes del yacimiento son mapeados, reconociendo la litología, alteración y mineralización, de acuerdo a lo que ha sido expuesto en el capítulo 2. Las especies sulfuradas de Cobre que se pueden reconocer en el depósito son calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), digenita (Cu_9S_5), calcosina (Cu_2S) y covelina (CuS). Las figuras 4.4 a 4.8 muestran fotografías en donde coexisten las especies minerales señaladas anteriormente, junto a especies de hierro como pirita y hematita (especularita). En estas fotografías se puede observar la coexistencia de calcosina-digenita, bornita y covelina. La presencia de calcopirita (como especie predominante) en el cuerpo Nora, y de acuerdo a la información de los sondajes disponibles, ocurre en la zona inferior de este cuerpo y se presenta ocasionalmente con las especies señaladas anteriormente, tal como se puede apreciar en la Figura 4.8. Por otro lado, este cuerpo en particular, presenta pirita ocasionalmente en los sectores profundos de la mineralización. En general, esta se encuentra asociada a specularita, tal como se puede apreciar en las figuras 4.4, 4.6 y 4.7

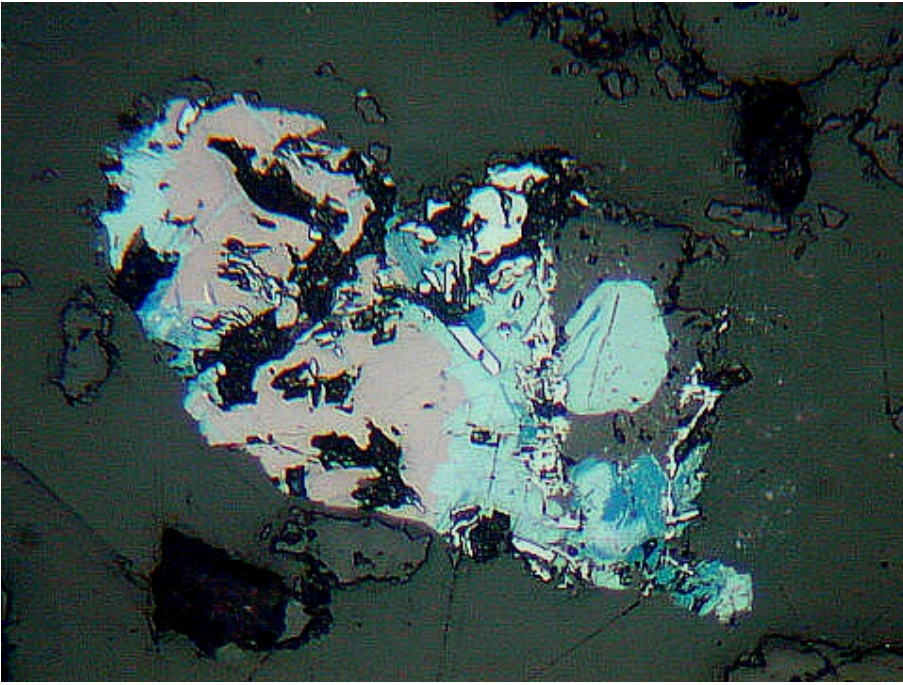


Figura 4.4: Bornita, covelina lamelar intersticial y digenita entre no metálicos y hematita fina.

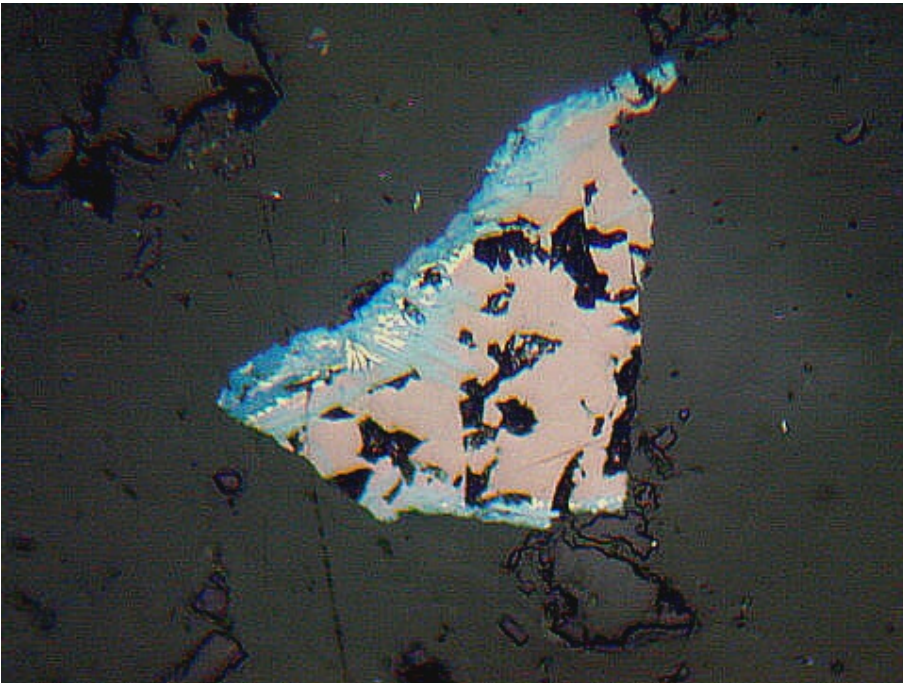


Figura 4.5: Bornita y calcopirita reemplazada por digenita y covelina lamelar fina.

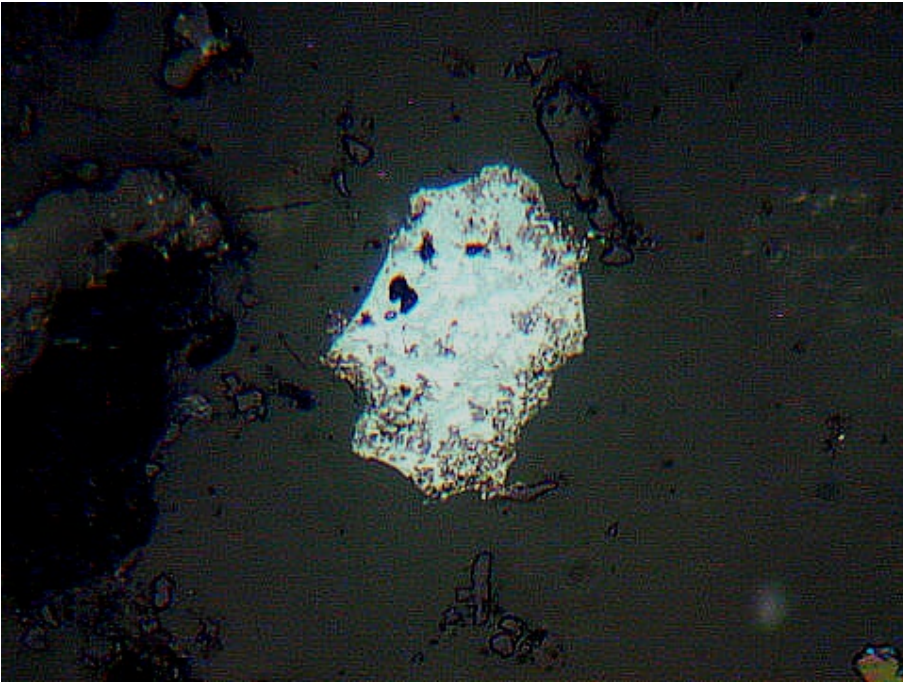


Figura 4.6 Calcosina con abundante cristalización fina de hematita.

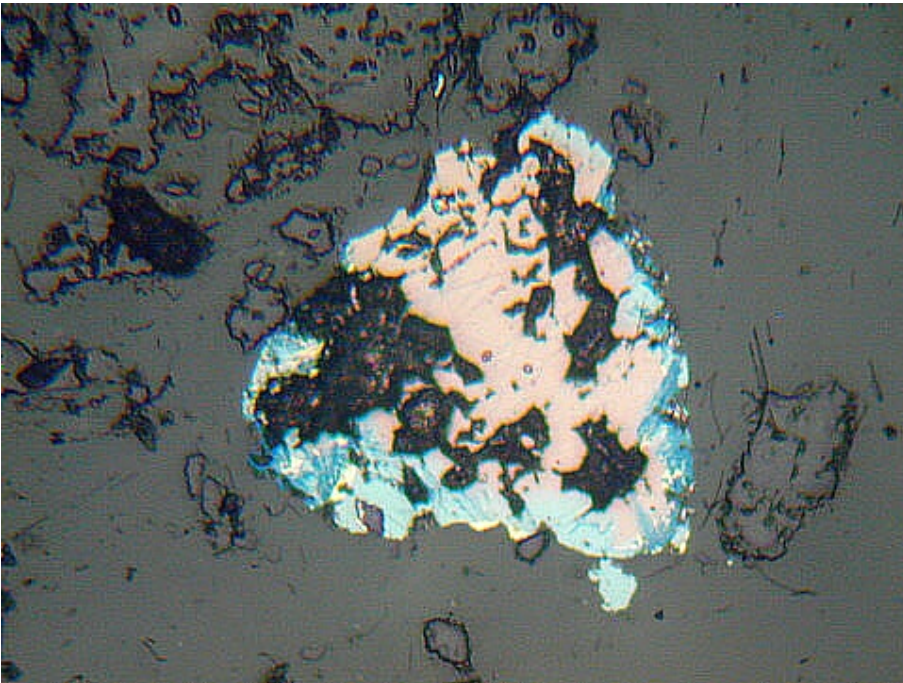


Figura 4.7 Digenita y covelina lamelar fina. Cristales de hematita con relieve mas alto y ganga no metálica.

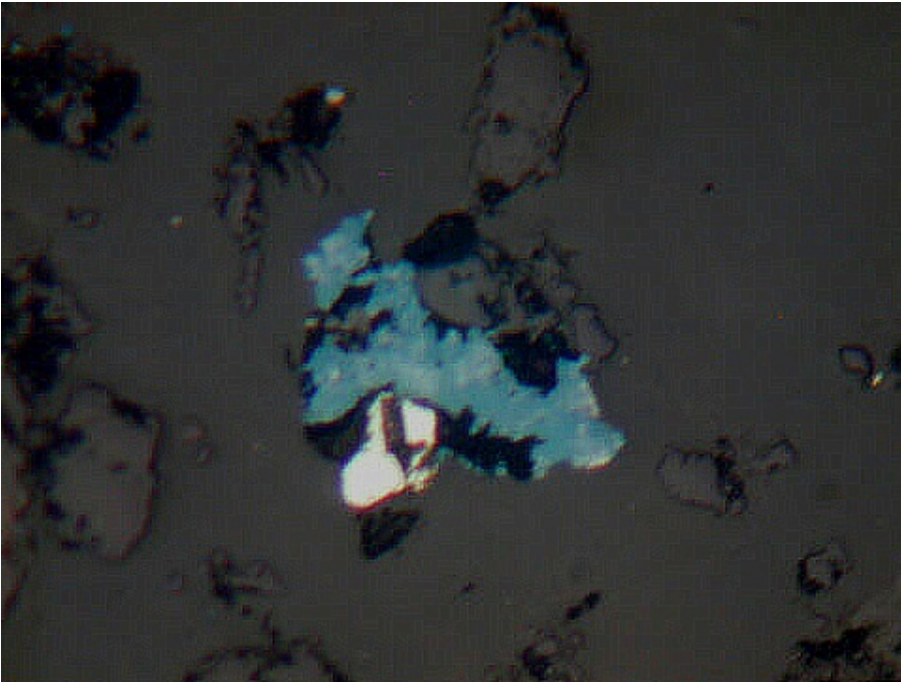


Figura 4.8 Covelina lamelar y pirita, asociadas a no metalicos.

Se ha intentado realizar el análisis variográfico para ejecutar la estimación de la mineralogía en el cuerpo Nora. De este modo, no ha sido posible establecer direcciones preferenciales para las especies mineralizadas presentes en Nora. Por lo anteriormente descrito se ha procedido a krigear la mineralización con un variograma omnidireccional, y un plan de kriging que se encuentran detallados en el Anexo #2 de este trabajo. Estos parámetros fueron los utilizados para realizar la estimación oficial de mineralogía en Bárbara Central y sus validaciones respectivas se encuentran incluidas en el Anexo #2.

Luego de la realización del kriging para las variables presentes en el cuerpo Nora, y de acuerdo a las asociaciones mineralógicas observadas en los sondajes, se separan los bloques en tres zonas de acuerdo a las siguientes asociaciones: Predominancia de la asociación calcosina-digenita-covelina-bornita (cc-cv-bo), predominancia de la zona calcopirita-pirita (cpy-py) y una zona donde ambas tienen las mismas concentraciones.

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran plantas en las cuales se representa la distribución de la mineralización en los bancos 600 y 660, utilizando las zonas señaladas en el párrafo anterior. Al revisar visualmente el modelo separado por zonas mineralógicas, se detecta la baja cantidad de bloques que presentan igualdad de preponderancia de cc-bo-cv y de cpy-py. Por otro lado, la presencia de pirita es muy baja en los bloques estimados y ocurre ocasionalmente en las zonas profundas del cuerpo mineralizado.

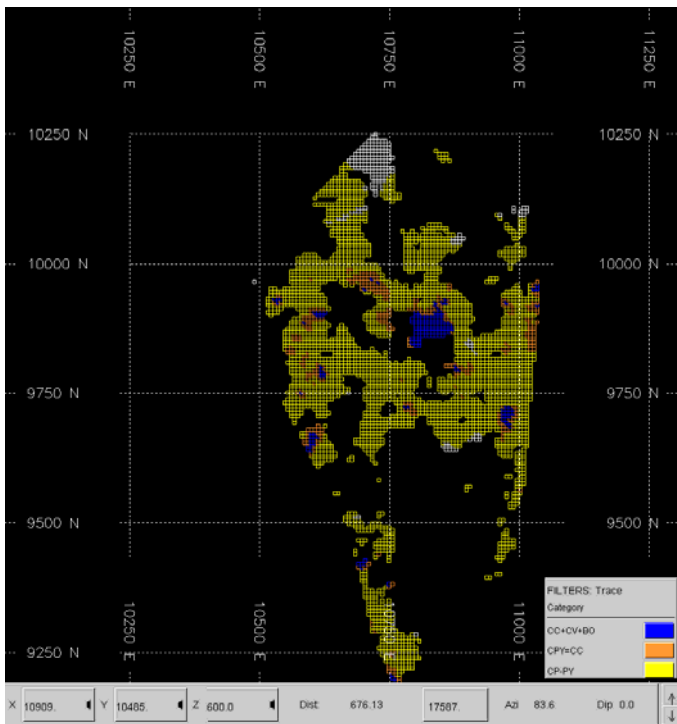


Figura 4.9: Distribución de la mineralización, de acuerdo a riqueza de especies minerales en cuerpo mineralizado Nora, banco 600

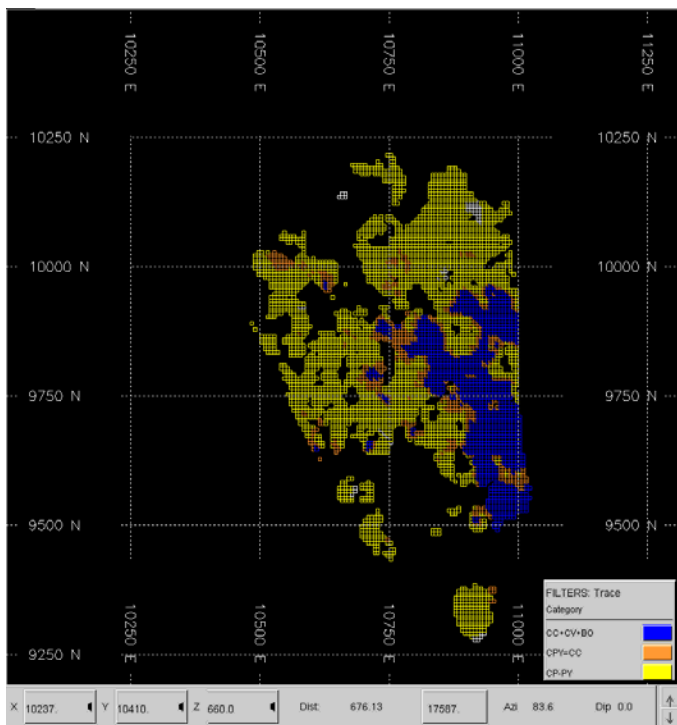


Figura 4.10: Distribución de la mineralización, de acuerdo a riqueza de especies minerales en cuerpo mineralizado Nora, banco 660

Con los antecedentes indicados en el párrafo anterior, se definen las zonas minerales para la realización del kriging de leyes de cobre total de la siguiente manera:

- Zona 1 (cc-bo-cv): Zona en donde predomina la asociación calcosina-digenita, bornita, covelina. Esto también incluye los bloques donde predomina alguna de estas especies sobre las otras de la asociación.
- Zona 2 (cpy-(py)): Zona donde predomina la calcopirita y ocurre ocasionalmente pirita. En esta zona se incluyen los bloques en donde las concentraciones de ambas especies son similares.

De este modo, se realizará el kriging de leyes de cobre total separando los volúmenes mineralizados de acuerdo a las zonas definidas anteriormente

4.4 Kriging de CuT(%).

En el depósito Mantos Blancos, el modelo de recursos minerales se realiza utilizando el volumen mineralizado establecido por el indicador IND2, en donde se realiza la estimación de las leyes de mineral. Esta estimación no toma en cuenta la distribución de la mineralización presente en el depósito y su influencia en las leyes de cobre observadas. En esta sección se realizará una estimación de las leyes de CuT(%) utilizando las zonas minerales establecidas en la sección anterior.

Para la estimación de las leyes de cobre total en las dos zonas definidas, se procede a separar la base de datos en dos. Se estimarán las leyes de los bloques con las muestras incluidas en ellos. Para la estimación de las leyes en ambas zona se utilizarán los variogramas generados en la elaboración del modelo oficial de Mantos Blancos para este cuerpo mineralizado. Estos se encuentran en el Anexo #4, junto al plan de kriging utilizado en esta estimación.

Los resultados de la estimación de leyes de cobre total se pueden observar en las Figuras 4.11 y 4.12, para los bancos 600 y 660. En el capítulo siguiente se validará la estimación realizada y se

reconciliará el modelo generado con zonas tronadas y se comparará con el modelo oficial de Anglo American Chile para Mantos Blancos en la zona de estudio.

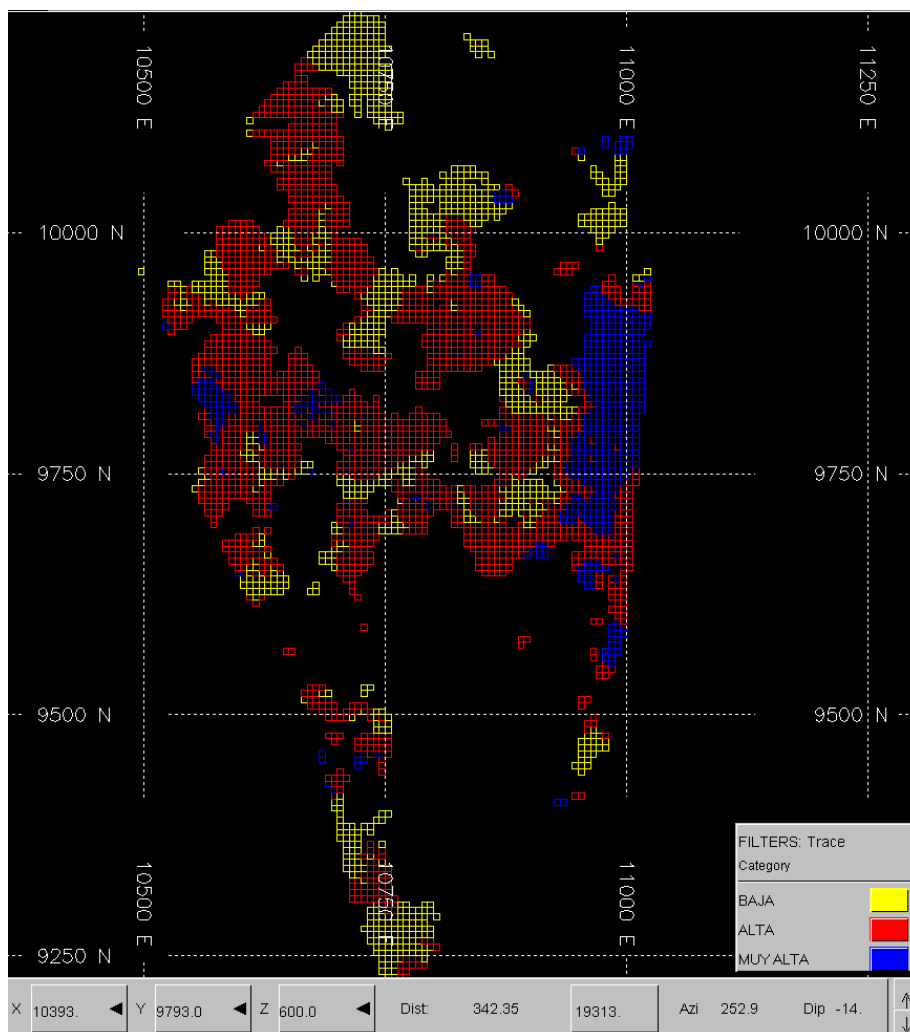


Figura 4.11: Mapa de distribución de las leyes de Cobre Total en el cuerpo mineralizado Nora, banco 600

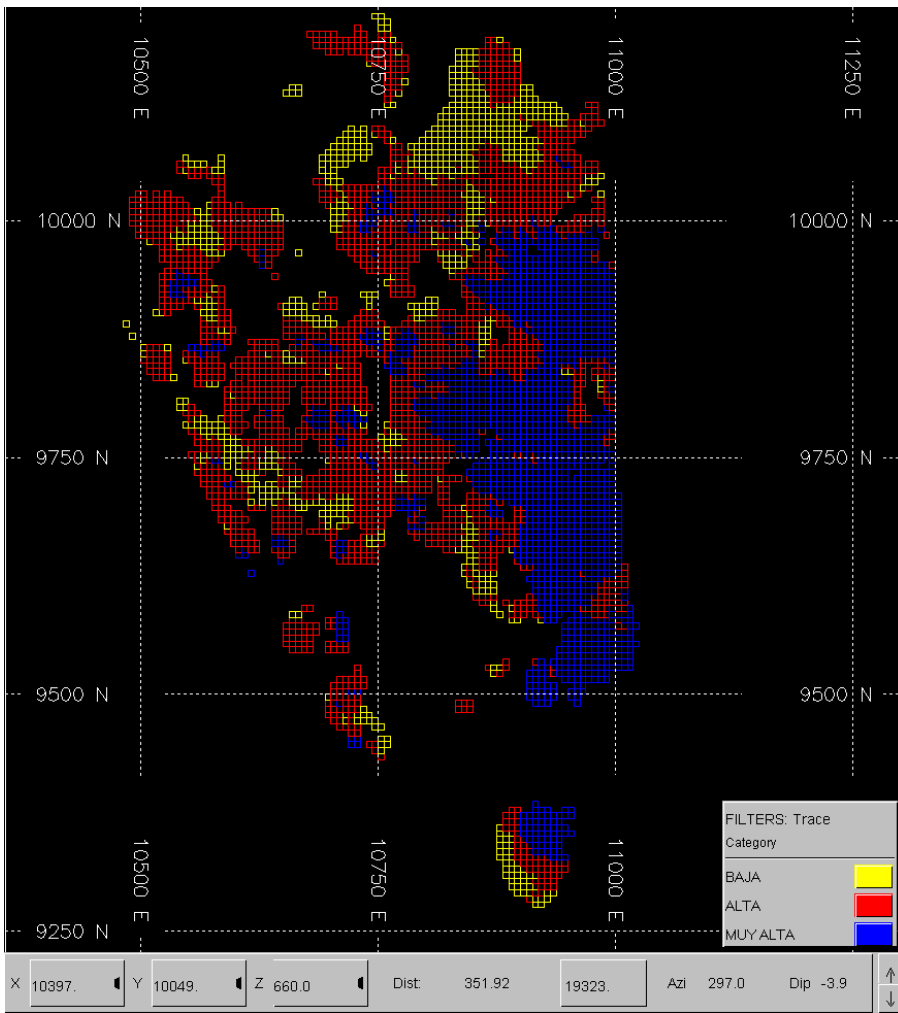


Figura 4.12: Mapa de distribución de las leyes de Cobre Total en el cuerpo mineralizado Nora, banco 660

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para poder analizar los resultados obtenidos se requiere comparar el modelo generado utilizando los volúmenes definidos por la distribución de la mineralización y el modelo oficial, para luego comparar ambos modelos con el kriging de los pozos de tronadura en un área anteriormente explotada del cuerpo mineralizado Nora. Sin embargo, y previo a lo anterior, se debe verificar la calidad de la estimación realizada de acuerdo a las muestras con las que fue realizada la estimación.

5.1 Validación de la estimación de CuT(%) realizada

La estimación realizada mediante kriging ordinario se debe validar con las muestras desclusterizadas, es decir, ponderada por los pesos. La condición de insesgo de las ecuaciones de kriging señalan que las medias deben ser iguales, tanto para los bloques como para las muestras desclusterizadas. La Tabla 5.1 muestra que esta condición es cumplida en esta estimación para ambas zonas de mineralización establecidas. Por otro lado, la gran diferencia entre los promedios para ambas zonas mineralizadas muestra la dependencia de la ley de cobre en este cuerpo mineralizado de la asociación mineralógica.

NORA	CUT	
	BLOQUES	MUESTRAS
ZONA 1: CC-BO-CV	1.7041	1.7041
ZONA2: CPY -(PY)	0.7465	0.7465

Tabla 5.1 Comparación bloques – muestras desclusterizadas para ambas zonas de estimación

Para revisar el comportamiento de la estimación en el cuerpo mineralizado Nora se efectuará un barrido aleatorio en el volumen definido por los bloques de cada zona mineral y se comparará su promedio de leyes con el promedio de las muestras desclusterizadas en el mismo volumen. Esta revisión se denomina "Validación del bloque móvil".

Las Figura 5.1 y 5.2 muestran las validaciones por bloque móvil para las zonas cc-bo-cv y cpy-(py), respectivamente. Los coeficientes de correlación lineal para ambas zonas son bastante buenos ($R_{cc-bo-cv}=0.97$ y $R_{cpy-(py)}=0.96$), lo que señala que la estimación de los bloques muestra relación con las muestras que generaron su estimación.

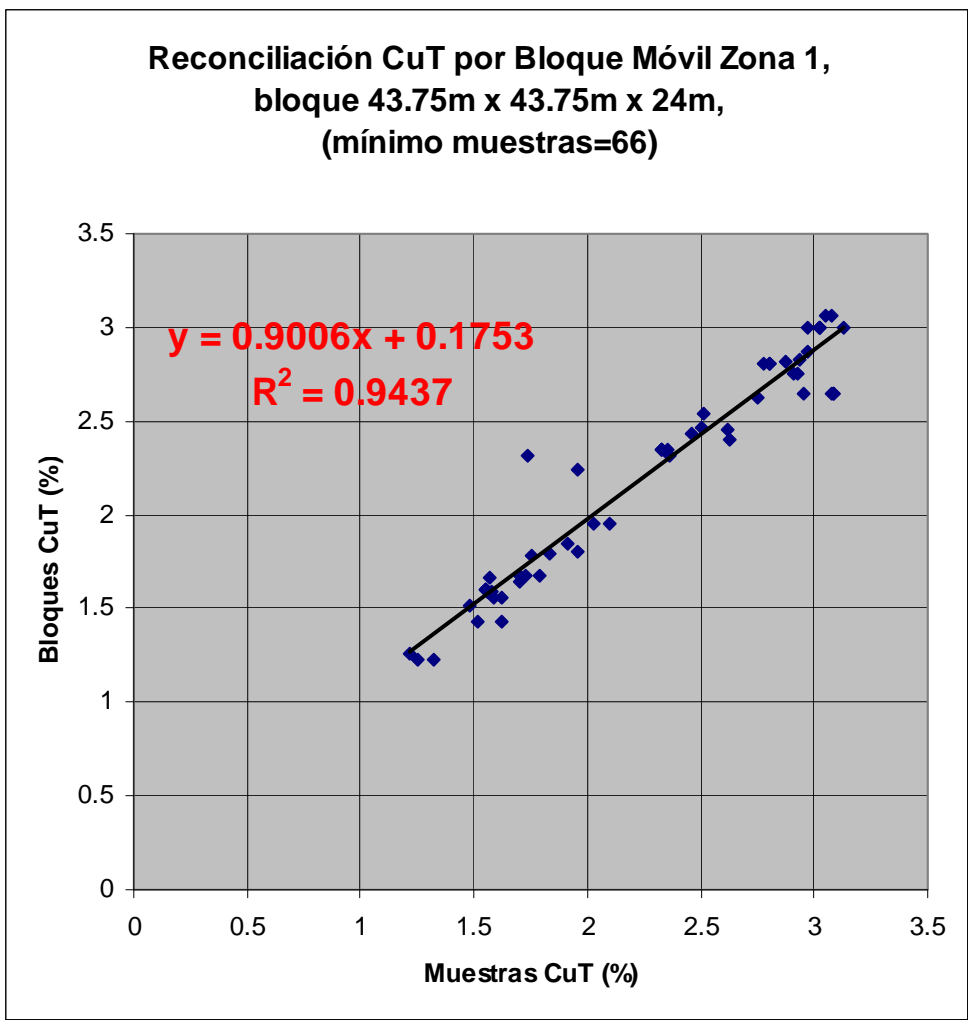


Figura 5.1 Reconciliación Bloques - Muestras desclusterizadas mediante bloque móvil para la Zona cc-bo-cv (Zona 1)

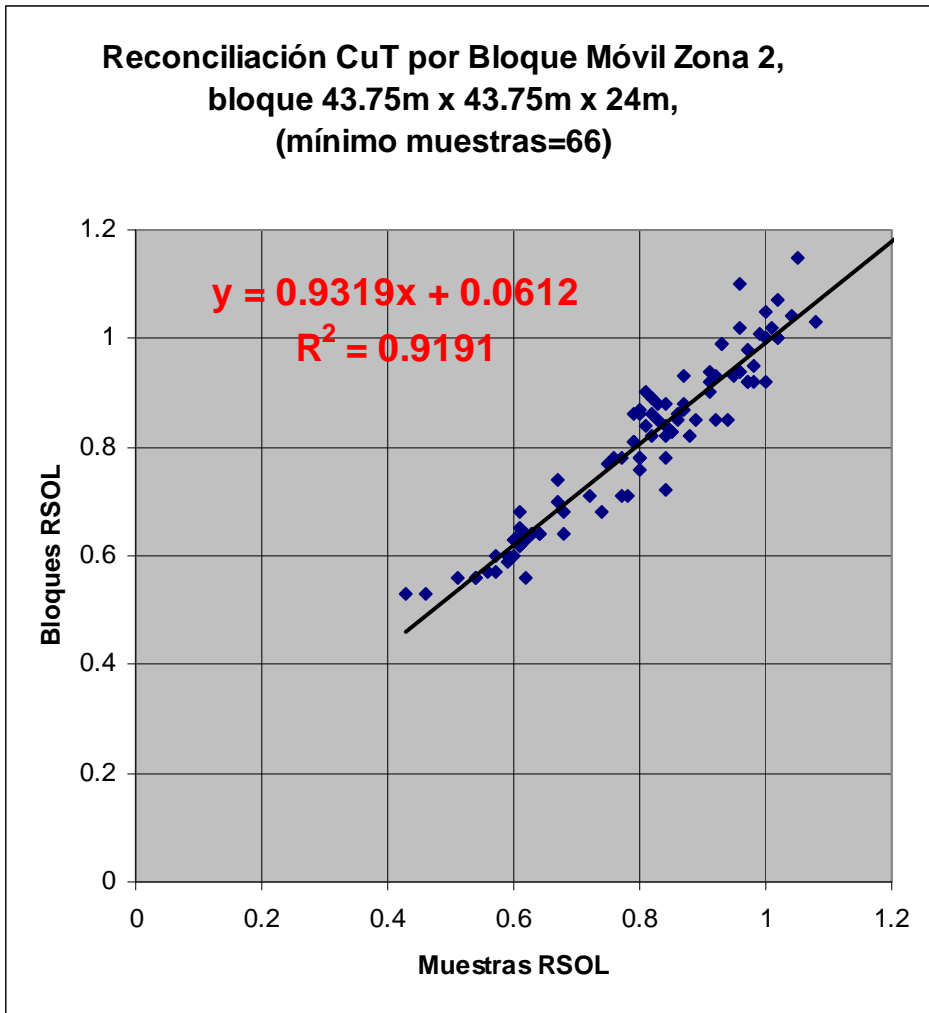


Figura 5.2 Reconciliación Bloques - Muestras desclusterizadas mediante bloque móvil para la Zona cpy-(py) (Zona 2)

Para verificar si la estimación tiene problemas en ciertas zonas del cuerpo mineralizado y no se puede detectar mediante una comparación general, se realiza un barrido por franjas, en donde se compara el promedio de las muestras desclusterizadas y los bloques, de modo de detectar posibles problemas en algunas áreas restringidas del cuerpo mineralizado, ya que en la comparación general no se detectan problemas con la estimación.

Las figuras 5.3 a 5.8 muestran las comparaciones señaladas en el párrafo anterior en las coordenadas este, norte y en la vertical. Esta comparación se muestras para ambas zonas mineralizadas.

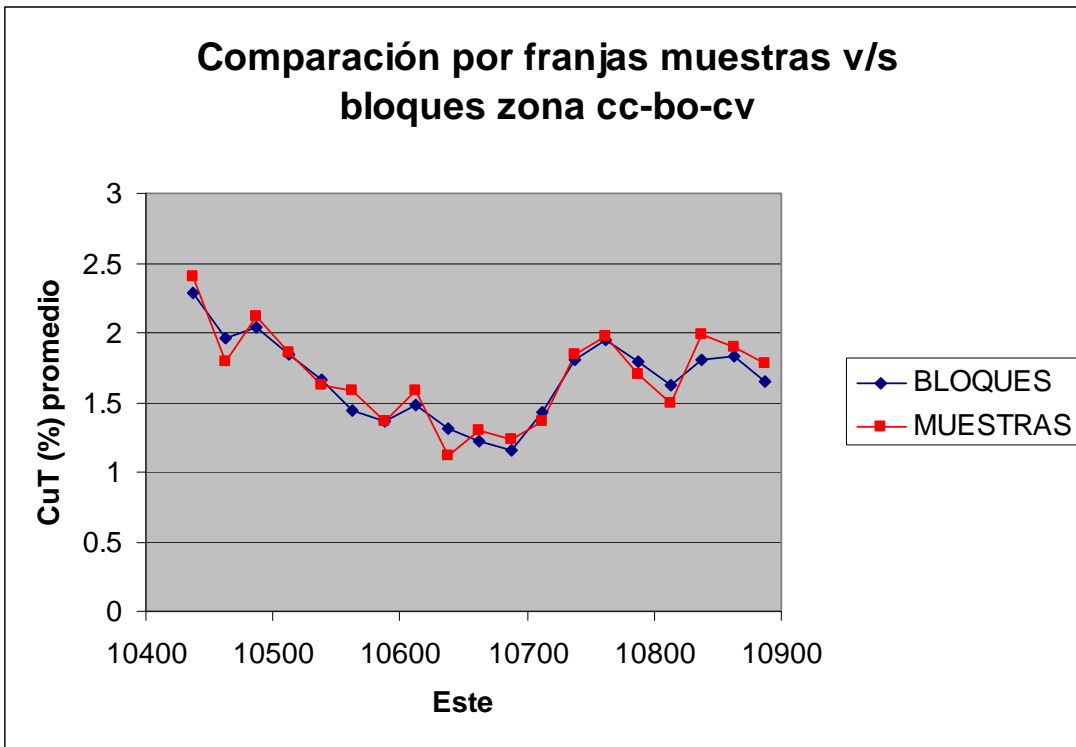


Figura 5.3 Reconciliación por franjas Este entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.

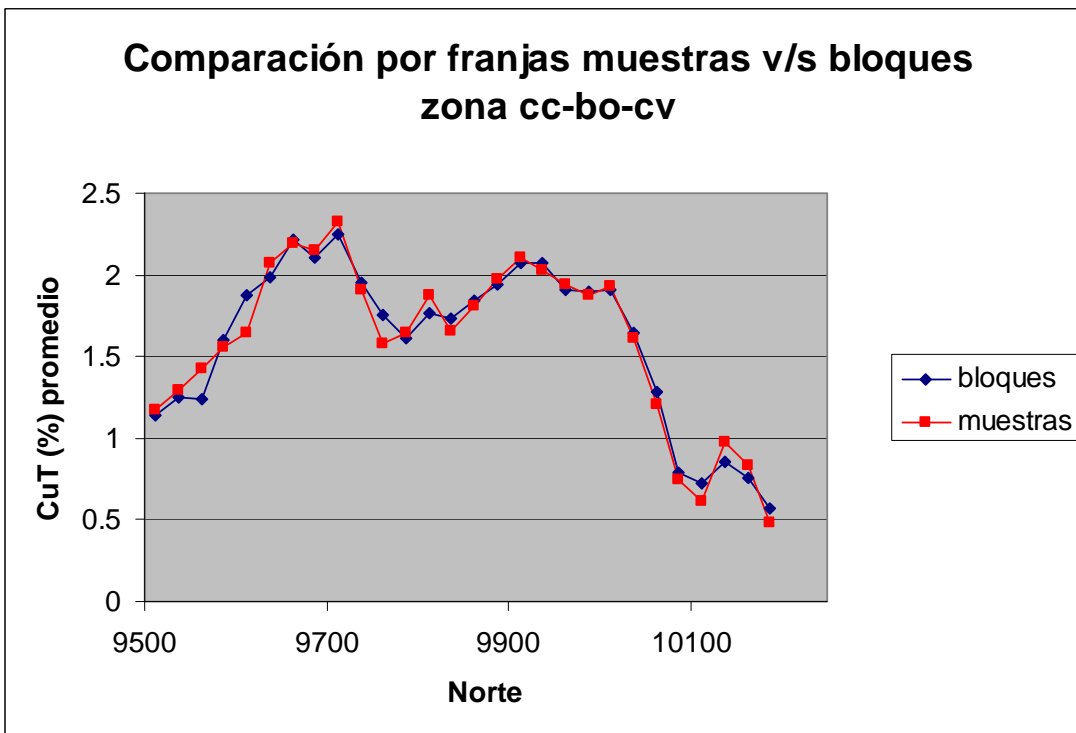


Figura 5.4 Reconciliación por franjas Norte entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.

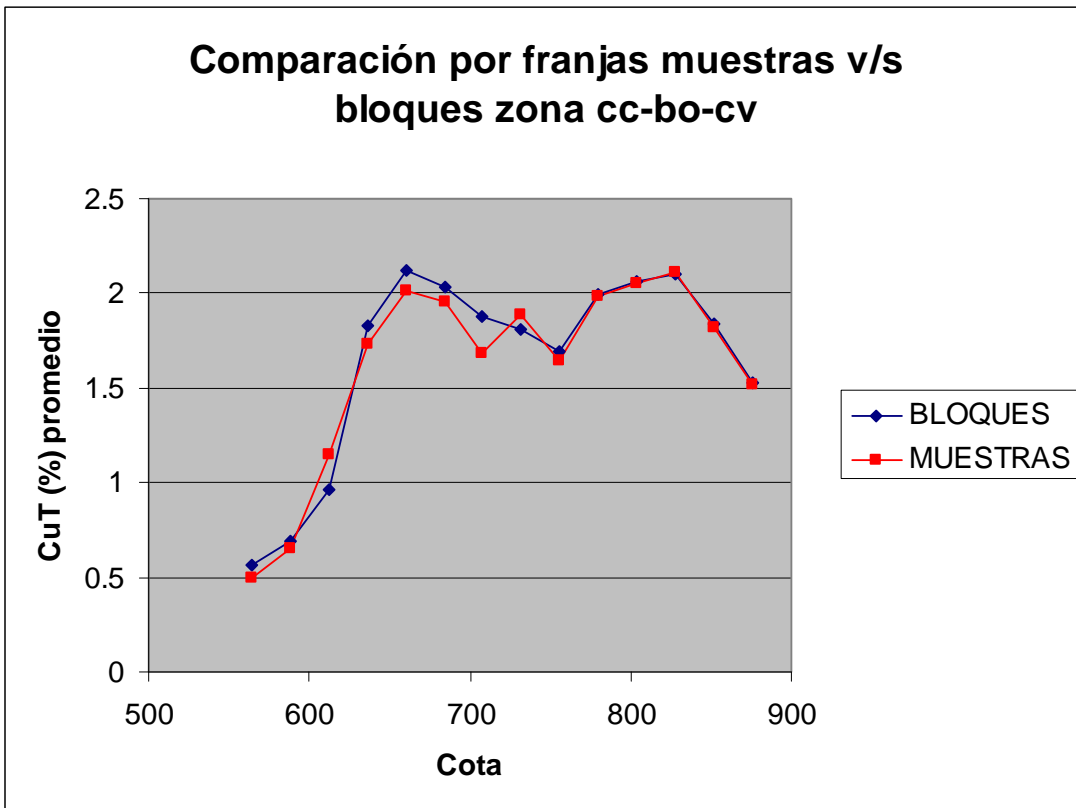


Figura 5.5 Reconciliación por franjas verticales entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cc-bo-cv.

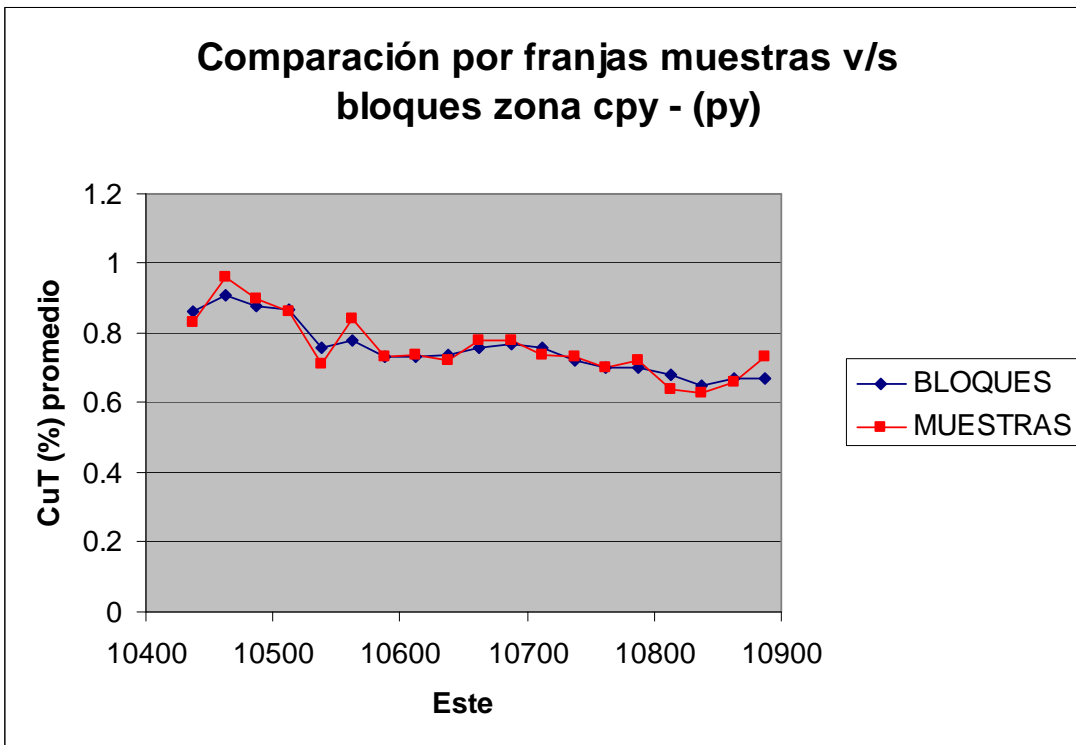


Figura 5.6 Reconciliación por franjas Este entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy - (py)

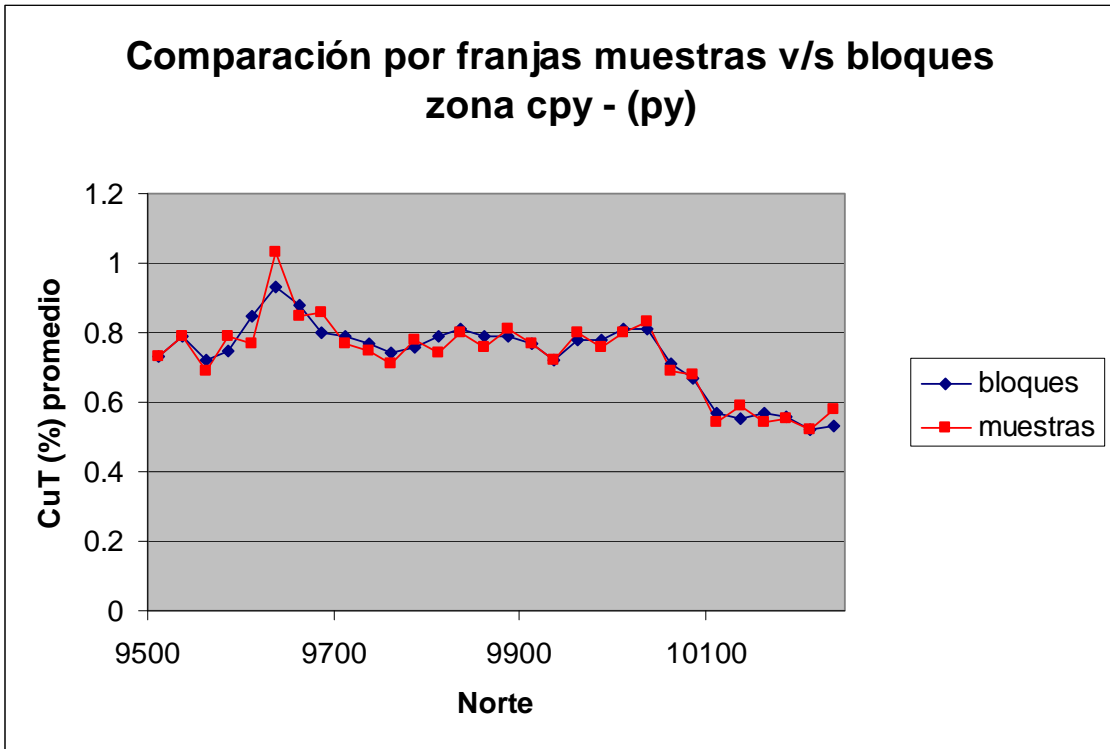


Figura 5.7 Reconciliación por franjas entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy-(py).

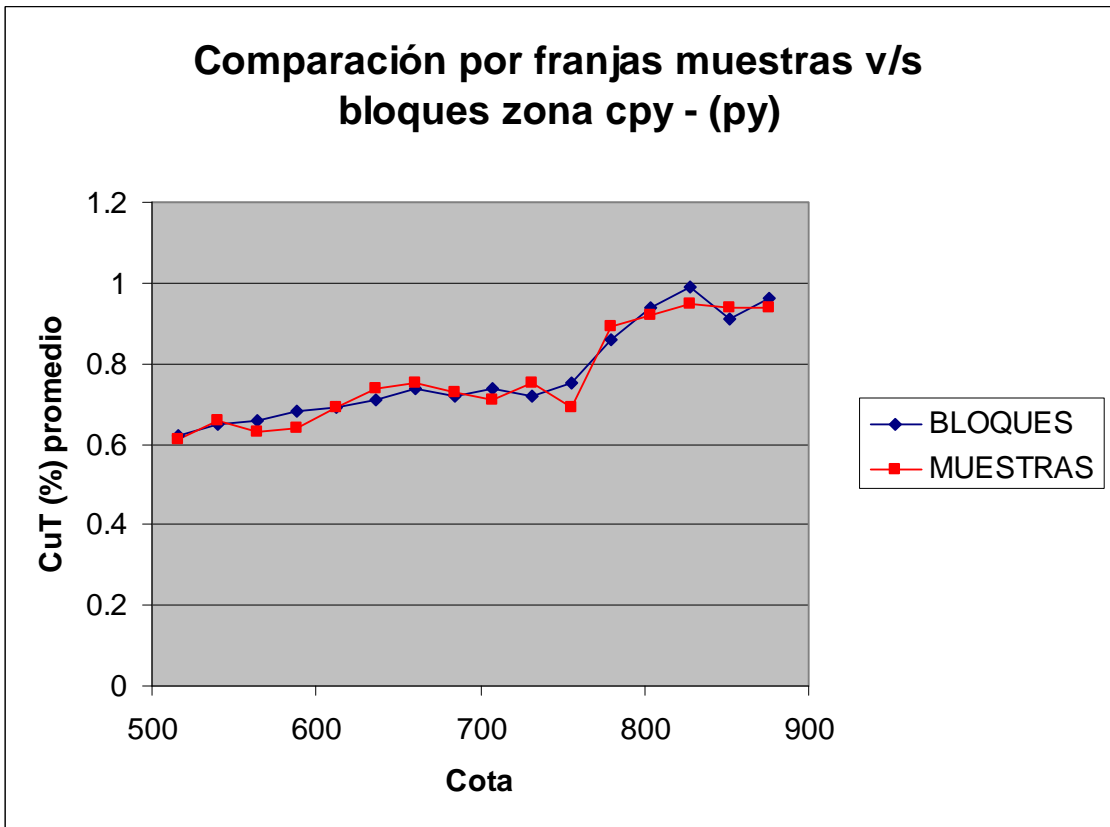


Figura 5.8 Reconciliación por franjas verticales entre Bloques - Muestras desclusterizadas para la Zona cpy-(py)

De la inspección visual de las gráficas por franjas se puede observar que las leyes de los bloques se encuentran mas suavizadas que las leyes de las muestras. Este efecto es típico de la estimación mediante kriging. Por otro lado se observa un aplanamiento mayor en la dirección vertical, por lo que se sugiere para mejorar la estimación acortar los radios de búsqueda en esta dirección, con el fin de disminuir la influencia de las muestras en bancos contiguos que provocan el aplanamiento mayor. Este efecto es particularmente notorio en la Figura 5.5.

Para comparar los resultados obtenidos en esta estimación se comparará con el modelo oficial en la zona de Nora, y ambas estimaciones se chequearán con el kriging de los pozos de tronadura en las áreas en producción de este cuerpo mineralizado entre los años 2005 y 2009.

5.2 Comparación de la estimación realizada con el modelo oficial y las áreas tronadas

Para calibrar de mejor manera la calidad de la estimación realizada se comparará con el modelo oficial en el área estimada y el kriging de los pozos de tronadura en las zonas explotadas, entre los años 2005 y 2009. La malla de perforación de los pozos de tronadura es 8x8, mucho mas densa que la utilizada para la perforación de sondajes (aproximadamente 25x25), por lo que esta cubicación será tomada como referencia.

La tabla 5.2 muestra los tonelajes señalados por cada uno de los modelos utilizados en esta comparación.

	MODELO OFICIAL			MODELO TRONADO			MODELO NORA			Error M. Oficial		Error M. Nora	
	Tonelaje	Ley	Fino	Tonelaje	Ley	Fino	Tonelaje	Ley	Fino	Error Ton	Error Fino	Error Ton	Error Fino
2005	972244	0.92	8897.3	1191298	0.96	11455.6	1055321	0.86	9032.0	18%	22%	11%	21%
2006	572458	1.51	8640.6	560819	1.40	7832.0	589791	1.45	8562.8	-2%	-10%	-5%	-9%
2007	1060668	1.28	13532.2	1081490	1.06	11500.6	1087481	1.19	12903.5	2%	-18%	-1%	-12%
2008	207228	1.14	2367.7	201476	1.11	2239.2	202864	1.08	2190.1	-3%	-6%	-1%	2%
2009	1735479	1.15	19873.1	1650622	1.04	17093.9	1795363	1.10	19766.6	-5%	-16%	-9%	-16%
Total	4548077	1.17	53310.9	4685705	1.07	50121.4	4730819	1.11	52454.9	3%	-6%	-1%	-5%

Tabla 5.2 Reconciliación modelo de cuerpo Mineralizado Nora en zonas tronadas y comparación con Modelo Oficial.

Los resultados en términos de tonelaje se encuentran bastante ajustados a lo que fue tronado efectivamente en los años estudiados. En términos de tonelaje el modelo de Nora está mas ajustado que el modelo oficial, sobrestimando levemente el tonelaje (1%). En términos de fino se observa una diferencia

mayor al 10% en varios períodos, tanto para el modelo oficial como para el modelo del cuerpo Nora. Sin embargo, la magnitud de los errores para el modelo de este trabajo son menores, lo que también se refleja en el total. Este problema de subestimación de ley para los pozos de tronadura está siendo analizado en Mantos Blancos, debido a que se ha reflejado en toda el área de Bárbara Central. Desgraciadamente como el cuerpo Nora se comenzó a explotar en el pasado de manera subterránea, existe interacción de estas labores subterráneas con la explotación actual (rajo abierto). Esta interacción provoca dilución de los pozos de tronadura por los rellenos de estas cavidades, lo que altera de alguna manera las leyes observadas en estos pozos.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se ha tratado de probar la relación existente entre la mineralogía de cobre y la ley cobre, con el fin de separar la estimación y mejorar los resultados del modelamiento realizado actualmente.

6.1 Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos se pueden establecer las siguientes conclusiones de este trabajo:

- Los sondeos realizados en el cuerpo mineralizado Nora durante el período comprendido entre Octubre del 2008 y Marzo del 2009 cumplen con los requisitos de aseguramiento y control de Calidad (Qa/Qc) establecidos por Anglo American Chile para el monitoreo de la información nueva que se genera.
- Las leyes de Cobre total de la base de sondeos en el cuerpo mineralizado Nora muestran una distribución que se asemeja a una log-normal, típica de metales base.
- La mineralización presente en el cuerpo mineralizado Nora no presenta direcciones preferenciales de acuerdo al análisis variográfico.
- De acuerdo a la observación de los sondeos en el cuerpo mineralizado Nora se pudo establecer dos zonas mineralógicas para la estimación de la mineralización:
 - Zona 1 (cc-bo-cv): Zona en donde predomina la asociación calcosina-digenita, bornita, covelina. Esto también incluye los bloques donde predomina alguna de estas especies sobre las otras de la asociación.
 - Zona 2 (cpy-(py)): Zona donde predomina la calcopirita y ocurre ocasionalmente pirita. En esta zona se incluyen los bloques en donde las concentraciones de ambas especies son similares.

- La estimación de CuT(%) utilizando estas zonas definidas muestra resultados mas ajustados que el modelo oficial de Anglo American Chile, con respecto al modelo generado con los pozos de tronadura en las zonas explotadas entre los años 2005 y 2009. La estimación de tonelaje es muy ajustada (+1%), lo que ciertamente muestra que la utilización del 50% de probabilidad en el indicador IND2 es acertada para el cuerpo mineralizado Nora.

6.2 Recomendaciones

El proceso de estimación usando la separación en estas dos zonas mineralógicas para el cuerpo Nora ha mostrado buenos resultados en términos generales, al compararlo con los resultados del modelo oficial. De acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda lo siguiente:

- Revisar y ajustar los alcances verticales en los radios de búsqueda de la estimación de Cobre total, ya que se detectó un aplanamiento excesivo en el kriging en el diagrama vertical.
- Realizar la estimación, separando en estas zonas mineralógicas, en un cuerpo mineralizado que no tenga interacción con laboreos subterráneas para evitar el efecto de dilución de leyes de pozos de tronadura que se propone que sucede en el cuerpo mineralizado Nora y todo Bárbara Central. Se pretende verificar el ajuste en fino de este modelamiento y los pozos de tronadura efectuados en esa área.
- Se recomienda estimar los cuerpos sulfurados de Mantos Blancos utilizando una separación en zonas mineralizadas, para mejorar la estimación realizada y así, la alimentación a plantas.

CAPÍTULO 7 REFERENCIAS

- Basso M, (2004).** Geología de la Hoja Baquedano, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, escala 1:100.000, Santiago.
- Bernal J (2003).** Litogeoquímica, con énfasis en petrología y alteración, de las rocas volcánicas del distrito minero Mantos Blancos. Memoria de título (Inédito), Universidad Católica del Norte.
- Boric R., Díaz F. & Maksaev V., (1990).** Geología y Yacimientos Metalíferos de la Región de Antofagasta, Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N°40, 246p.
- Breitkreuz C, (1986).** Das Paläozoikum in den Kordilleren Nordchiles (21°-25°). Geotektonische Forschungen, Heft 70, I-II: 1-88, p 52-53. Stuttgart, Alemania.
- Buchelt M. & Téllez C., (1988).** The Jurassic La Negra Formation in the area of Antofagasta, Northern Chile (lithology, petrography, geochemistry). In Bahlburg H., Breitkreuz C. & Giese P. (eds.), The Southern Central Andes. Lectures Notes in Earth Sciences, V. 17, p 171-182.
- Canales J., Aguilar J. & Rodríguez J., (1991).** Elementos de geología estructural aplicados al Rajo Elvira. Departamento de Geología. Empresa Minera Mantos Blancos S.A. Informe Interno, (Inédito).
- Chávez W (1985).** Geological setting and the nature and distribution of disseminated copper mineralization of the Mantos Blancos district, Antofagasta Province, Chile. Ph. D Thesis, University at California, Berkeley, USA.
- Cornejo P, Latorre J, Matthews S, Marquardt C, Toloza R, Basso M, Rodríguez J, Ulloa C (2006).** U/Pb and $^{40}\text{Ar}/\text{Ar}^{39}$ Geochronology of volcanic and intrusive events at the Mantos Blancos copper deposit, II Región, Chile. En Actas XI Congreso Geológico Chileno (in press.)
- Cortés J (1998).** Geología, estructuras y geoquímica preliminar del distrito minero de Mantos Blancos, Cordillera de la Costa, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad Católica del Norte.
- Cortés J., Gonzáles G. & Orrego M., (2000).** Marco estructural del Distrito Minero de Mantos Blancos, Cordillera de la Costa del Norte de Chile. Actas IX Congreso Geológico Chileno, V. 2, Simposio Nacional N°1, pp. 107-112.

Deutsch C.V. & Journel A.G., (1997). Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press. URL <http://www.gslib.com>.

Díaz D., (1998). Análisis dinámico y cinemática de la deformación frágil en el yacimiento cuprífero Mantos Blancos, Segunda Región de Antofagasta. Memoria para optar al Título de Geólogo. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

Emery X., (2000). Geoestadística Lineal. Departamento de Ingeniería en Minas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 411 p.

Garay M (2007). Concentración de plata en sulfuros de cobre del yacimiento Mantos Blancos, Cordillera de la Costa, norte de Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile.

García F., (1967). Geología del Norte Grande de Chile, V. 3. Simposium sobre Geosinclinal Andino, Sociedad Geología de Chile, 138 p.

Infanta J (2002). Geología y mineralización del prospecto Argentina. Su implicancia en la exploración del distrito minero Mantos Blancos Antofagasta II Región. Memoria de Título (Inédito), Universidad Católica del Norte.

Lucero C., (1998). Evaluación Geológica del Cuerpo Mineralizado Nora. Mantos Blancos, II Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte.

Marinovic N., Smoje I., Maksaev V., Hervé M., Mpodozis C., (1995). Hoja Aguas Blancas, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, No 70, 150 p., 1 mapa escala 1: 250.000, Santiago.

Munizaga F, Ramírez R, Drake R, Tassinari C & Zentilli M (1991). Nuevos antecedentes geocronológicos del yacimiento Mantos Blancos, Región de Antofagasta, Chile. En Congreso Geológico Chileno N°6, Actas Vol. 1, p. 221-224.

Muñoz N., Venegas R. & Tellez C., (1988). La Formación La Negra: Nuevos antecedentes estratigráficos en la Cordillera de la Costa de Antofagasta. Congreso Geológico Chileno Actas N°5, V. 1, pp A283-A312.

Naranjo J. & Paskoff R., (1985). Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, Norte de Chile (18°-21°). IV Congreso Geológico Chileno. Actas. Tomo 4, p. 5-19 a 5165.

Niemeyer H., Venegas R., González C. & Aceñolaza F., (1997). Los terrenos paleozoicos del salar de Navidad, Región de Antofagasta, Chile. *Revista Geológica de Chile*, V. 24, n° 2, pp 123-143.

Oliveros V., Féraud G., Aguirre L., Tristá D., Morata D., Fornari M., Ramírez L. E., Palacios C. & Ferraris F., (2006). Método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en minerales de ganga: una aproximación a la edad de la mineralización de cobre en el yacimiento Mantos Blancos y Michilla, Cordillera de la Costa, Norte de Chile. XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, II Región, Chile. V. 2, pp 323-326.

Oliveros V, Féraud G, Aguirre L, Ramírez L, Fornari M, Palacios C, Parada M (2007). Detailed $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile. En *Mineralium Deposita* V. 43, pp 281-293.

Orrego M., (2001). Levantamiento Geológico y Sondajes de Reconocimiento en el Distrito Mantos Blancos. Superintendencia de Geología, División Mantos Blancos. Informe Interno, (Inédito).

Pizarro R., (2004). Caracterización Geometalúrgicas de Unidades geológicas mineras del yacimiento Mantos Blancos, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Informe de Avance de Memoria, Universidad Católica del Norte.

Ramírez L, Palacios C, Townley B, Parada M, Sial A, Fernández-Turiel J, Gimeno D, García-Valles M, Lehmann B (2006). The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia-style hidrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile. En *Mineralium Deposita* V.41, p. 246-258, Springer-Verlag.

Ramírez R., (1991). Diseño, desarrollo e implementación del sistema computacional para manejos de datos geológicos en el yacimiento Mantos Blancos. Memoria para optar al título de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.

Scheuber E & Andriesen P (1990). The Kinematic and geodynamic significance of the Atacama fault zone, northern Chile. *Journal of Structural Geology*, Vol. 12, N°2, p. 243-257.

Scheuber E & Reutter K J (1992). Magmatic arc tectonics in the central Andes between 21° and 25°S. *Tectonophysics*, 205, 127-140.

Sullivan J (2000). Manual de Estudio de la Geoestadística Minera. Curso realizado para Codelco Chile (Inédito).

Téllez C., (1986). Estratigrafía de la Formación La Negra en la Cordillera de la Costa a la latitud de Antofagasta. II Región, Chile. Memoria de Título (Inédita), Departamento de Geociencias, Universidad del Norte, Antofagasta.

Ulloa C (2007). Informe de Elaboración modelo de recursos de Largo plazo año 2007, División Mantos Blancos, Anglo American Chile. Informe interno Anglo American Chile (Inédito).

Véliz H., (1996). Caracterización de los rasgos estructurales mayores del yacimiento Mantos Blancos. Superintendencia de Geología, División Mantos Blancos. Informe Interno, (Inédito).

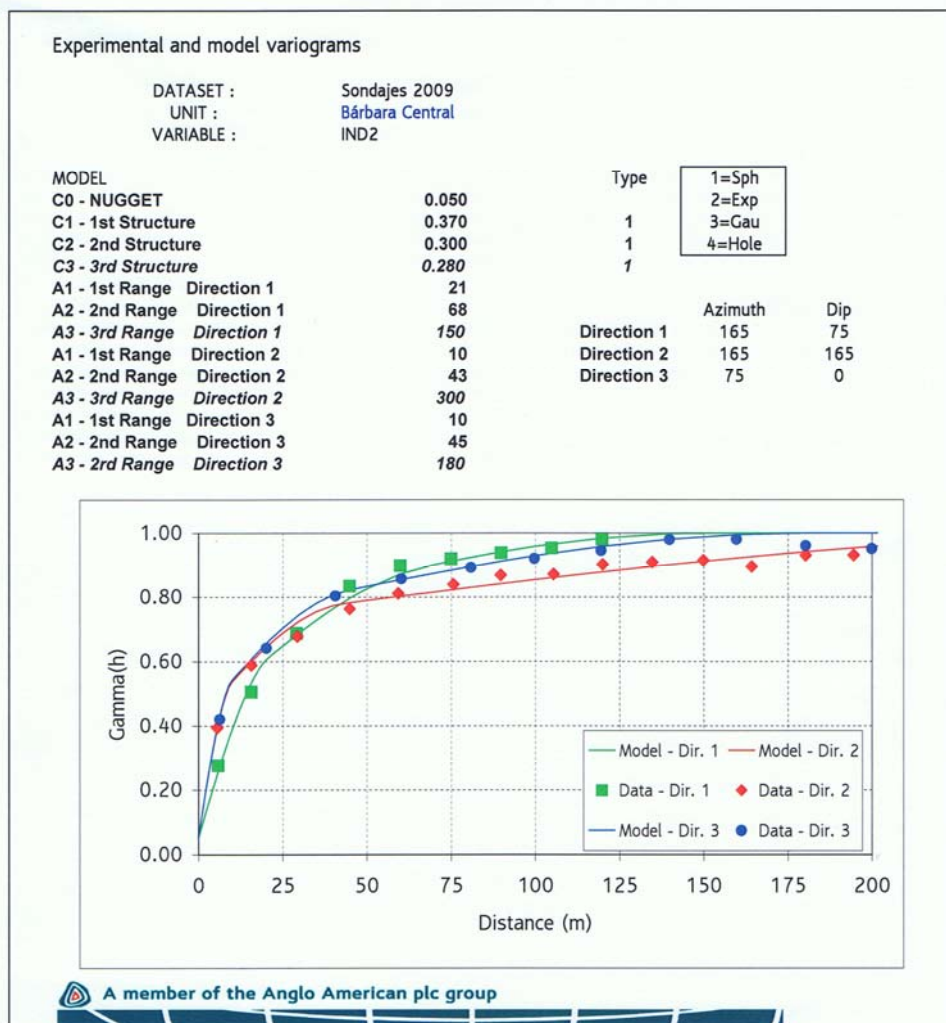
ANEXO #1

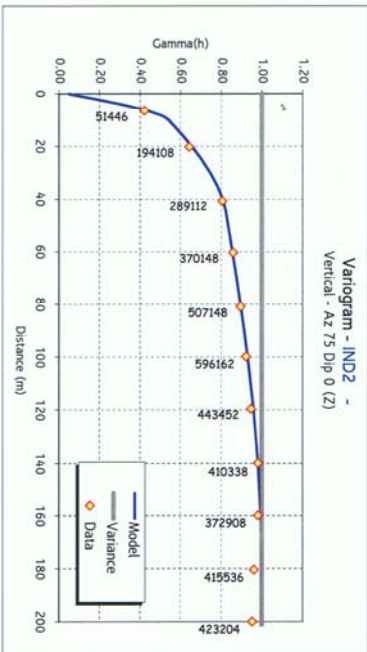
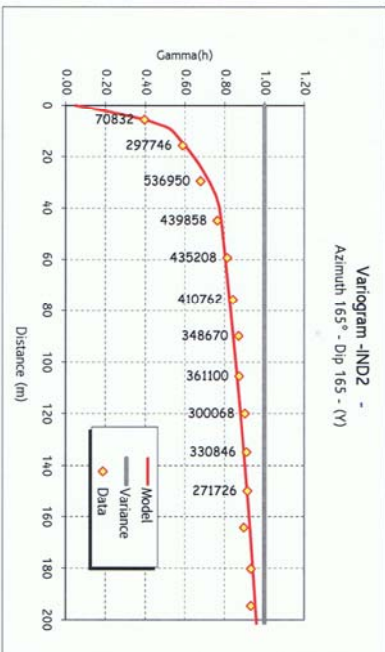
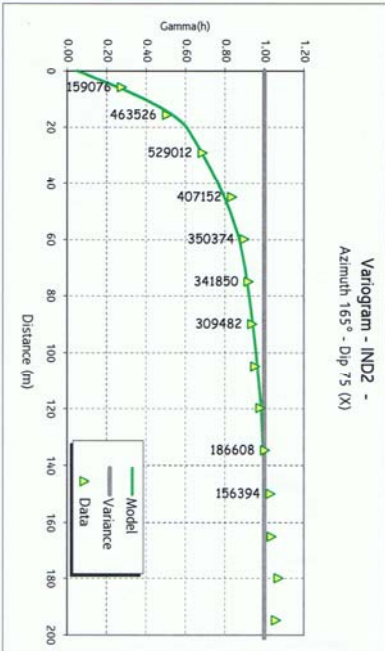
Variogramas y plan de kriging variable IND2

Plan de Kriging

Variable	Zona	Discretización	Tamaño Bloques	Min/Max Muestras	Octantes	Max Muestras por Sondaje	Az/Dip	Distancia de Búsqueda		Variograma Rango Total
								Pass 1	Pass 2	
IND2	Nora	2x2x3	6.25	4/16	No	3	165/165	240	2x Vol Paso 1	300
			6.25					120		150
			12					144		180

Variogramas





Experimental and model variograms

PROJECT : DMBL
UNIT : Bárbara Central
VARIABLE : IND2

N° Structures	MODEL	Type
	C0 - NUGGET	0.050
	C1 - 1st Structure	0.370
	C2 - 2nd Structure	0.300
	C3 - 3rd Structure	0.280
	A1 - 1st Range	21
	A2 - 2nd Range	68
	A3 - 3rd Range	150
	A1 - 1st Range	10
	A2 - 2nd Range	43
	A3 - 3rd Range	300
	A1 - 1st Range	10
	A2 - 2nd Range	45
	A3 - 3rd Range	180

Variance scaled values	Azimuth	Dip
C0 - NUGGET	0.050000	
C1 - 1st Structure	0.370000	165
C2 - 2nd Structure	0.300000	165
C3 - 3rd Structure	0.280000	75
	Direction 1	165
	Direction 2	165
	Direction 3	75
	Direction Z	0

ANEXO #2

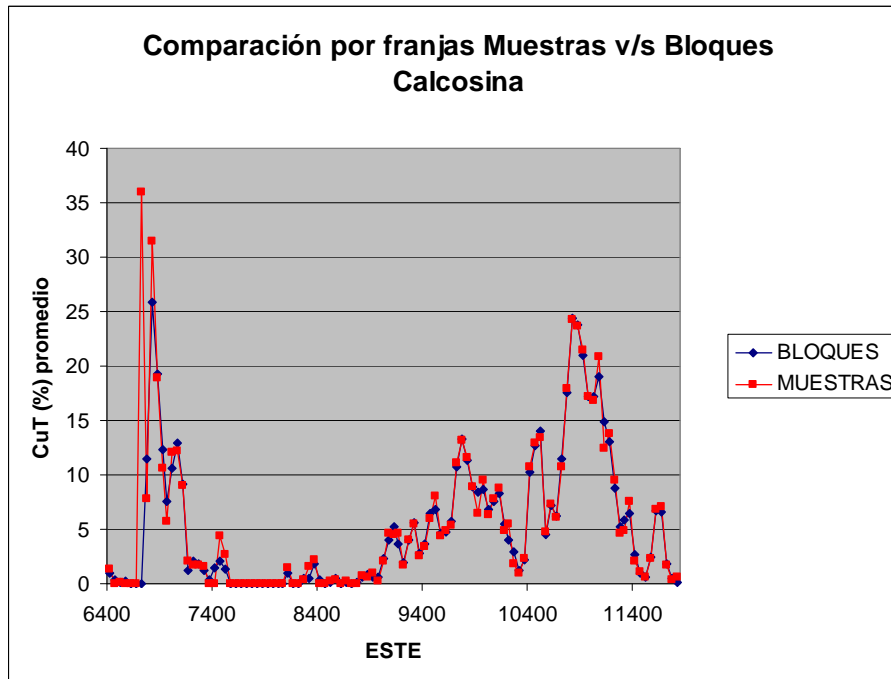
Plan de kriging y validaciones estimación mineralógica en zona del cuerpo mineralizado Nora

Plan de kriging para la mineralización

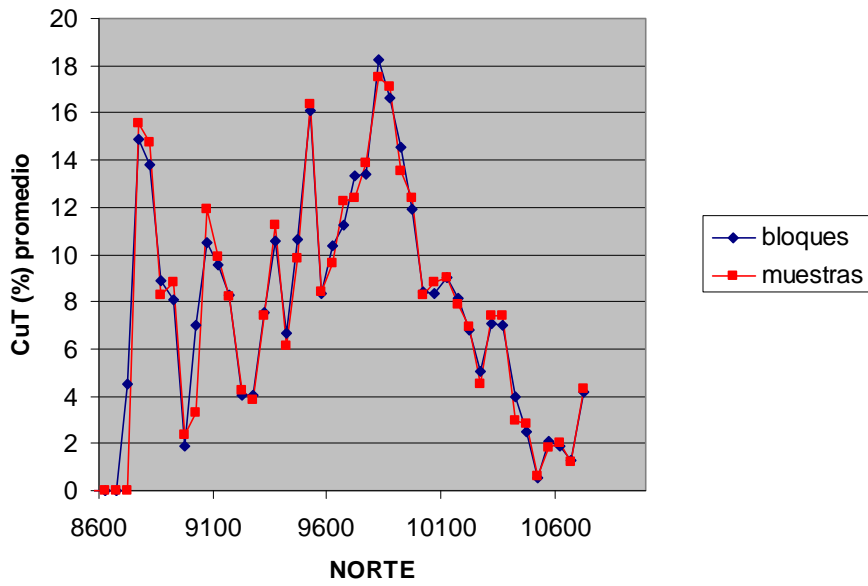
Variable	Discretización	Min/Max Muestras	Octantes	Max Muestras por Sondaje	Az/Dip	Distancia de Búsqueda		Variograma
						Pass 1	Pass 2	Rango Total
CC	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
BO	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
CP	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
CV	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
PY	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
ATA	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130
CR	3x3x4	8 / 20	No	4	Omn.	70	2x Vol Paso 1	130
						70		130
						40		130

Validaciones a la estimación por minerales

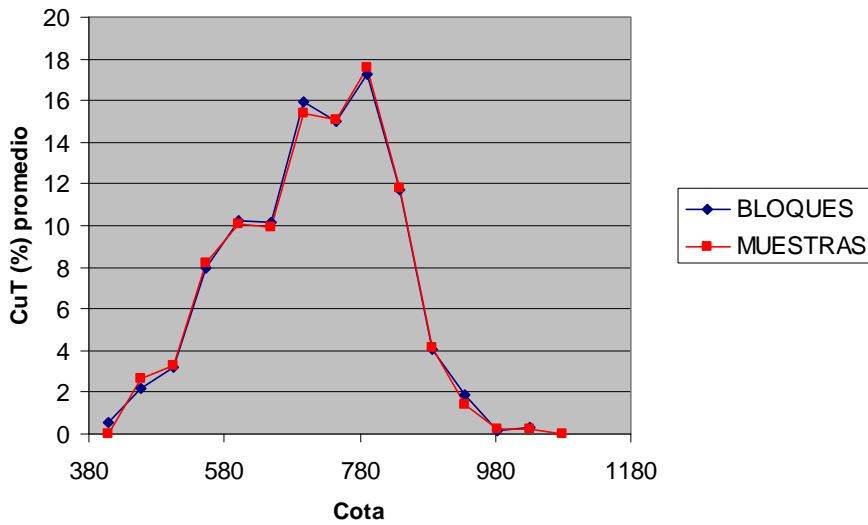
CALCOSINA-DIGENITA



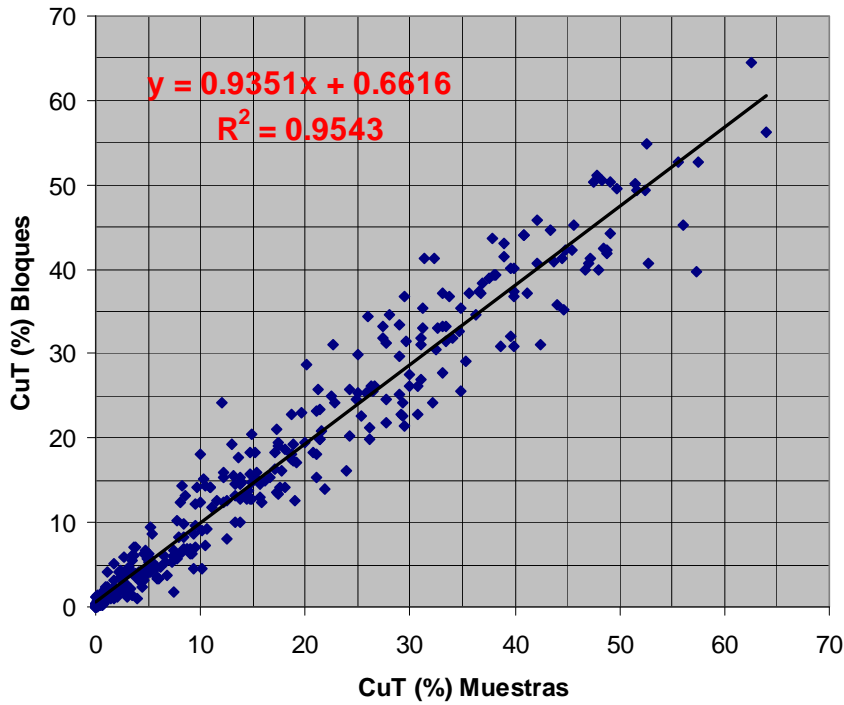
**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Calcosina**



**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Calcosina**

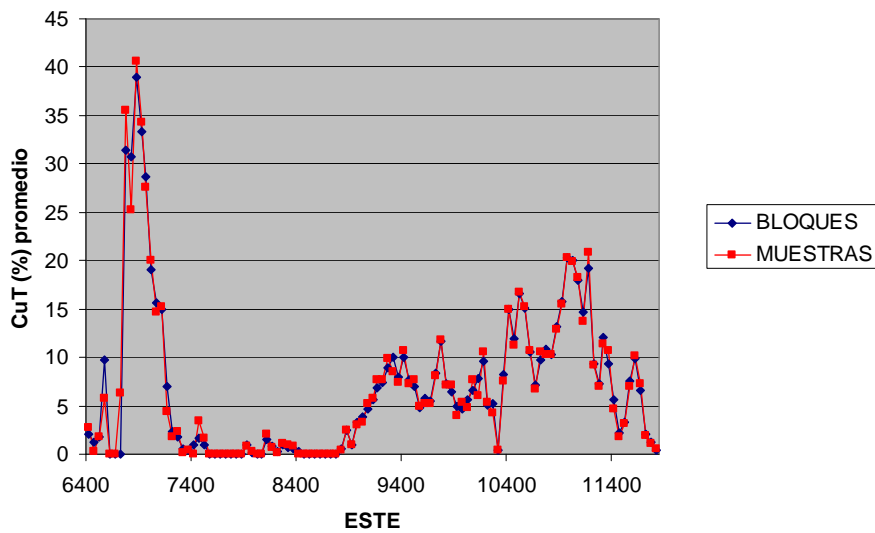


Test Validación Bloque móvil Calcosina,
bloque 43.75m x 43.75m x 24m,
mínimo 74 muestras

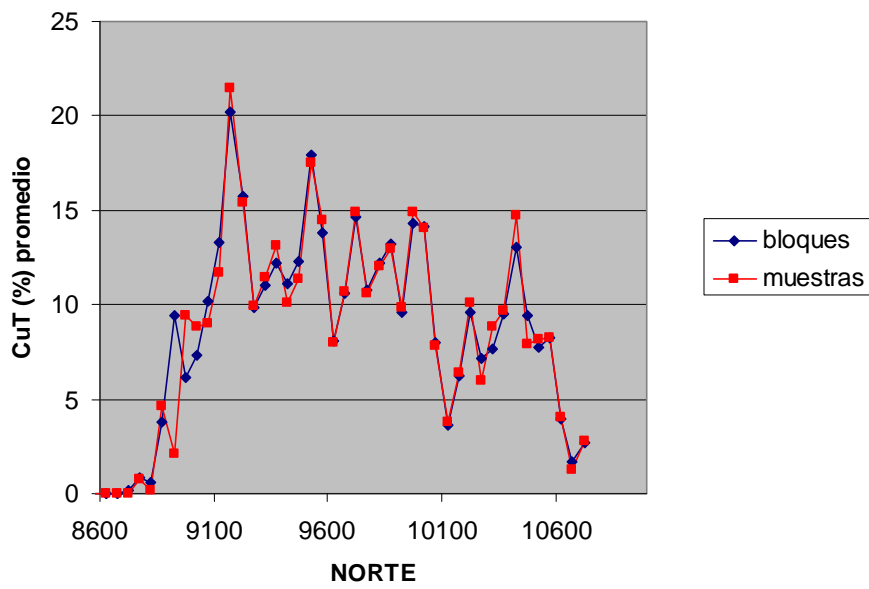


BORNITA

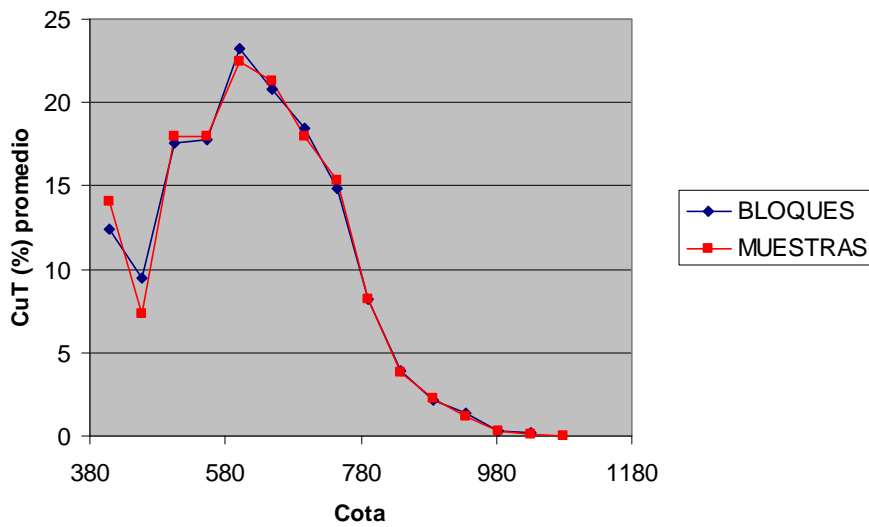
Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Bornita



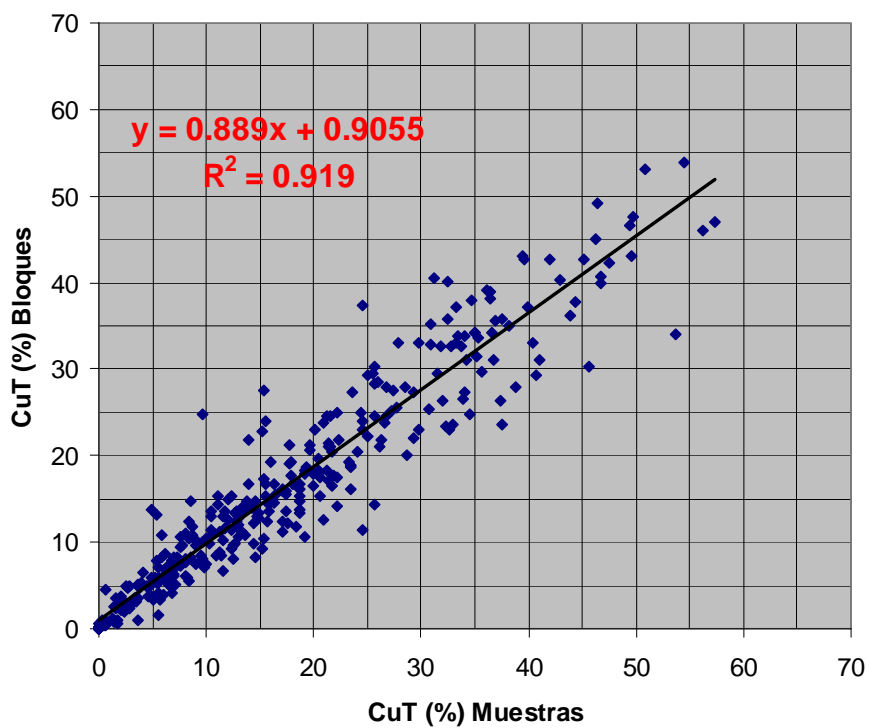
**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Bornita**



**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Bornita**

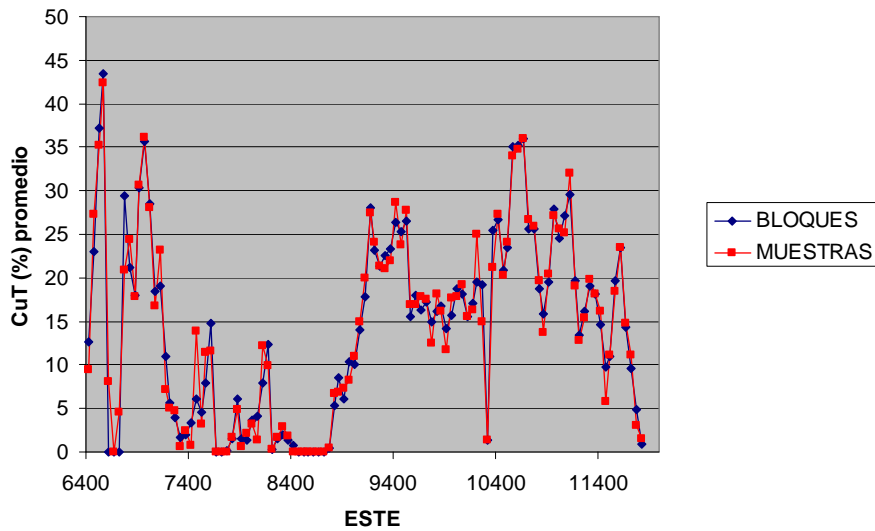


Test Validación Bloque móvil Bornita,
bloque 43.75m x 43.75m x 24m,
mínimo 74 muestras

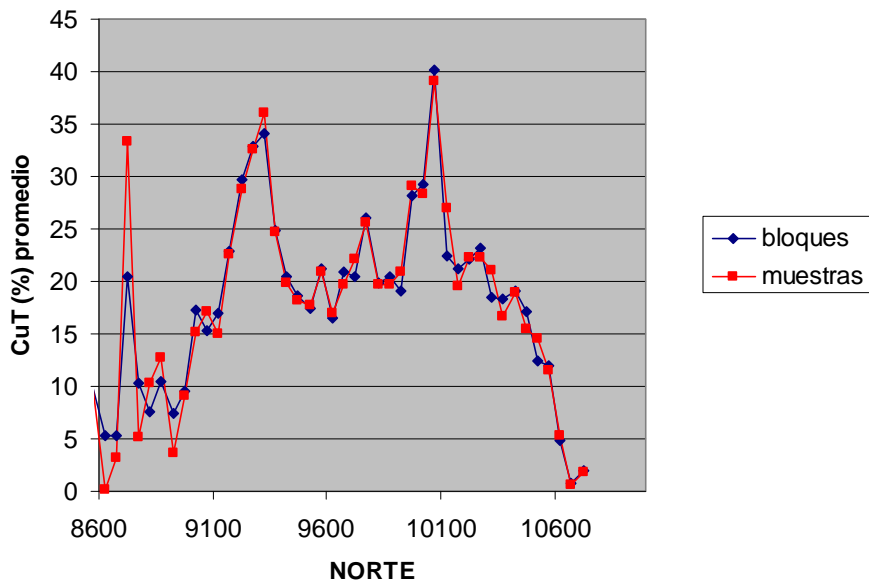


CALCOPIRITA

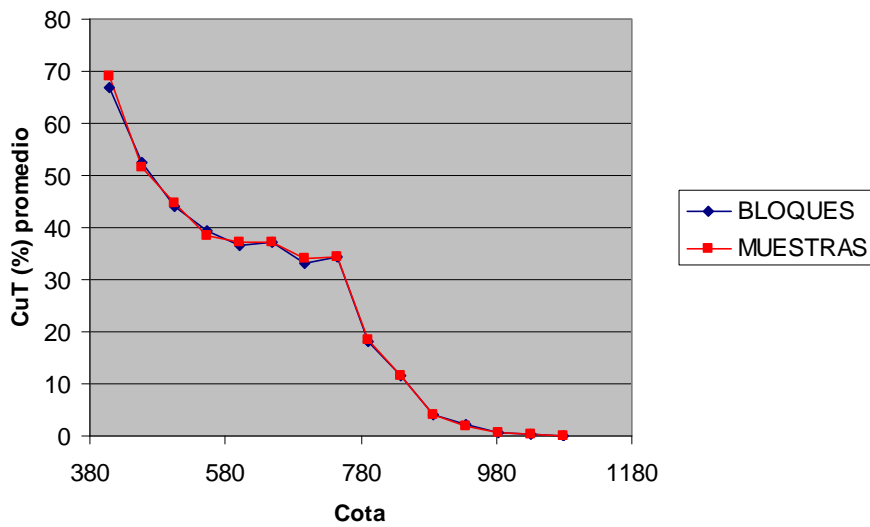
**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Calcopirita**



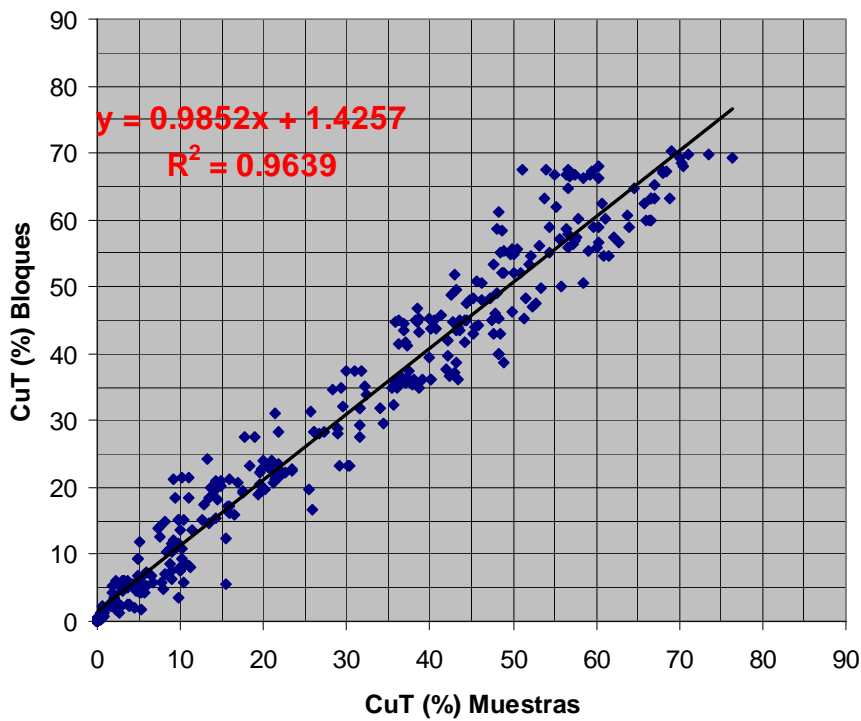
**Comparación por franjas Muestras v/s Bloques
Calcopirita**



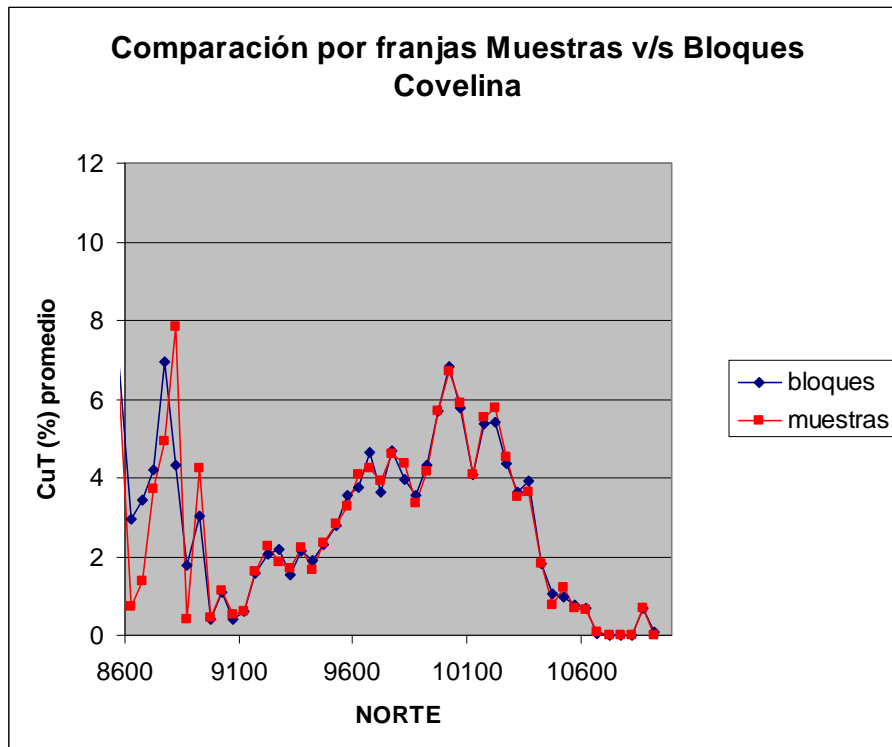
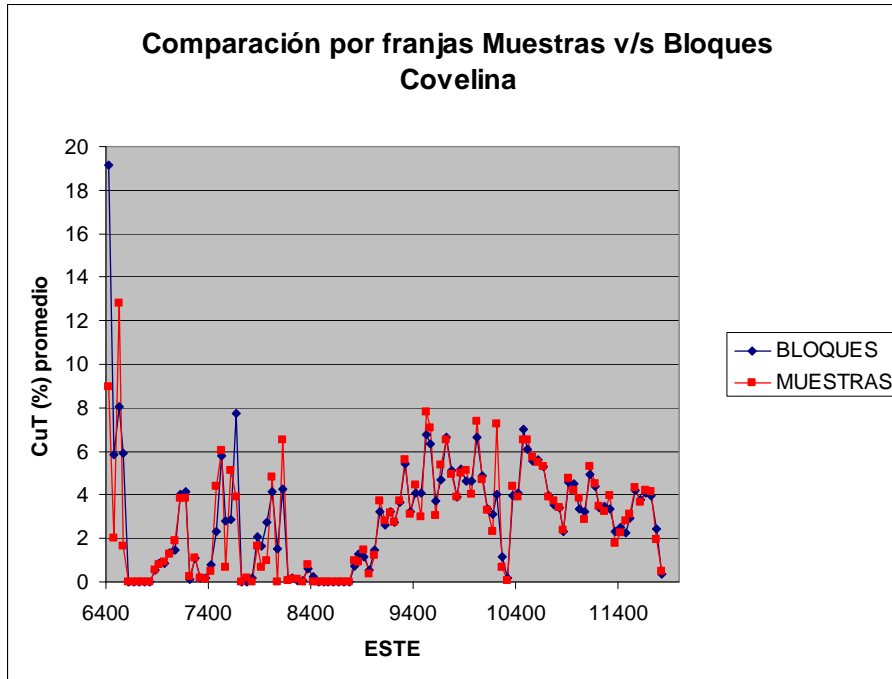
Comparación por franjas Muestras v/s Bloques Calcopirita



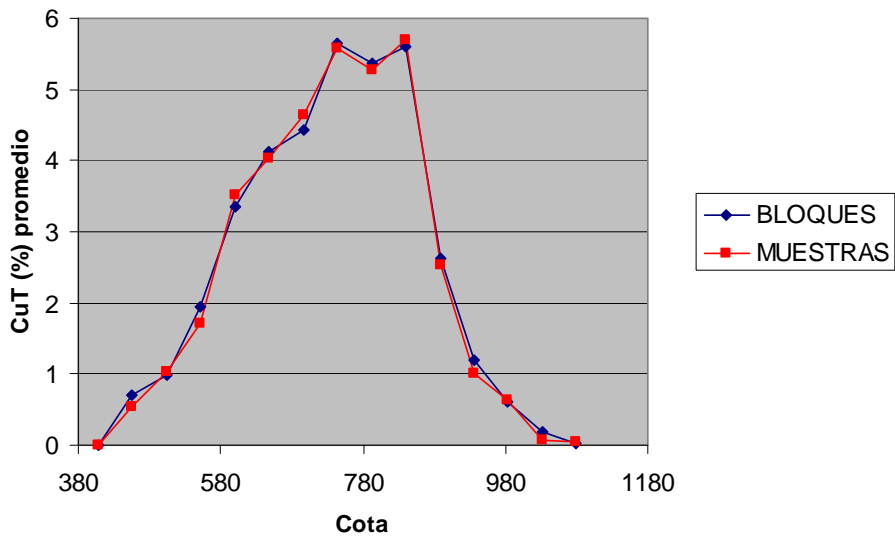
Test Validación Bloque móvil Calcopirita, bloque 43.75m x 43.75m x 24m, mínimo 74 muestras



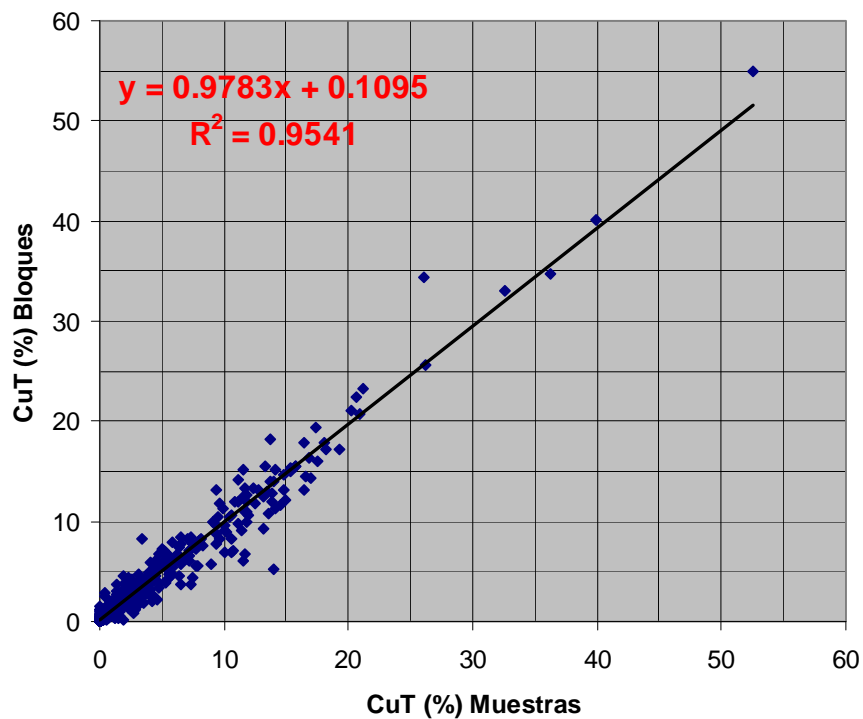
COVELINA



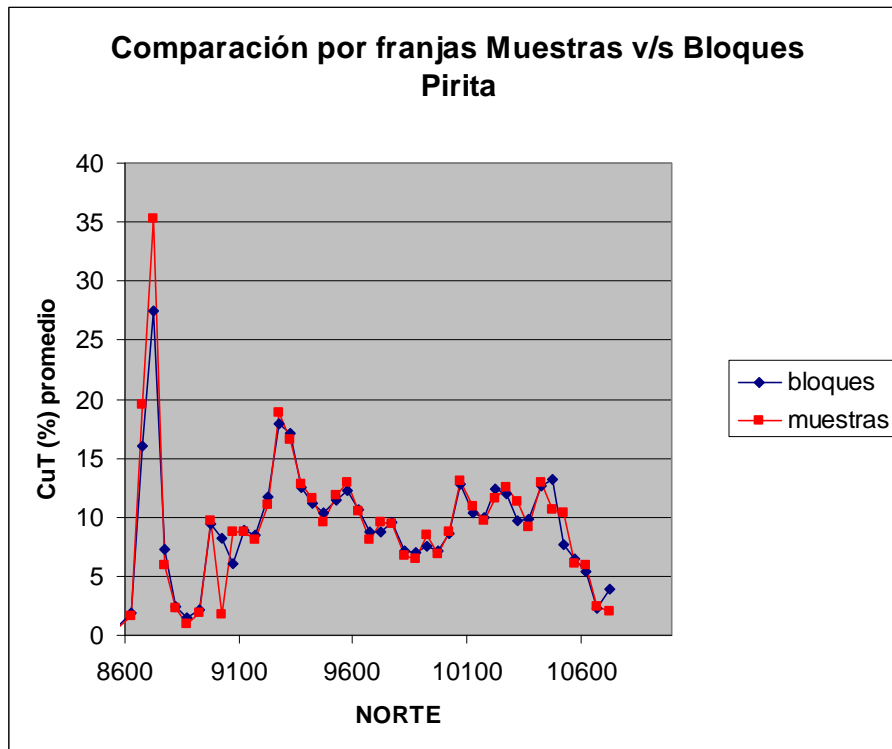
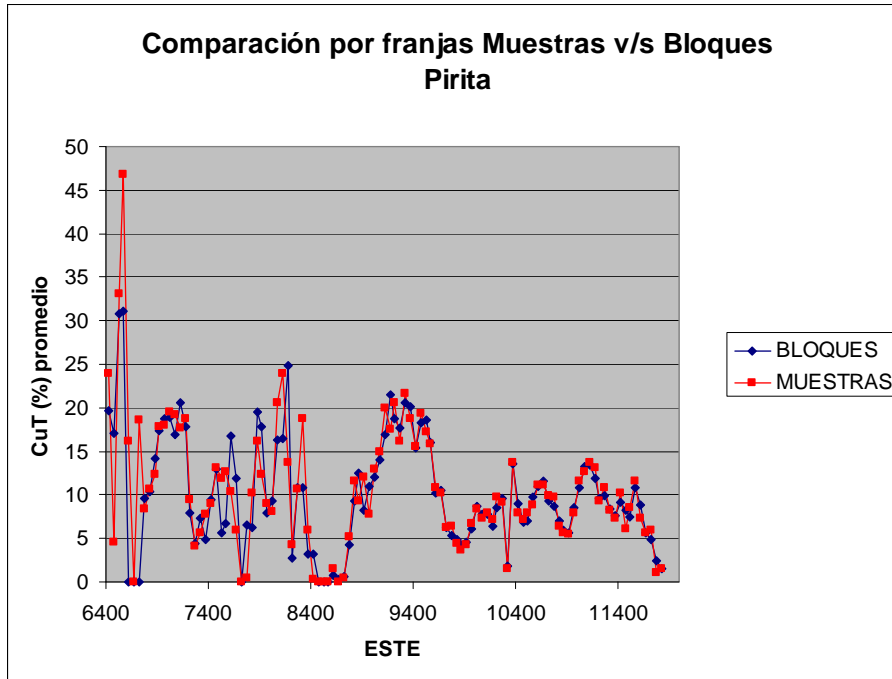
Comparación por franjas Muestras v/s Bloques Covelina



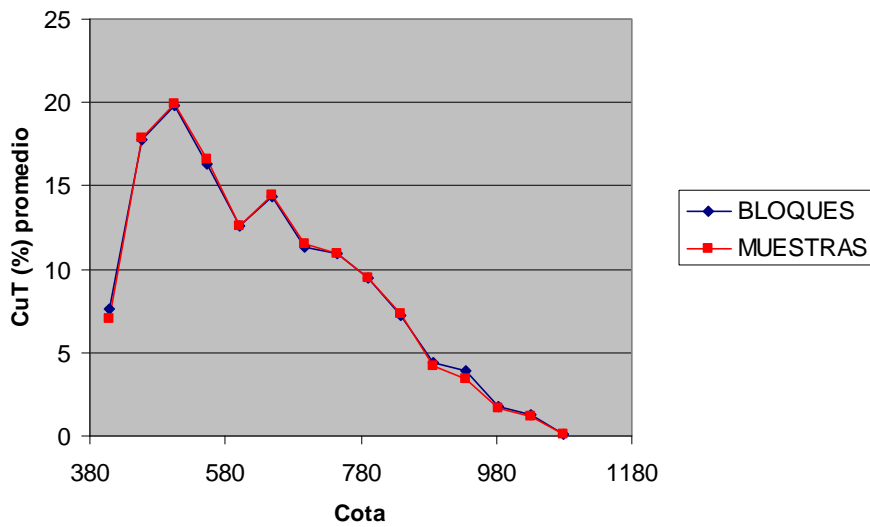
Test Validación Bloque móvil Covelina, bloque 43.75m x 43.75m x 24m, mínimo 74 muestras



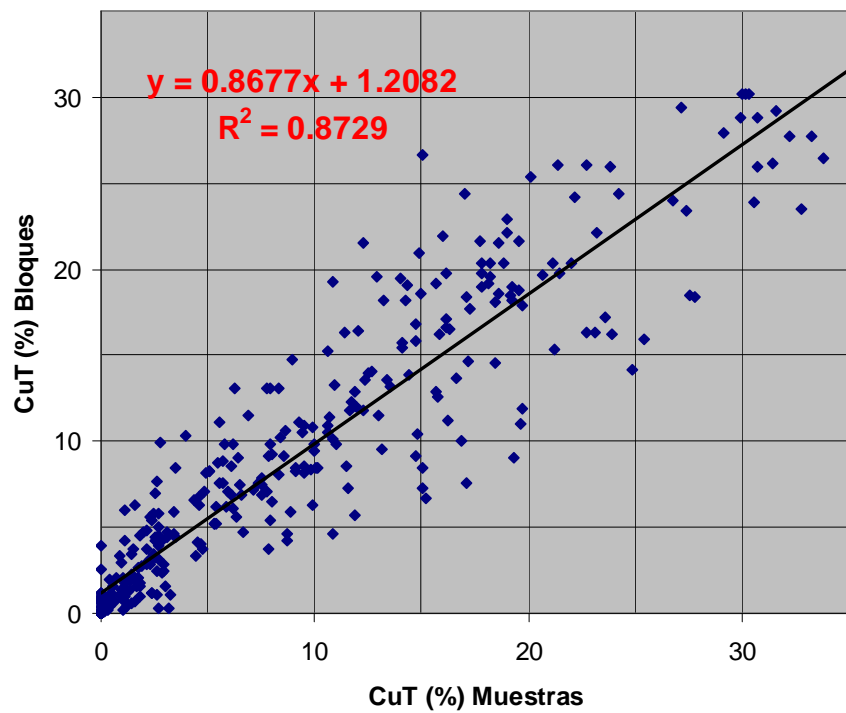
PIRITA



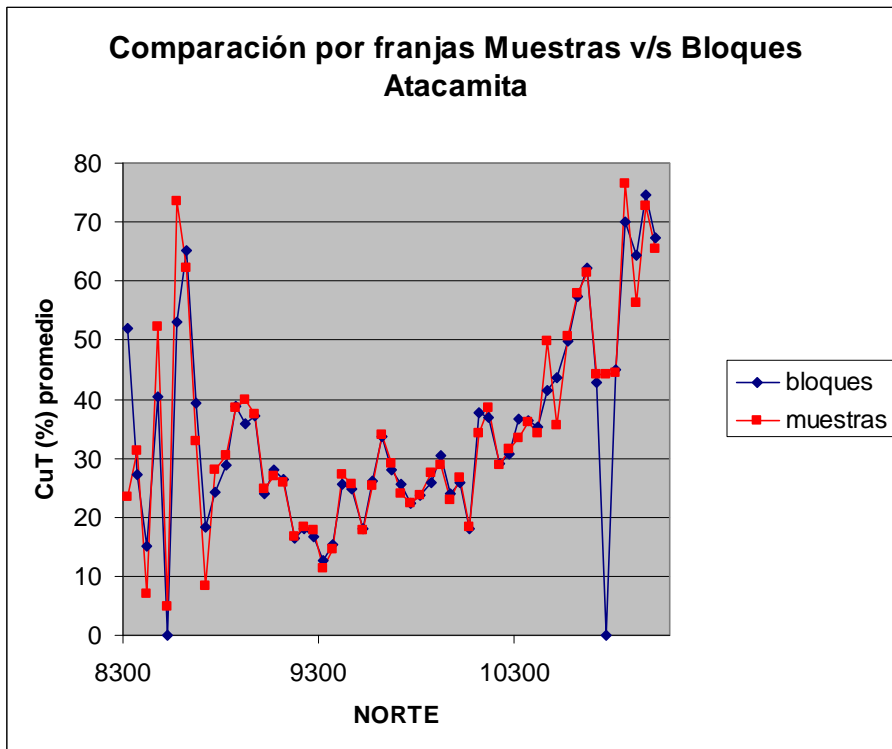
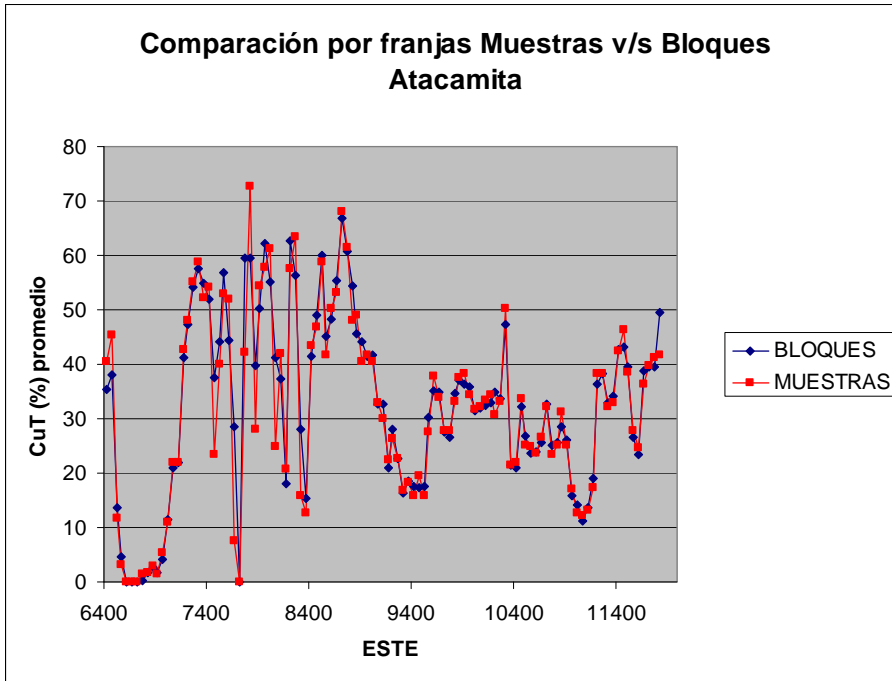
Comparación por franjas Muestras v/s Bloques Pirita



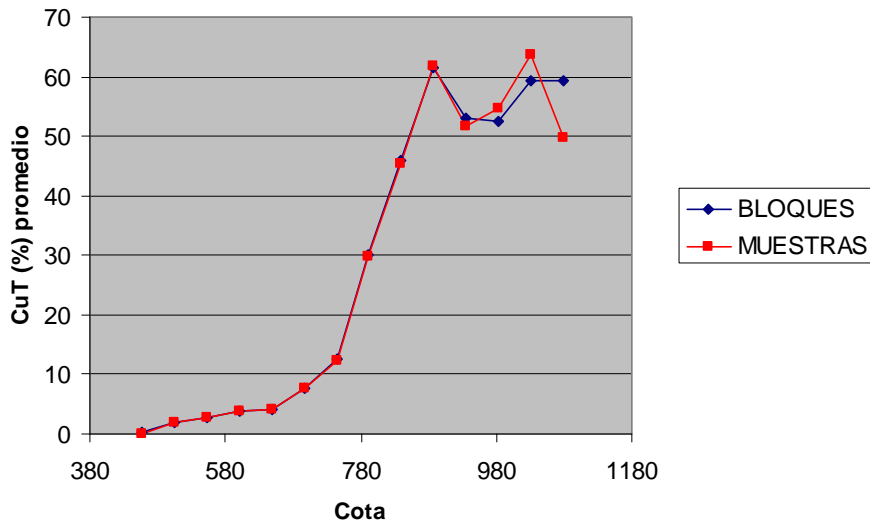
Test Validación Bloque móvil Calcosina, bloque 43.75m x 43.75m x 24m, mínimo 74 muestras



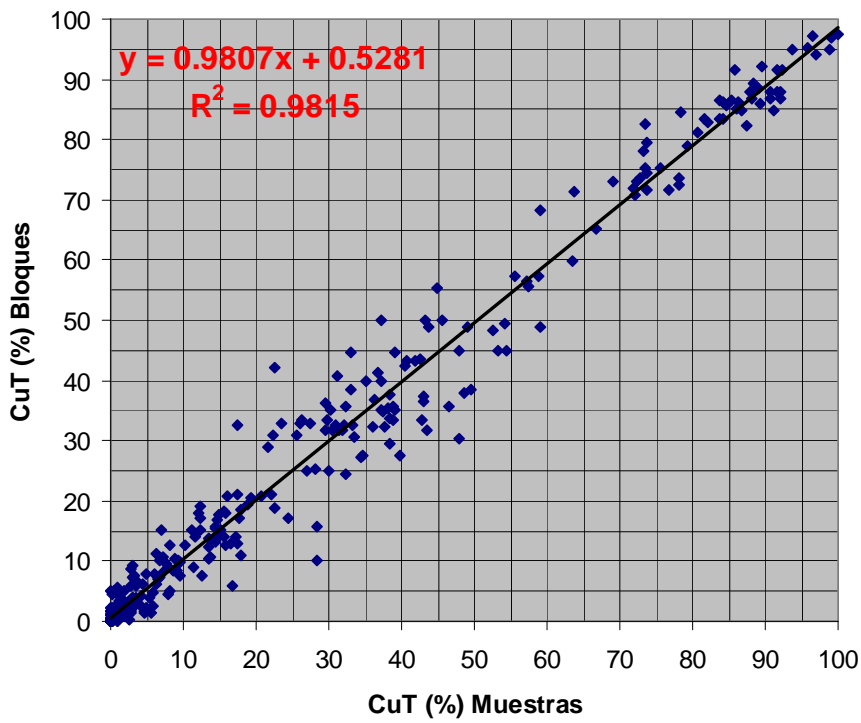
ATACAMITA



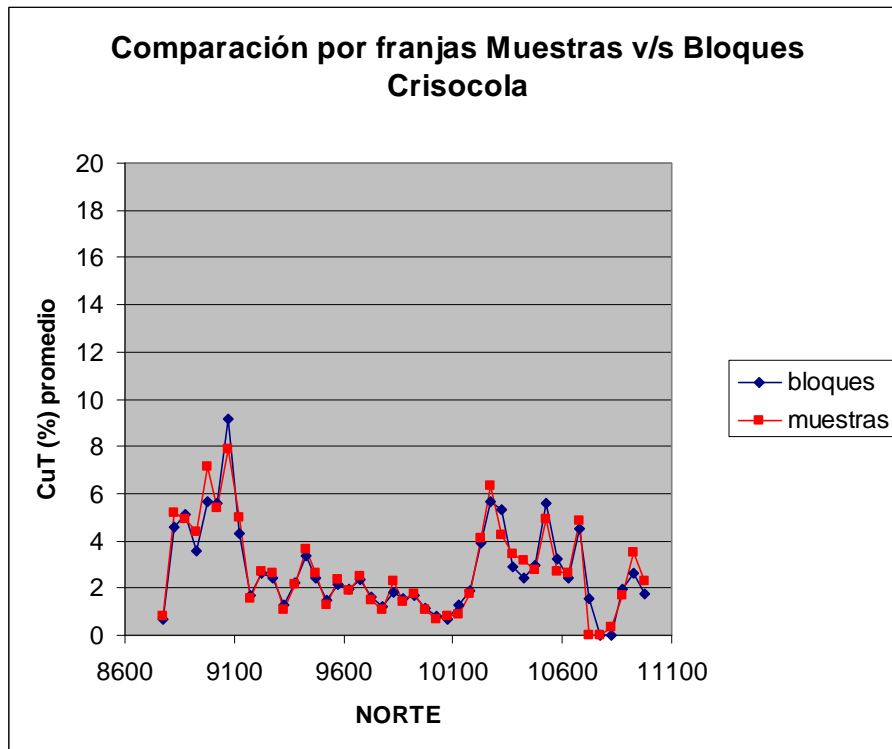
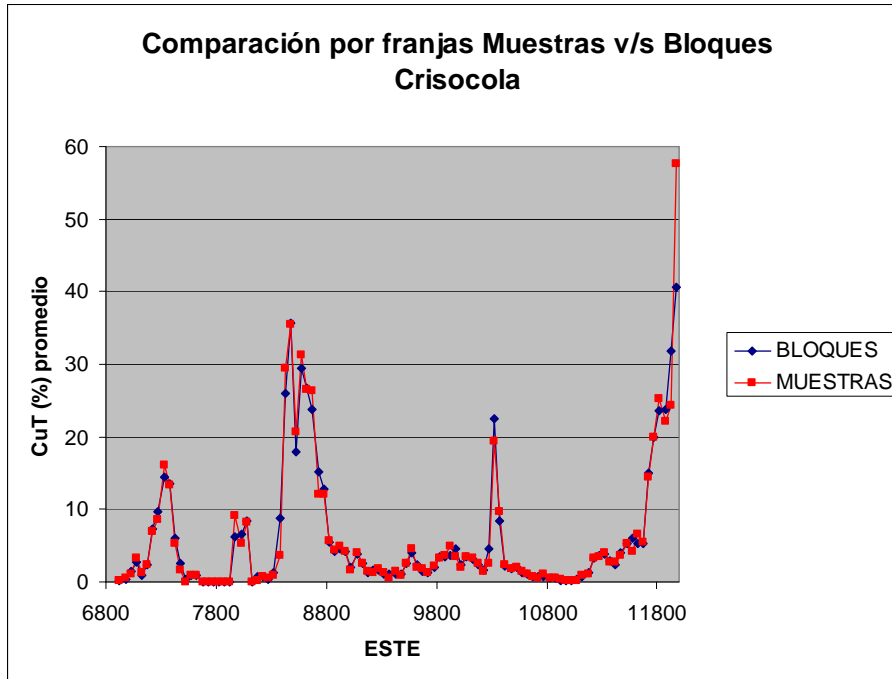
Comparación por franjas Muestras v/s Bloques Atacamita



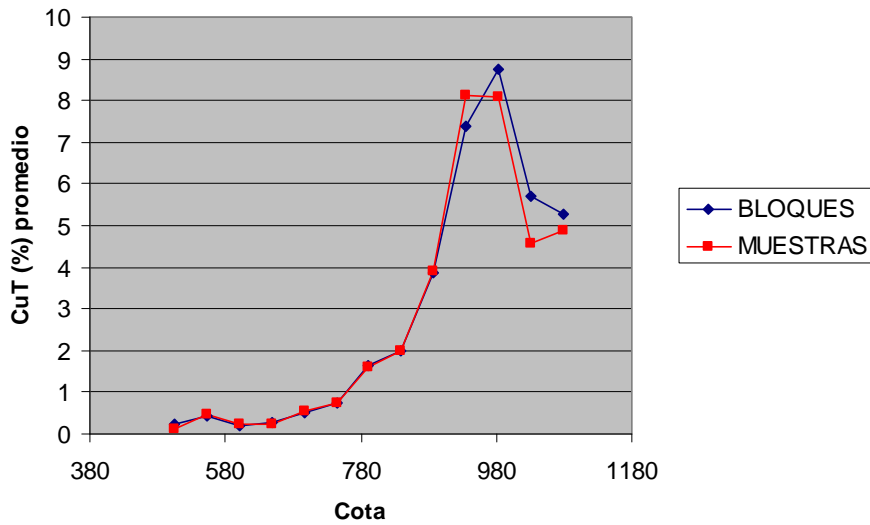
Test Validación Bloque móvil Calcosina, bloque 43.75m x 43.75m x 24m, mínimo 74 muestras



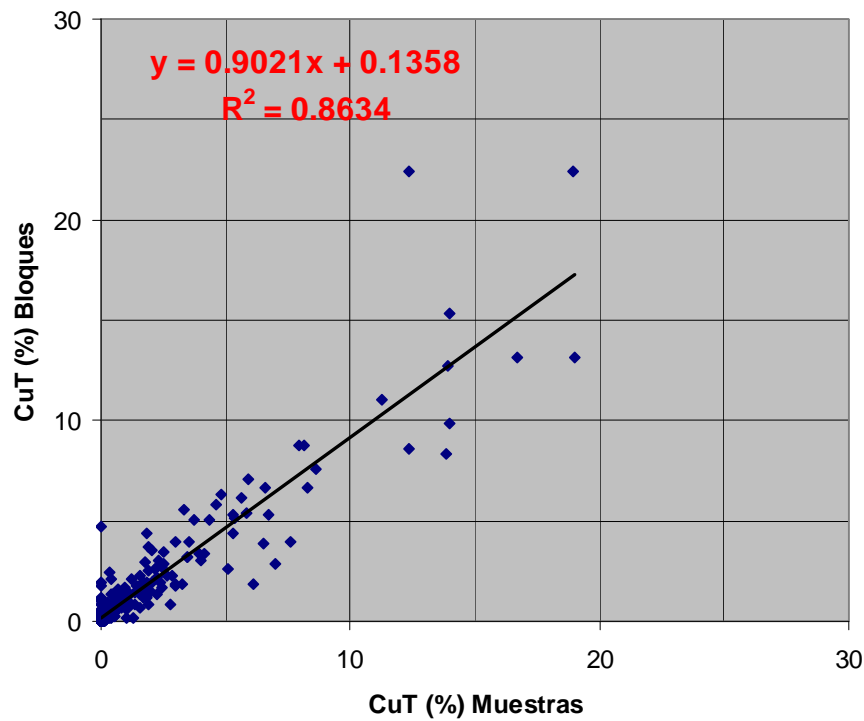
CRISOCOLA



Comparación por franjas Muestras v/s Bloques Crisocola



Test Validación Bloque móvil Calcosina, bloque 43.75m x 43.75m x 24m, mínimo 74 muestras



ANEXO #3

Variogramas y plan de kriging variable CUT

Plan de Kriging

Variable	Zona	Discretización	Tamaño Bloques	Min/Max Muestras	Octantes	Max Muestras por Sondaje	Az/Dip	Distancia de Búsqueda		Variograma Rango Total
								Pass 1	Pass 2	
CuT	Nora	2x2x3	6.25	4/16	No	3	75/45	240	2x Vol Paso 1	400
			6.25					115		115
			12					120		120

Variogramas

Experimental and model variograms

DATASET : Zonas minerales
 UNIT : Nora
 VARIABLE : CuT

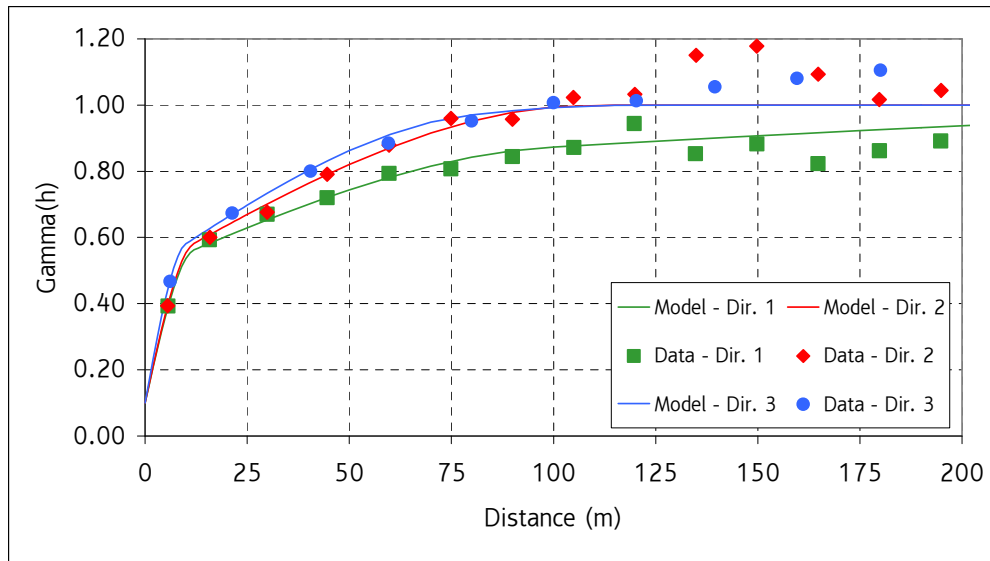
MODEL

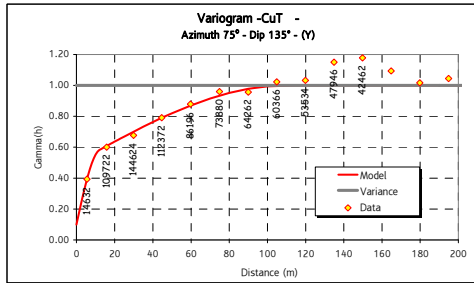
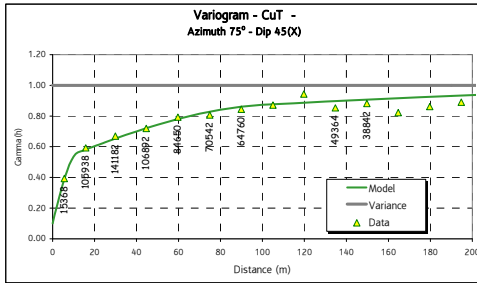
C0 - NUGGET 0.100
C1 - 1st Structure 0.400
C2 - 2nd Structure 0.300
C3 - 3rd Structure 0.200
A1 - 1st Range Direction 1 12
A2 - 2nd Range Direction 1 100
A3 - 3rd Range Direction 1 400
A1 - 1st Range Direction 2 12
A2 - 2nd Range Direction 2 105
A3 - 3rd Range Direction 2 115
A1 - 1st Range Direction 3 10
A2 - 2nd Range Direction 3 80
A3 - 2nd Range Direction 3 120

Type

1=Sph
 2=Exp
 3=Gau
 4=Hole

	Azimuth	Dip
Direction 1	75	45
Direction 2	75	135
Direction 3	165	0





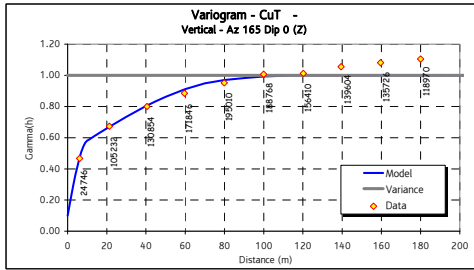
Experimental and model variograms

PROJECT : DMBL
UNIT : Nora
VARIABLE : CuT

N° Structures

MODEL

MODEL	Value	Type
C0 - NUGGET	0.100	1=Sph
C1 - 1st Structure	0.400	2=Exp
C2 - 2nd Structure	0.300	3=Gau
C3 - 3rd Structure	0.200	4=Hole
A1 - 1st Range Direction X	12	
A2 - 2nd Range Direction X	100	
A3 - 3rd Range Direction 1	400	
A1 - 1st Range Direction Y	12	
A2 - 2nd Range Direction Y	105	
A3 - 3rd Range Direction 2	115	
A1 - 1st Range Direction Z	10	
A2 - 2nd Range Direction Z	80	
A3 - 3rd Range Direction 3	120	



Variance scaled values

Model Component	Value	Direction	Azimuth	Dip
C0 - NUGGET	0.10000			
C1 - 1st Structure	0.40000	Direction 1	75	45
C2 - 2nd Structure	0.30000	Direction 2	75	135
C3 - 3rd Structure	0.20000	Direction 3	165	0