



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
Departamento de Ciencias Geológicas

**MODELAMIENTO GEOLÓGICO IMPLICITO
PARA LOS RECURSOS POTENCIALES
DEL PROYECTO MOCHA, REGIÓN DE
TARAPACÁ, CHILE**

Memoria para optar al grado de Magíster en Geología Económica
Mención Exploración Minera

MÓNICA VUKASOVIC MONTT

Profesor Guía: Dr. Shoji Kojima

**Antofagasta, Chile
2015**

Agradezco a la vida, a mi familia y especialmente a mi hijo, por quien existo

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sr. Sergio Rivera, por otorgarme la oportunidad de actualizar los conocimientos geológicos, mediante este Magíster. Y a su vez, por confiar en mí y perseguir el crecimiento de los profesionales de Exploraciones Mineras Andinas S.A., filial de exploraciones Codelco – Chile.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
DESCRIPCIÓN DE PROYECTO MOCHA, REGIÓN TARAPACÁ.....	4
1.1 Ubicación y accesos.....	4
1.2 Antecedentes.....	5
1.3 Geología.....	6
CAPITULO II	
ORIGEN DE MODELAMIENTO IMPLÍCITO.....	12
2.1 Fundamento.....	13
2.2 Descripción del método.....	18
2.3 Ejemplo de Modelamiento Implícito.....	19
2.4 Ventajas.....	21
CAPITULO III	
DESCRIPCIÓN MODELOS 3D ZONA MINERAL CPY 3-5 MOCHA.....	22
3.1 Descripción Base de Datos de Modelo Geológico Explícito 2006.....	22
3.2 Descripción de Modelo Geológico 3D Explícito.....	25
3.3 Generación Modelos 3D Implícitos.....	29
3.4 Descripción Modelos 3D Implícitos.....	34
CAPITULO IV	
ESTIMACIÓN RECURSOS.....	49
4.1 Estimación potencial cuerpo calcopirita 3-5 Proyecto Mocha..	49
4.2 Modelo de Bloques.....	50
4.3 Validación estimación de Modelo de Bloques.....	52
4.4 Resultados estimación de recursos.....	54
CAPITULO V	
ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE MODELOS 3D.....	56

5.1 Comparación Modelos 3D Implícitos.....	56
5.2 Comparación Modelos 3D Implícitos y Estático.....	60

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
-------------------------------------	----

REFERENCIAS.....	65
------------------	----

FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación proyecto Mocha

Figura 1.2: Mapa geológico de proyecto Mocha (Tomado de Chiang et al., 2006)

Figura 2.1: Ejemplo del escaneo de una escultura, los puntos obtenidos se interpolan y definen una superficie, cuya resolución y suavización sólo dependerá de la densidad de datos.

Figura 2.2: A la izquierda, una superficie generada por poligonales con 750 vértices, y a la derecha una superficie implícita creada por interpolación desde los polígonos (Tomado de Turk, O’Brien, 2002).

Figura 2.3: Ejemplo gráfico del resultado de Radial Basis Functions (RBF), para la interpolación de superficies, determinando la “superficie de valor 0”, que corresponde al contacto entre dos categorías de datos. Tomado de Riquelme (2011).

Figura 3.1: Vista en planta y 3D de sondajes Mocha con información de contenido de calcopirita (a, b), y contenido de cobre (c, d).

Figura 3.2: En a) se observa mapa de superficie Mocha con traza de secciones geológicas SW-NE. En b) en vista 3D se observa los polígonos de zona mineral.

Figura 3.3: Modelo explícito de zona mineral 2006 de proyecto Mocha (Chiang et al, 2006).

Figura 3.4: Secciones de zona mineral del proyecto Mocha (Chiang et al., 2006)

Figura 3.5: Sólidos del modelo 3D “explícito” Mocha 2006, cuerpo de calcopirita 3-5 (Cpy-3-5), vista en 3D, planta y una sección NS vista desde el W.

Figura 3.6: Ejemplo de construcción de sólidos utilizando “tie lines” entre secciones (Tomado de Riquelme, 2011).

Figura 3.7: Vista 3D de mapa de superficie de Mocha y sondajes con datos de intensidad de calcopirita.

Figura 3.8: Vista 3D de polilíneas (color azul) que apoyan la generación de la superficie de Cpy 3-5, en los casos que no exista información de sondajes.

Figura 3.9: Vista 3D de las superficies (a-e) para generar los sólidos (f-i) del Modelo implícito Calcopirita 3-5 del proyecto Mocha.

Figura 3.10: izquierda Vista 3D del modelo implícito (4.1) de subzonas minerales; a la derecha vista 3D del modelo implícito (4.1) de la subzona mineral de calcopirita 3-5 de Mocha.

Figura 3.11: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 1.

Figura 3.12: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 2.

Figura 3.13: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 3.

Figura 3.14: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.1

Figura 3.15: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.2.

Figura 3.16: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.3.

Figura 3.17: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.4.

Figura 3.18: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.5.

Figura 3.19: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.5.1 (sin polilíneas).

Figura 4.1: Extensión Modelo de bloques Mocha, subzona mineral Calcopirita 3-5, planta a cota 1.800 m s.n.m. En color rojo bloques 15x15x15 de Modelo Implícito 4.1 (interpolador lineal). En color azul, contorno de sólidos de Modelo explícito (extrusión de polígonos de secciones).

Figura 4.2: Cobre estimado y datos de sondajes, validación visual

Figura 4.3: Comparación por deriva de cobre estimado y vecino más cercano en las coordenadas este, norte y cota.

Figura 4.4: Curvas tonelaje / ley de los modelos implícitos y explícito

Figura 5.1: Modelos implícitos de la subzona mineral de calcopirita del proyecto Mocha.

Figura 5.2: Modelos implícito 4.5 y modelo estático (extrusión de polígonos).

GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Modelo lineal

Gráfico 3.2: Modelo Esferoidal

TABLAS

Tabla 1.1: Dataciones radiométricas de pórfidos de yacimiento Mocha

Tabla 3.1: Campañas de perforación desarrolladas entre 1963 y 2055 en el proyecto Mocha.

Tabla 3.2: Codificación de mapeo para contenido de calcopirita

Tabla 4.1: Metros de sondajes contenidos en sólidos de modelos

Tabla 5.1: Comparación del tonelaje de los modelos implícitos

RESUMEN

El modelamiento implícito permite generar rápidamente modelos geológicos representativos con los resultados de estudios de prospectos o blancos de exploración, logrando determinar a corto plazo el potencial, expresado en volumen y/o tonelaje de cuerpos mineralizados en diferentes etapas de exploración, y en función de la calidad y cantidad de información disponible.

Este estudio se enfocó a determinar la aproximación de tonelaje en el cuerpo de calcopirita (primario) del proyecto Mocha, bajo diferentes modelos implícitos (implícito) generados, considerando la variación de parámetros específicos, y comparándolos con un modelo 3D (explícito) generado por la extrusión de secciones geológicas del mismo proyecto. El cálculo de tonelaje, se realizó a través de un modelo de bloques estimando, según cada modelo geológico implícito de acuerdo con parámetros similares.

Los resultados del estudio, permiten determinar una variación máxima del 13% y mínima de 0,1% del tonelaje del cuerpo de calcopirita entre un modelo geológico implícito y uno extruido. Por lo tanto, se puede concluir que los modelos implícitos son una herramienta potente para generar modelos geológicos 3D rápidamente, siendo estos dinámicos y flexibles para la interpretación y logrando obtener estimaciones de potencial en un corto plazo, apoyando la toma de decisiones de manera oportuna.

INTRODUCCIÓN

Un proyecto de exploración necesita de un “modelo geológico” para cuantificar y verificar la continuidad o no del proyecto. Para el caso de exploraciones, es central tomar decisiones en función del conocimiento geológico y en el momento oportuno.

El conocimiento y experiencia de los profesionales geólogos, puede ser aplicado mediante las nuevas herramientas informáticas disponibles en el mercado para la generación de modelos geológicos 3D, los cuales permiten en etapas tempranas breves, la obtención de varios escenarios posibles de interpretación de modelos en base a datos de sondajes.

Se propone este estudio para sensibilizar los resultados de las estimaciones de recursos en base a modelos geológicos 3D “implícitos” (Cowan, et al. 2003), los cuales generan sólidos bajo controles geológicos específicos, y utilizan funciones matemáticas basadas en las distancias de las muestras para calcular los contactos entre distintas unidades. Este método es ágil, modificable, actualizable y rápido, permitiendo disponer de rangos de recursos potenciales de manera expedita, en comparación con el uso de modelos tradicionales o “explícitos”, los que requieren de largas horas de trabajo.

El estudio de sensibilidad de modelamiento implícito, se desarrolló en el cuerpo primario de calcopirita del proyecto Mocha, Región de Tarapacá, Chile.

El objetivo de este estudio es verificar el efecto en el potencial de recursos geológicos de Mocha (cuerpo de calcopirita), según distintos modelos geológicos 3D, generados a través de modelamiento explícito (estático) e implícitos (Cowan et al. 2003), con ello se pretende:

- Comparar el potencial de recursos geológicos entre un modelo geológico 3D explícito e implícito.
- Comparar el potencial de recursos geológicos entre diversos modelos geológicos implícitos, variando métodos de interpolación y parámetros, como es alcance de la continuidad de la variable geológica a interpretar, tipo de “drift” (grados de los polinomios en el modelo).
- Explicitar las ventajas del modelamiento implícito y su efecto en la toma de decisiones en proyectos de exploración.

Para este estudio, se utilizaron los softwares Leapfrog Mining para la generación de los modelos implícitos, y el software Vulcan para la generación de un modelo geológico estático, en base a la interpretación Chiang et al 2006.

Se generaron 9 modelos implícitos del cuerpo de calcopirita del proyecto Mocha. Los parámetros variables corresponden al alcance de la interpolación “esferoidal”, entre 300 a 500 m, variación en el método de “drift”, de “clip”, y de método de interpolación (lineal y esferoidal).

Se generó un modelo “explícito”, o estático, utilizando la herramienta de “extrusión” del software Vulcan, la que consiste en generar sólidos a partir de polígonos en una sección, según su alcance, logrando así sólidos ortogonales a la sección, pero que no tienen continuidad entre los límites de los alcances de cada sección. Este tipo de modelamiento se denomina explícito o estático, debido a la necesidad de actualizar las secciones y/o plantas, según nuevos datos de sondajes, permitiendo modificar los polígonos originales, para finalmente generar las extrusiones.

Luego de disponer de los modelos 3D del cuerpo de calcopirita, se procedió a estimar la ley de cobre y sus tonelajes, para comparar las diferencias o aproximación al modelo “explícito”. Por motivos de confidencialidad, a los resultados de tonelaje y ley se les aplicó un factor, y la comparación se realiza en porcentaje, por lo tanto la diferencia se mantiene.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DE PROYECTO MOCHA, I REGIÓN

1.1 Ubicación y accesos

El proyecto Mocha, se ubica en la Quebrada de Tarapacá a 150 km de Iquique y a 25 km al NNW del Cerro Colorado, a una cota de 2.170 m. Se ubica en la Franja de los Pórfidos Paleocenos reconocida en Chile, desde Spence hasta Cerro Colorado, y se prolonga hasta Toquepala y Cuajones, en Perú. El acceso se hace mediante la carretera internacional R-5, a 70 km desde Huara, se toma desvío hasta Quebrada Tarapacá. (Figura 1.1).

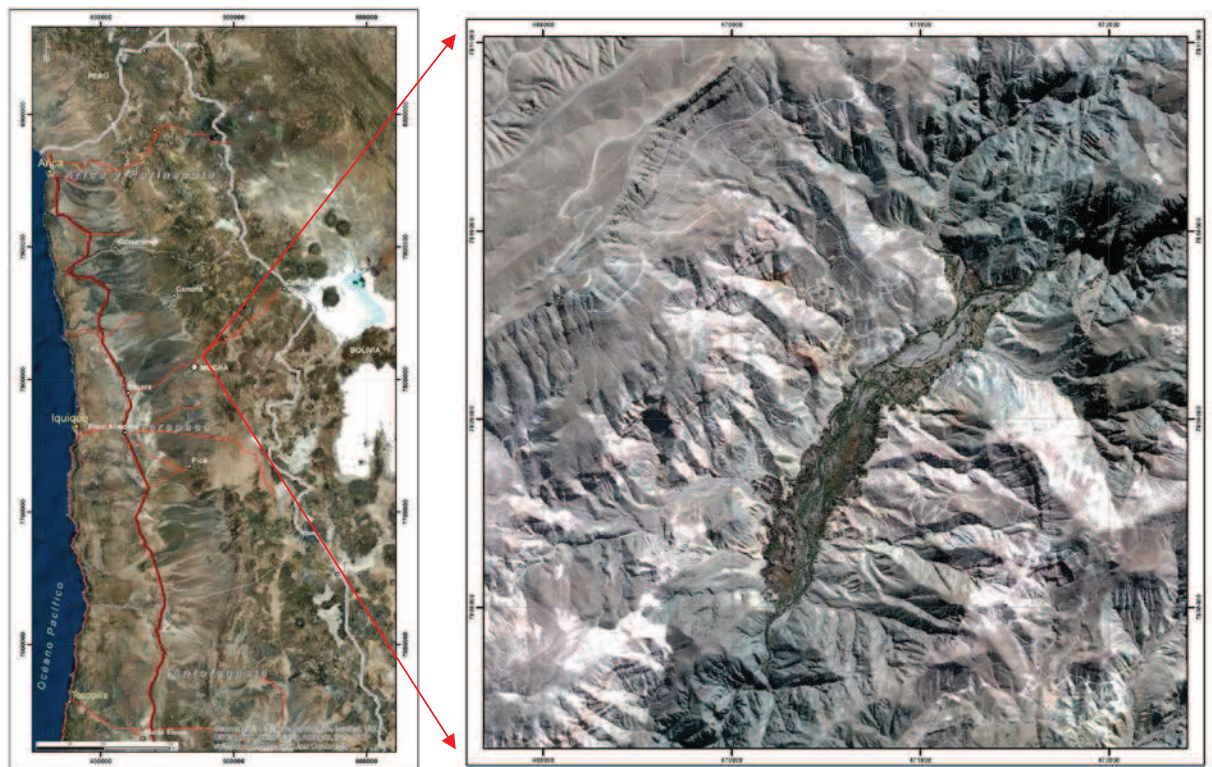


Figura 1.1: Ubicación proyecto Mocha

1.2 Antecedentes

El proyecto Mocha, desde el año 1963 ha sido foco de trabajos de exploración por diversas empresas, entre ellas Naciones Unidas, quien detectó a través de sondajes, mineralización de sulfuros (pirita, calcopirita y calcosina) con leyes superiores a 0,5% Cut. Durante el año 2003, Codelco adquiere la “opción de compra” y desarrolla estudios de superficie y subsuperficie hasta el año 2005, con el objetivo de concretar un cuerpo mineralizado atractivo para la Corporación. A la fecha el proyecto se encuentra en etapa de revisión.

Algunos trabajos desarrollados en proyecto Mocha, corresponden a:

- Naciones Unidas - I.I.G. 1963-1967, efectúa estudios geológicos y geoquímicos de suelos y de roca, y 6 pozos diamantinos (aprox. 480 m).
- Minera Conoco Chile, 1982, realiza mapeos geológicos, geoquímica, geofísica IP y perfora 11 pozos diamantinos (4.944 m) y 3 sondajes aire-reverso (843 m).
- Asarco, 1995, perfora 33 pozos aire-reverso (4.681 m)
- Oregon y Chilean Exploration Mining Company, 1997, explora alrededor del proyecto mediante mapeos de superficie.
- RSMI y Teck Corporation, 1998, perfora 6 pozos aire-reverso (1.000 m)
- GCEX, Codelco, 2003, adquiere opción de comprar y desarrolla trabajos de análisis de información.
- GCEX, Codelco, 2003. Revisa información geológica de terceros y la evaluación de recursos históricos del Proyecto Mocha.
- GCEX, Codelco, 2003. Realiza mapeo geológico a escala 1:2.000
- GCEX, Codelco, 2003- 2004. Efectúa el re-mapeo de 4.995 m de sondajes diamantinos antiguos.
- GCEX, Codelco, 2004. Perfora 16 pozos diamantinos (12.321 m)

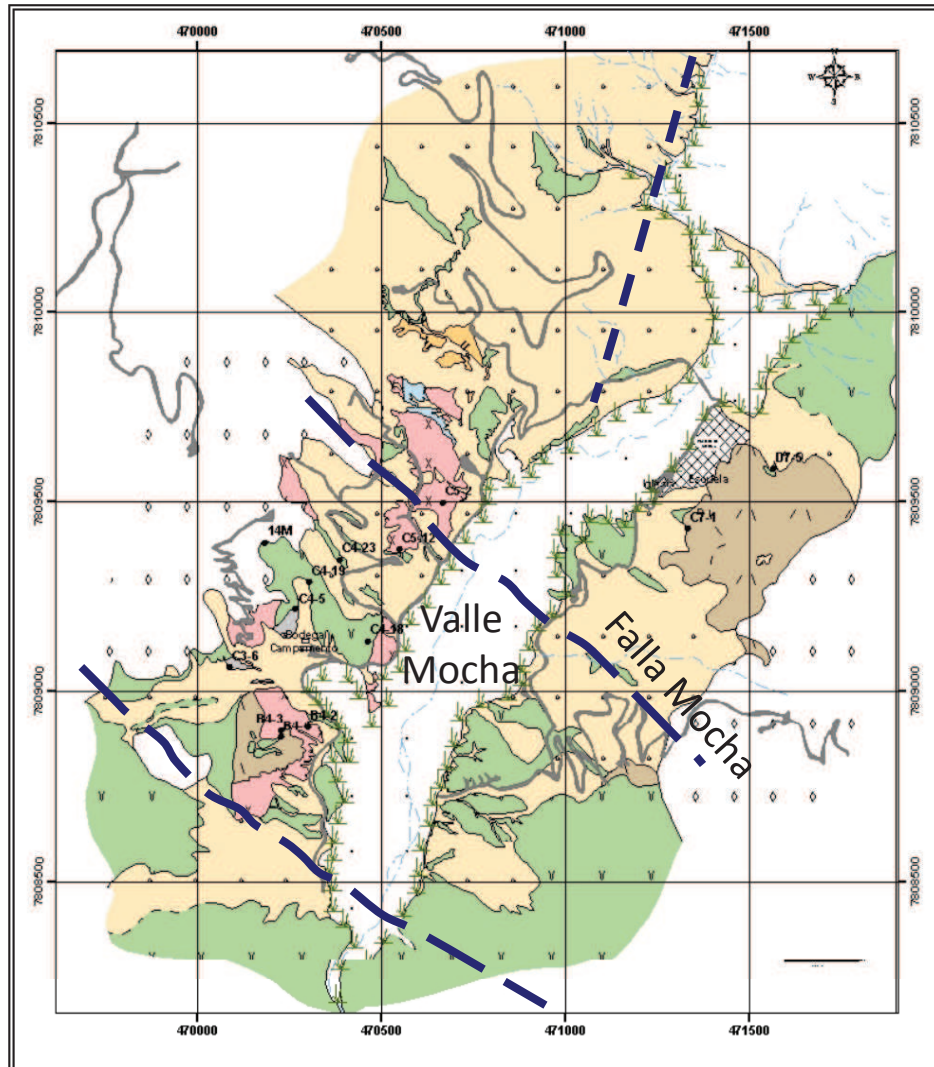
- GCEX, Codelco, 2004. Interpreta secciones y plantas para generar modelo geológico base y la evaluación preliminar de Mocha.
- GCEX, Codelco, 2005. Perfora 9 pozos diamantinos (6.749 m)
- GCEX, Codelco, 2005. Desarrolla mapeos geológicos de sondajes, interpretación geológica de 9 secciones diagonales y 8 plantas geológicas, escala 1:2.000 y estimación por Kriging Ordinario.
- GCEX, Codelco, 2006. Informe final de trabajos
- GCEX, Codelco, 2006. Estimación de recursos y potencial económico

Tomado de Chiang et al., 2006

1.3 Geología

El prospecto Mocha se ubica en la Franja de los Pórfidos del Paleoceno-Eoceno inferior, reconocida en el norte de Chile, como es el caso de Relincho, Spence, Cerro Colorado y en Perú, los yacimientos de Toquepala y Cuajones, con edades entre 66 y 52 Ma (Sillitoe, 1988) para los intrusivos porfíricos y alteraciones hidrotermales. Para la alteración sericitica del proyecto Mocha, existen dataciones con rango de edades de $58,0 \pm 2,6$ y $57,8 \pm 0,9$ Ma (Sillitoe, 1981).

Mocha corresponde a un pórfido Cu-Au semiaflorente, cubierto en los extremos NW y SE por rellenos terciarios. (Figura 1.2).



- Sobrecarga Post mineral Alto de Pica
- Pórfido Feldespático Tardío
- Pórfido Cuarzo Feldespático Intermedial
- Pórfido Feldespático Temprano
- Andesitas Formación Guaviña

Figura 1.2: Mapa geológico de proyecto Mocha (Tomado de Chiang et al., 2006)

La roca huésped está conformada por rocas volcánicas andesíticas (Formación Guaviña), en las cuales se emplazan tres eventos porfíricos (Chiang et al., 2006). Un pórfido temprano de feldespato-biotita, asociado a mineralización de cobre y oro; un segundo evento con un pórfido intermineral, relacionado a mineralización de molibdeno; y el último evento, un pórfido feldespático y restringido en volumen, sólo representado por diques, y con presencia de mineralización de sulfuros estériles (Chiang et al., 2006). Este sistema de pórfidos feldespáticos de Mocha, tienen edades radiométricas K/Ar en sericita, entre 61 y 55 Ma, respectivamente (informe interno Codelco). Estos pórfidos tienen un control estructural SE-NW, con dimensiones aproximadas de 2,5 km de largo.

Las rocas de la Formación Guaviña, están representadas por rocas volcánicas andesíticas con intercalaciones de tobas, areniscas y brechas con una edad U/Pb en circones de $72,1 \pm 0,4$ M.a. (Galli, 1957). Estas rocas están afectadas por estructuras NS a NE y SE-NW, las cuales definen la geometría del emplazamiento de los pórfidos. Posteriormente, existe un tercer evento estructural, representado por fallas secundarias conjugadas de dirección NNW, que propiciaron la canalización de las soluciones mineralizadoras y los eventos supérgenos posteriores (Chiang et al., 2006).

El Pórfido Temprano de Feldespato-biotita de edad K/Ar en sericita de 61 ± 2 Ma (este estudio), se caracteriza por una composición monzonítica a monzodiorítica, afectado por una fuerte alteración argílica, evidenciada en cristales anhedrales de ortoclasa. Los minerales de alteración son montmorillonita, agregados de clorita, sericita, trazas de calcita y ferromagnesianos reemplazados por biotita. En profundidad, está intruido por el pórfido Intermineral y por el Pórfido Tardío. En superficie, se observan óxidos de cobre y en profundidad, la mineralización es primaria, representada por

calcopirita y bornita, diseminada y vetillas. Este pórfido se asocia con mineralización de cobre y oro. (Chiang et al., 2006).

El pórfido Intermineral de Cuarzo-Feldespatos, de edad K/Ar en sericita de $58.4 \pm 1,5$ Ma (este estudio), se caracteriza por una composición dacítica-tonalítica, con fenocristales de plagioclasa y cuarzo y biotita cloritizada. En superficie se reconoce al norte y al noreste del área, teniendo su mayor expresión en profundidad. Está afectado por alteración sericítica moderada a intensa. Presenta frecuentes vetilleos y diseminaciones de anhidrita con altos contenidos de molibdeno y pirita. También, contiene algo mineralización de cobre (Chiang et al., 2006).

El último evento porfírico, corresponde a un pórfido de Feldespato-biotita Tardío, de edad K/Ar en sericita de $55 \pm 1,4$ Ma (este estudio, Tabla 1.1), se caracteriza tener una composición dacítica, con plagioclasa tipo andesinas y cristales de biotita alteradas a clorita, y por la presencia de diseminación de pirita. En superficie se observa en el sector NE, controlado por la falla Mocha; en profundidad, sólo se reconoce como diques verticales, intersectando todas las litologías anteriores. Es un pórfido estéril. (Chiang et al., 2006).

Tabla 1.1: Dataciones radiométricas de pórfidos de yacimiento Mocha

N° MUESTRA	U.T.M. NORTE	U.T.M. ESTE	MÉTODO	MINERAL	EDAD Ma.	Error 2 sigma	LITOLÓGÍA	REFERENCIA
776998	7,808,800	470,250	K-Ar	Sericita	55	± 1.4	Pórf. Tardío	este estudio (*)
776999	7,808,800	470,300	K-Ar	Sericita	58.4	± 1.5	Pórf. Intermedio	este estudio (*)
777000	7,809,300	470,700	K-Ar	Sericita	61	± 2	Pórf. Temprano	este estudio (*)

* Muestras analizadas en Sernageomin, Informe de datación radiométrica K-Ar N° 14/2006

Las rocas post minerales que se encuentran en el área, corresponden a una secuencia de rocas volcanoclásticas con intercalaciones de vidrio y gravas (aprox. 300 m espesor). En la base de la secuencia, se reconoce gravas

consolidadas (10 m), las que tentativamente podrían corresponder al Miembro Inferior de Sagasca (24 Ma?). Luego niveles de ceniza volcánica, 150 m de tobas, y 150 m de gravas (Chiang et al., 2006).

En Mocha, la alteración hidrotermal, está relacionada al sistema de pórfidos desarrollados. El pórfido temprano y en profundidad, se caracteriza por una alteración potásica-silicatada con biotita-actinolita y mineralización de pirita-calcopirita-bornita. Luego, a menor profundidad se desarrolló alteración argílica intermedia con biotita-sericita-clorita y mineralización de calcopirita-pirita, asociada al pórfido temprano e intermineral y en contacto con andesitas. En la parte alta del sistema, se reconoce alteración sericítica con mineralización de pirita-calcosina-covelina. Esta última alteración, se relaciona a óxidos de cobre y a la presencia del pórfido temprano; cuando existe el pórfido intermineral, la mineralización es de enriquecimiento secundario (Chiang et al., 2006).

Los minerales de alteración en superficie, representan relictos de una alteración argílica avanzada, caracterizada por montmorillonita-caolinita-alunita-sericita. En el entorno es evidente un halo propilítico con pirita, afectando principalmente a rocas volcánicas de la Formación Guaviña y al pórfido tardío (Chiang et al., 2006).

El sistema Mocha se caracteriza por la presencia de una zona primaria (sulfuros), y enriquecimiento secundario y óxidos de cobre en la parte superior. La mineralización primaria es la de mayor envergadura en el depósito, y se caracteriza por la presencia principalmente de calcopirita, pirita y trazas de bornita. El foco de esta tesis, se centra en la zona primaria, específicamente en la subzona mineral de calcopirita con intensidad moderada a intensa.

Esta zona primaria está representada por la presencia de calcopirita, pirita y trazas de bornita. El pórfido “temprano” es el responsable del mayor contenido de cobre y oro; el pórfido Intermineral aporta cobre y oro, pero en menor cantidad, destacándose la presencia de molibdeno en este segundo evento (Chiang et al., 2006).

La mineralización de cobre reconocida en el sistema pórfido cuprífero de Mocha, se despliega en una columna compuesta de una parte superior con mineralización de óxidos, mixtos y secundarios y otra parte inferior de sulfuros primarios.

La mineralización de cobre exótico, óxidos negros y lixiviados corresponden a cuerpos restringidos cercanos a la superficie, de preferencia en el sector SW del depósito. Se alojan en gravas de la Formación Altos de Pica, y están representados por copper wad, neotocita y crisocola, alcanzado entre 2 a 5 m de potencia. La presencia de limonitas se desarrolla en las estructuras y están representadas por goethita-hematita en la parte central, y por goethita-jarosita y jarosita-pirita hacia los bordes del depósito. La zona de óxidos está representada por la presencia de crisocola, atacamita y limonitas y se puede relacionar con el pórfido temprano. También, se evidencia, y reconocida sólo en sondajes, la existencia de una zona de enriquecimiento secundario, definida por la existencia de calcosina y covelina y asociada al pórfido intermineral de cuarzo-feldespatos (Chiang et al., 2006).

CAPITULO II

ORIGEN DE MODELAMIENTO IMPLÍCITO

El avance tecnológico, especialmente la computación, ha permitido generar herramientas para manejar grandes cantidades de datos, y facilitar la construcción de modelos tridimensionales en base a funciones matemáticas capaces de generar superficies y volúmenes.

Para la geología, y especialmente en exploraciones, obtener un modelo geológico tridimensional, robusto y ligado a los datos duros del modelo, y poder testear varias opciones de modelos en un corto plazo, según características geológicas, permite avanzar rápidamente en el entendimiento de los eventos, su cronología, y dimensiones, implicando al final del ciclo la determinación del potencial de recursos involucrado. De allí que, el modelamiento implícito es muy atractivo y versátil en la industria de las exploraciones.

Para la exploración, como también en minería, es fundamental disponer de un “modelo geológico”, bidimensional o tridimensional. Este modelo busca representar litología, alteración, isopleyas, zonas minerales y otros, en el espacio. La generación de un modelo geológico, facilita el entendimiento de los eventos y permite interpretar la morfología de las características del depósito, de acuerdo a la información disponible. Permite asociar variables diferentes, relaciones entre litología y alteración, con mineralización, entre otras. Es una herramienta conceptual fundamental para definir un depósito y poder caracterizarlo. Además, permite determinar volúmenes (potenciales) de contenido de alguna mineralización.

Para facilitar la labor de interpretación de variables en el espacio, se utiliza el método de modelamiento implícito, que permite modelar directo con los datos. Este método representa un verdadero salto en la generación de modelos desde

las interpretaciones 2D con plantas y secciones a la generación de “wireframes” tradicionales (Cowan et al., 2002, 2003, 2004, 2010)

2.1 Fundamento

El modelamiento implícito se inicia con la necesidad de representar y obtener gráficamente superficies escaneadas, suavizadas y que sean fieles al original.

El modelamiento implícito es un método para generar superficies utilizando funciones matemáticas dependiente de los datos y de los parámetros de control, definidos por el usuario. Este tipo de modelamiento puede ser utilizado en variables discretas (litología) también en variables continuas como son leyes geoquímicas.

Las funciones matemáticas utilizadas en el modelamiento implícito son las “Radial Basis Functions” (RBF), las cuales son las más eficientes en la interpolación de datos para generar superficies.

El concepto de modelamiento implícito fue introducido por Cowan (2003), pero la interpolación de datos fue por R. Hardy en el año 1971, en la interpolación de datos topográficos, y por R. Franke (1982) al ambiente de trabajo geológico.

Figura 2.1

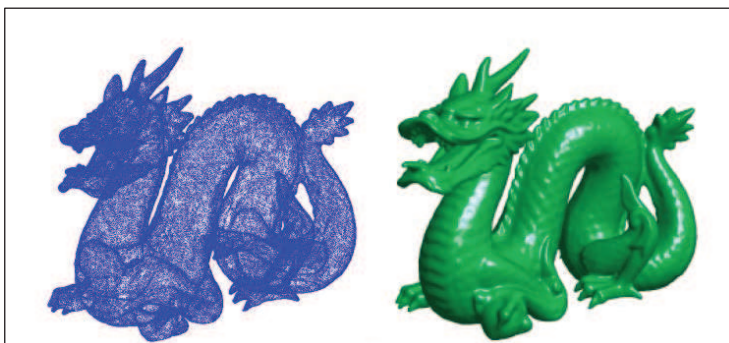


Figura 2.1: Ejemplo del escaneo de una escultura, los puntos obtenidos se interpolan y definen una superficie, cuya resolución y suavización sólo dependerá de la densidad de datos.

Las funciones matemáticas RBF, en general, representan la sumatoria de los pesos de las distancias de los datos en el espacio (Stewart et al, 2014). Por lo tanto, esta dependencia con los datos, convierte al modelamiento implícito en una ventaja contra el modelamiento tradicional (estático, secciones, plantas).

A continuación se describen los principales aportes científicos en el desarrollo de la metodología de modelamiento implícito

Desarrollo matemático

- a) **Hardy, R.1971** “Desarrollo matemático, representación de superficies y sólidos”: Se avanzó en la representación de superficies topográficas irregulares con el uso de ecuaciones de superficies multicuadráticas, basadas en puntos coordenados.
- b) **Duchon, J. 1975 (en Franke, 1982)**: Desarrolla funciones base similares a las multicuadráticas. Se emplea el término “thin plate spline”, que permiten lograr aproximaciones de las superficies muy similares y suavizadas.
- c) **Blinn, 1982**: Desarrollo el dibujo de superficies algebraicas. Las superficies tridimensionales paramétricas o implícitas, donde estas últimas deben cumplir con una función de x, y, z igual a 0. Para modificar las imágenes, o sombrearlas, se conoce x e y , se modifica la coordenada z y se obtiene un sombreado. Blinn desarrolló algoritmos para dibujar superficies curvas directamente de las definiciones matemáticas, en vez de dividir las en muchos polígonos.
- d) **Savchenko, et al. 1995**: Genera una aproximación para la reconstrucción de modelos geométricos y superficies en base a un set de puntos.

Representa un sólido a través de la función de diferencia $f(x,y,z) \geq 0$ con la superficie definida por la ecuación implícita $f(x,y,z)=0$, por lo tanto no es necesario incorporar información sobre la forma del objeto, sólo es necesario los puntos cartesianos que se utilizaran en la reconstrucción.

Modelamiento implícito

- a) **Bloomenthal, 1994:** Utilizó algoritmos de “poligonización” de superficies implícitas. El término poligonización implica aproximaciones de poligonales para definir una superficie implícita, la cual es creada desde la función de superficie implícita. Generó un software que desarrolla particiones y aproximaciones poligonales para modelar superficies implícitas. Combina la construcción de las funciones implícitas y la interpolación entre ellas.

- b) **Turk and O’Brien, 1999, 2002:** Desarrollan un nuevo método de transformación de formas usando funciones implícitas, logrando resolver la interpolación en $N+1$ dimensiones, uniendo la creación de funciones implícitas de superficies y la interpolación. Las superficies son más suavizadas y naturales. En 2002, introducen una nueva técnica de modelamiento utilizando interpolación de superficies implícitas, destacando los siguientes: se utilizan puntos directamente en la superficie implícita, transformación de modelos de polígonos a formas implícitas suavizadas. Figura 2.2

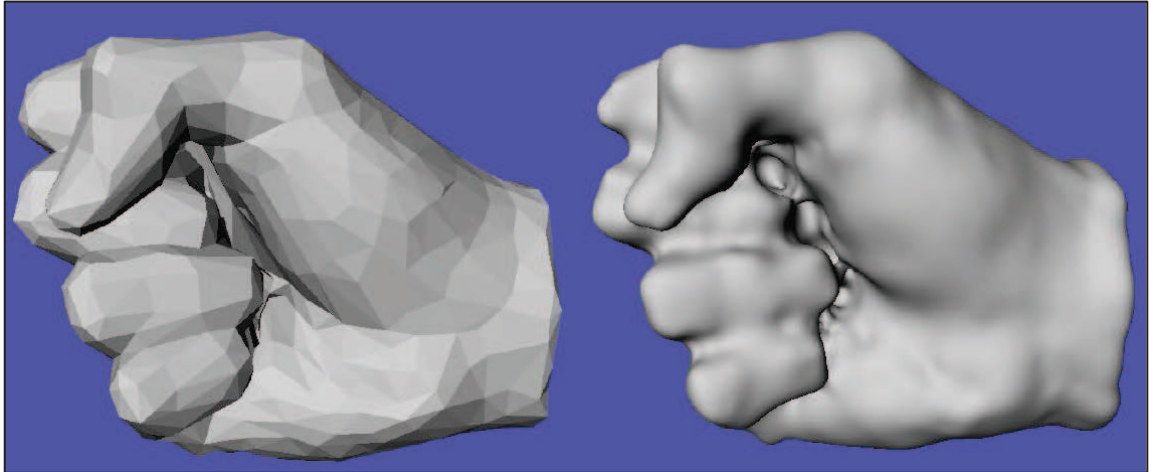


Figura 2.2: A la izquierda, una superficie generada por poligonales con 750 vértices, y a la derecha una superficie implícita creada por interpolación desde los polígonos (Tomado de Turk, O'Brien, 2002).

- c) **Carr et al., 2001, 2003:** Utilizan funciones de base radial (RBF) para construir superficies suavizadas desde un set de puntos. Con el avance computacional, es posible resolver funciones matemáticas complejas, como son la RBF, y este método permite interpolar un set de puntos sin distribución espacial uniforme.
- d) **Morse, 2001:** Describen los métodos algebraicos para la generación de modelos complejos utilizando combinaciones lineales de funciones de base radial.

Modelamiento Geológico implícito

- a) **Cowan et al., 2002:** Generación de modelos tridimensionales con funciones de base radial, utilizando datos de sondajes (datos 3D). indica que el nuevo software Leapfrog TM permite desarrollar rápidamente varios modelos y controlar parámetros geológicos.

- b) Cowan et al., 2003:** Introducen el término “Modelo geológico implícito”. Es posible utilizar los datos de sondajes para ser aplicados en las funciones de base radial y generar modelos geológicos tridimensionales. Esta metodología se contrasta con el método tradicional, denominado explícito o estático, y que se basa en la utilización de secciones y/o plantas geológicas para conformar sólidos utilizando gran cantidad de horas de trabajo en la digitalización. El modelamiento implícito define una función tridimensional continua, y que en el caso de la geología, puede describir la distribución de leyes o litología. Cowan, también utiliza funciones de base radial (RBF) para la interpolación tridimensional (Hardy, 1971), funciones desarrolladas en paralelo, pero independiente a la teoría de “variables regionalizadas” por Matheron (1963).
- c) Cowan, 2004:** Describe el software Leapfrog TM para modelamiento implícito, que fue lanzado al mercado en el año 2003, además describe las ventajas de este tipo de modelamiento.
- d) Cowan, 2011:** Presenta el modelamiento geológico implícito como la herramienta de apoyo en el desarrollo de los modelos tridimensionales. Indica los resultados en la construcción de un modelo tridimensional utilizando el método tradicional o estático y el método implícito, demandando 43 días el primero, contra 26 horas en el segundo.
- e) Cowan, 2012:** Releva la importancia de considerar los modelos estructurales para optimizar los modelamientos implícitos.
- f) Cowan, 2014:** Comenta que muchas compañías de exploración no consideran el modelamiento geológico 3D, como una herramienta

potente y que puede ser integrada a sus trabajos. Muchas empresas se estancaron en los años 90's, lo cual podría significar pérdidas millonarias para el avance de sus estudios.

- g) Stewart et al., 2014:** Realiza una comparación entre la estimación de leyes (variable continua) por Ordinary Kriging (OK) y por modelamiento implícito (funciones de Base Radial), concluyendo que los resultados son similares. La utilización funciones de base radial (RBF) para estimar leyes es posible, ya que son sumatorias ponderadas en cada punto del espacio. Por lo tanto, con esta metodología, se obtiene leyes en cualquier punto no muestreado, y así generar en una malla regular para un modelo de bloques.

2.2 Descripción del método

La gran ventaja del modelamiento implícito es la utilización de todos los datos disponibles, es ágil, modificable y actualizable, permitiendo testear varios escenarios posibles de modelos geológicos, de esta manera, es posible evaluar opciones y seleccionar la mejor, según la información disponible.

El modelamiento implícito es una metodología para generar superficies considerando los datos y parámetros establecidos por el usuario en base a funciones matemáticas específicas de volumen. Se puede aplicar a variables categóricas (ejemplo: litología), como también a variables continuas en el espacio (ejemplo: leyes geoquímicas). Las funciones matemáticas más eficientes para el modelamiento implícito son las "Radial Basis Functions" (RBF). El término "implícito", se utiliza debido a que la superficie modelada existe "implícitamente" con las funciones matemáticas de volumen como una iso-superficie definida por los datos, en vez de un proceso explícito de interpretación de secciones y/o plantas (Stewart et al, 2014).

Actualmente, el modelamiento implícito se utiliza ampliamente para modelar variables categóricas con datos de sondeos y para generar superficies de isopleyas (variables continuas), y por ende puntos o bloques de leyes estimadas. (Stewart et al., 2014).

Los resultados de una estimación con Kriging Ordinario y con funciones matemáticas RBF (modelos implícitos) son muy similares, debido a que matemáticamente son equivalentes. Las funciones RBF poseen el mismo rol que los variogramas en el Kriging. La selección del tipo de RBF a utilizar para modelar, tiene el mismo impacto que el modelo de variograma a utilizar en Kriging.

Con el objetivo de optimizar los interpoladores de superficies, la empresa Aranzs Geo (Leapfrog) ha desarrollado y aplicado a su software la combinación de funciones, permitiendo disponer de parámetros para generar superficies y caracterizar controladamente la interpolación. Por este motivo, se eligió a este software para el presente estudio.

2.3 Ejemplo de Modelamiento Implícito

Estas funciones matemáticas definen una superficie al determinar todos los puntos contenidos a una distancia "0" entre dos set de datos, por lo tanto desde un punto "x", se calcula la distancia más cercana al contacto. Como ejemplo en la Figura 2.3, se observa una sección vertical de un cuerpo mineral, donde las líneas azules representan el estéril y líneas rojas la mena. Para calcular la superficie que representa el contacto entre mena/estéril, se busca la distancia=0 entre ambos conjuntos de datos. Al utilizar las RBF, se calculan todas las distancias en las tres dimensiones del espacio.

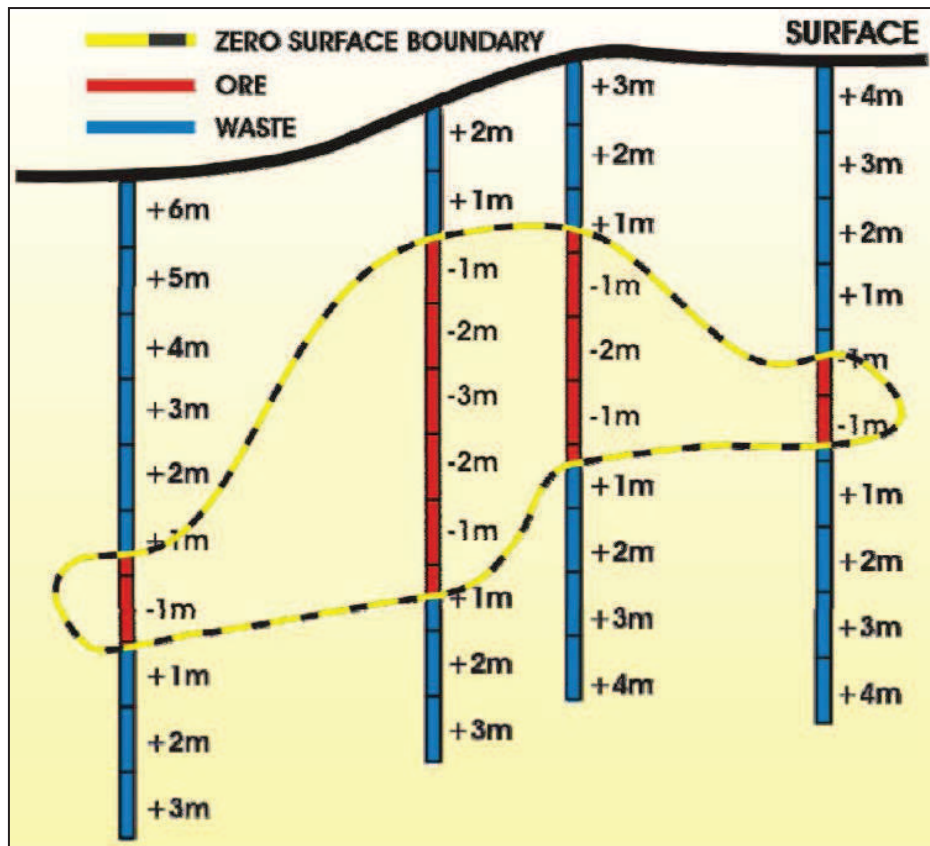


Figura 2.3: Ejemplo gráfico del resultado de Radial Basis Functions (RBF), para la interpolación de superficies, determinando la “superficie de valor 0”, que corresponde al contacto entre dos categorías de datos. Tomado de Riquelme (2011).

Se pueden revisar algunas publicaciones relacionadas con el Modelamiento Implícito y la aplicación de Radial Basis Function (RBF) para la interpolación de superficies en el capítulo VII Referencias.

2.4 Ventajas

Como se menciona anteriormente, en los trabajos de exploración es de suma importancia los tiempos de trabajo, obtener resultados rápidos puede representar la viabilidad de un proyecto, por lo tanto disponer de un modelo geológico tridimensional y dependiente del 100% de los datos, permite maximizar los resultados, como también optimizar los recursos económicos.

Con el modelamiento implícito es posible obtener un modelo geológico tridimensional, robusto y ligado a los datos duros, y poder testear varias opciones de modelos en un corto plazo, según características geológicas, y de esta manera facilitar el avance en el entendimiento de los eventos, cronología, y dimensiones, y como consecuencia poder estimar un potencial de recursos.

Las principales ventajas del modelamiento implícito son:

- Los modelos dependen 100% de los datos
- Es factible procesar gran cantidad de datos
- No es necesario digitalizar información. Se puede utilizar secciones de control.
- Se logra un modelo tridimensional más rápido que con el método tradicional “estático”.
- Se incorporan parámetros para configurar la geología en la interpolación de superficies.
- Se pueden obtener varios modelos geológicos 3D rápidamente, permitiendo probar varios distintos escenarios.
- Es factible controlar la resolución de las superficies
- Un modelo geológico es fácilmente actualizable, sólo se debe incorporar los datos de sondajes, actualización automática.
- Es fácil revisar la trazabilidad del proceso de interpolación
- Optimiza recursos

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN MODELOS 3D ZONA MINERAL CPY 3-5 MOCHA

Este capítulo describe los modelos geológicos tridimensionales de Mocha, el original del año 2006, generado a través de modelamiento explícito, utilizando secciones y plantas y la generación de los sólidos con la extrusión ortogonal de los polígonos de cada sección geológica. También, describe los modelos implícitos 2013-2014 (este estudio) con la aplicación de diferentes parámetros para configurar la interpolación.

Para este estudio se consideró adecuado enfocarse en el cuerpo mineralizado y caracterizado por tener el contenido más alto de calcopirita. La metodología de mapeo de sondajes del proyecto Mocha, captura el contenido de ciertos minerales en base a la “intensidad”, desde “ausente” hasta “intenso”.

El estudio se enfocó al cuerpo de mineralización primaria, conformado por intensidades de calcopirita de moderado (3) a Intenso (5). El total de metros de sondajes perforados en el proyecto entre los años 1982 y 2005 corresponde a 30.175 m (Tabla 3.1). Debido a la confidencialidad de la información en este documento no se detallará información de sondajes ni ubicación espacial.

3.1 Descripción Base de Datos de Modelo Geológico Explícito 2006

El total de metros perforados en este proyecto entre los años 1963 y 2005, corresponden a 30.175 m, de los cuales solamente 7.660 m aproximadamente, están contenidos en el cuerpo de calcopirita de intensidades 3-5 (cpy 3-5).

Figura 3.1

Tabla 3.1: Campañas de perforación desarrolladas entre 1963 y 2055 en el proyecto Mocha.

CAMPAÑA	N° POZOS	DDH	AR
1963	6	480	
1982	11 DDH, 3 AR	4,944	843
1995	33	4,681	
1998	6	1,000	
2004	16	12,321	
2005	9	6,749	
TOTAL	84	30,175	843

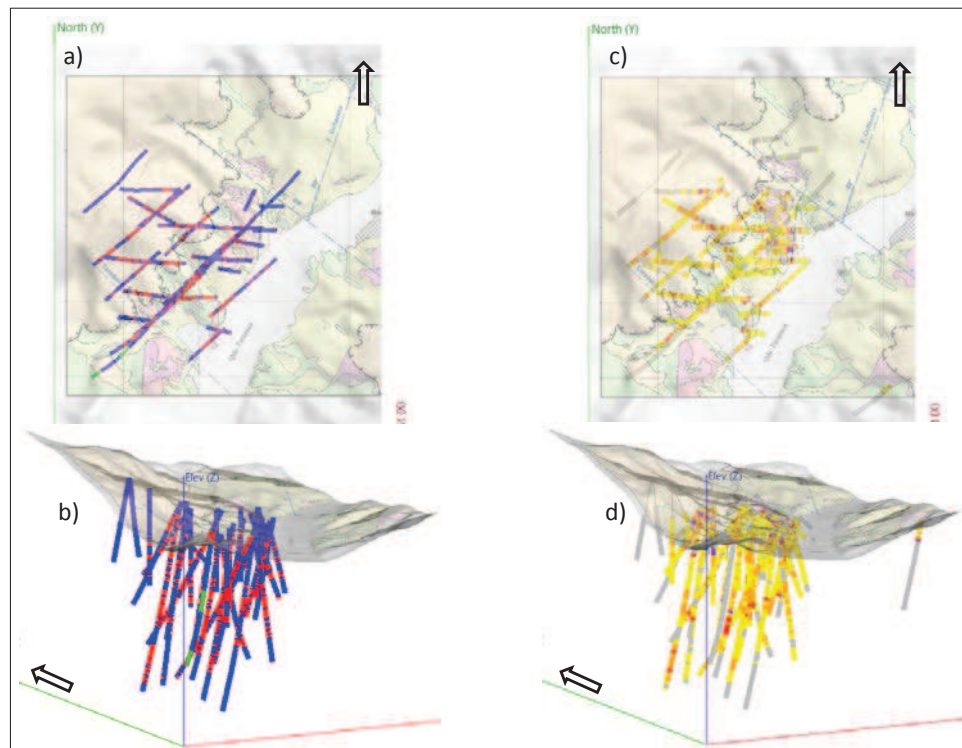


Figura 3.1: Vista en planta y 3D de sondajes Mocha con información de contenido de calcopirita (a, b), y contenido de cobre (c, d).

El modelo geológico tridimensional del año 2006 del proyecto Mocha, se basó en la interpretación de la geología de superficie a escala 1:2.000, 9 secciones SW-NE espaciadas entre 100 y 125 m y sobre la cota 1.000 m s.n.m., y 8 plantas cada 100 m (Chiang et al., 2006). Figura 3.2 y Figura 3.3.

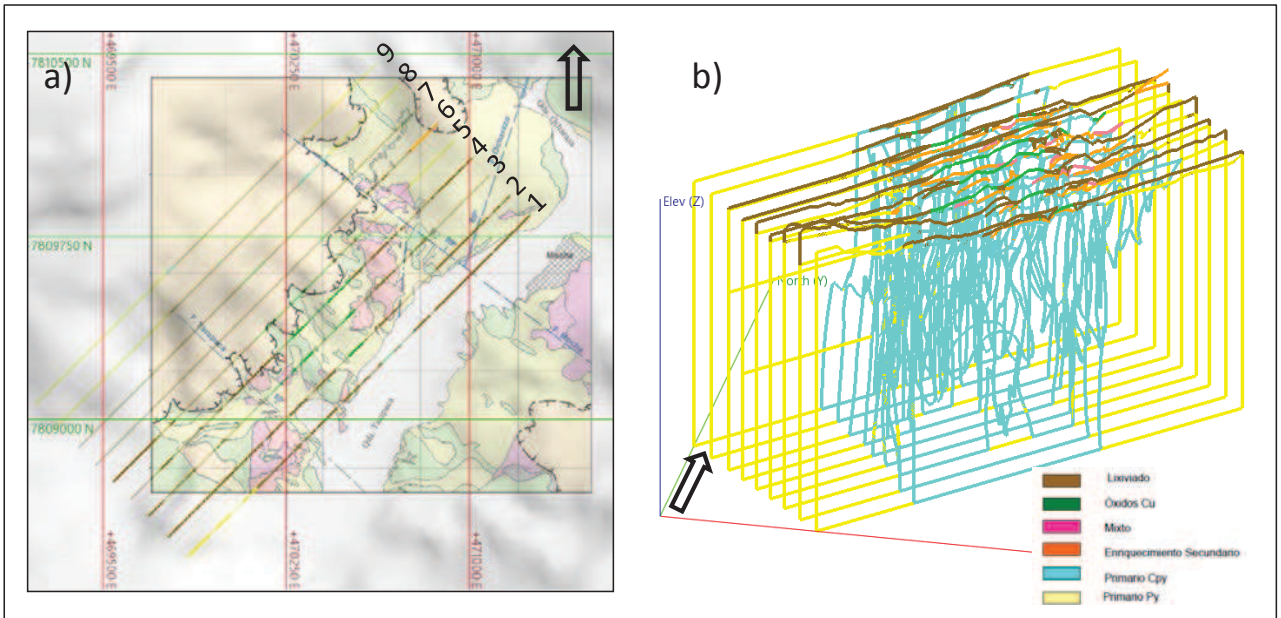


Figura 3.2: En a) se observa mapa de superficie Mocha con traza de secciones geológicas SW-NE. En b) en vista 3D se observa los polígonos de zona mineral.

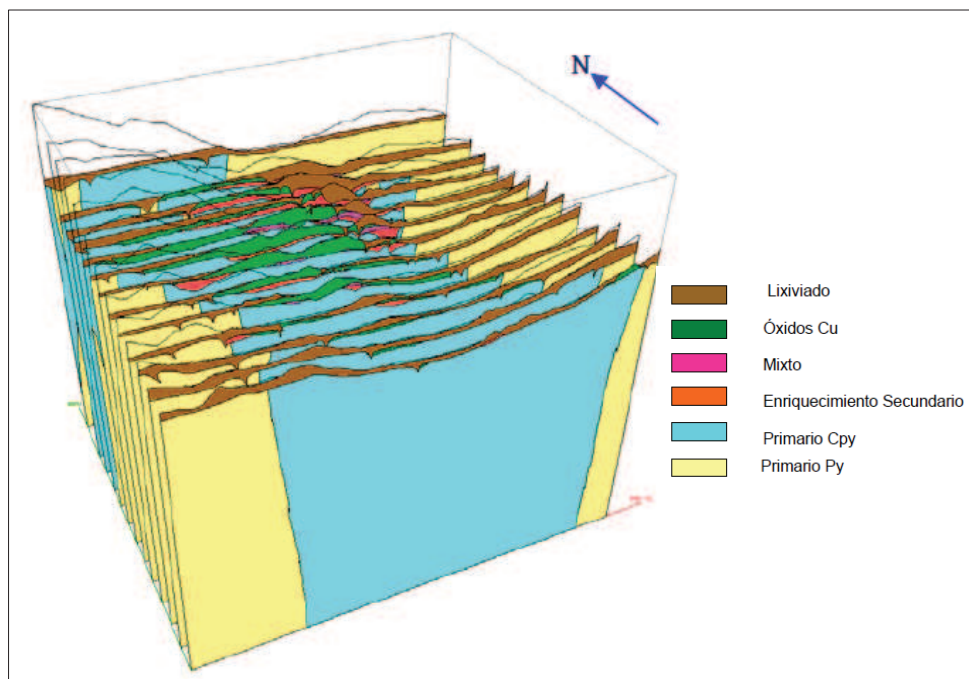


Figura 3.3: Modelo explícito de zona mineral 2006 de proyecto Mocha (Chiang et al, 2006).

3.2 Descripción de Modelo Geológico 3D Explícito 2006

En la Figura 3.2 (a) se observa el mapa geológico de Mocha con las trazas de las 9 secciones (1:2.000) que se utilizaron para la interpretación. Además, en la Figura 3.2 (b) en una vista 3D, se observan los polígonos de la zona mineral de cada sección. Esta información proviene de la interpretación tradicional de sondajes en secciones, extrapolando la información de sondajes entre las secciones. La distribución del cuerpo primario de calcopirita 3-5, y foco de este estudio, corresponde a cuerpos subverticales con una tendencia de la mineralización en orientación NW-SE (N 315° azimuth). En la Tabla 3.2 se aprecia la codificación para mapeo de sondajes.

Tabla 3.2: Codificación de mapeo para contenido de calcopirita

INTENSIDAD	
100	SIN RECUPERACIÓN
0	AUSENCIA
1	TRAZA
2	DEBIL
3	MODERADO
4	FUERTE
5	INTENSO

Para la construcción del modelo geológico 3D del proyecto Mocha 2006, se utilizó el método tradicional (explícito), interpretando litología, alteración, zona mineral, estructuras, etc., por medio de 9 secciones SW-NE, espaciadas entre 100 y 125 m, ortogonales al trend de los pórfidos, y 8 plantas cada 100 m para controlar el modelo en la vertical. Cada planta y sección fue digitalizada con el software Gemcom, y se atribuyó cada polígono según correspondía la

información (litología, alteración, zona mineral, etc.). Una vez digitalizada la información, se utilizó la herramienta “extrusión” de Gemcom para generar los sólidos a partir de los polígonos de cada sección y su alcance (Figuras 3.4 y 3.5), generando el modelo 3D desde superficies planas (secciones) a sólidos (volumen).

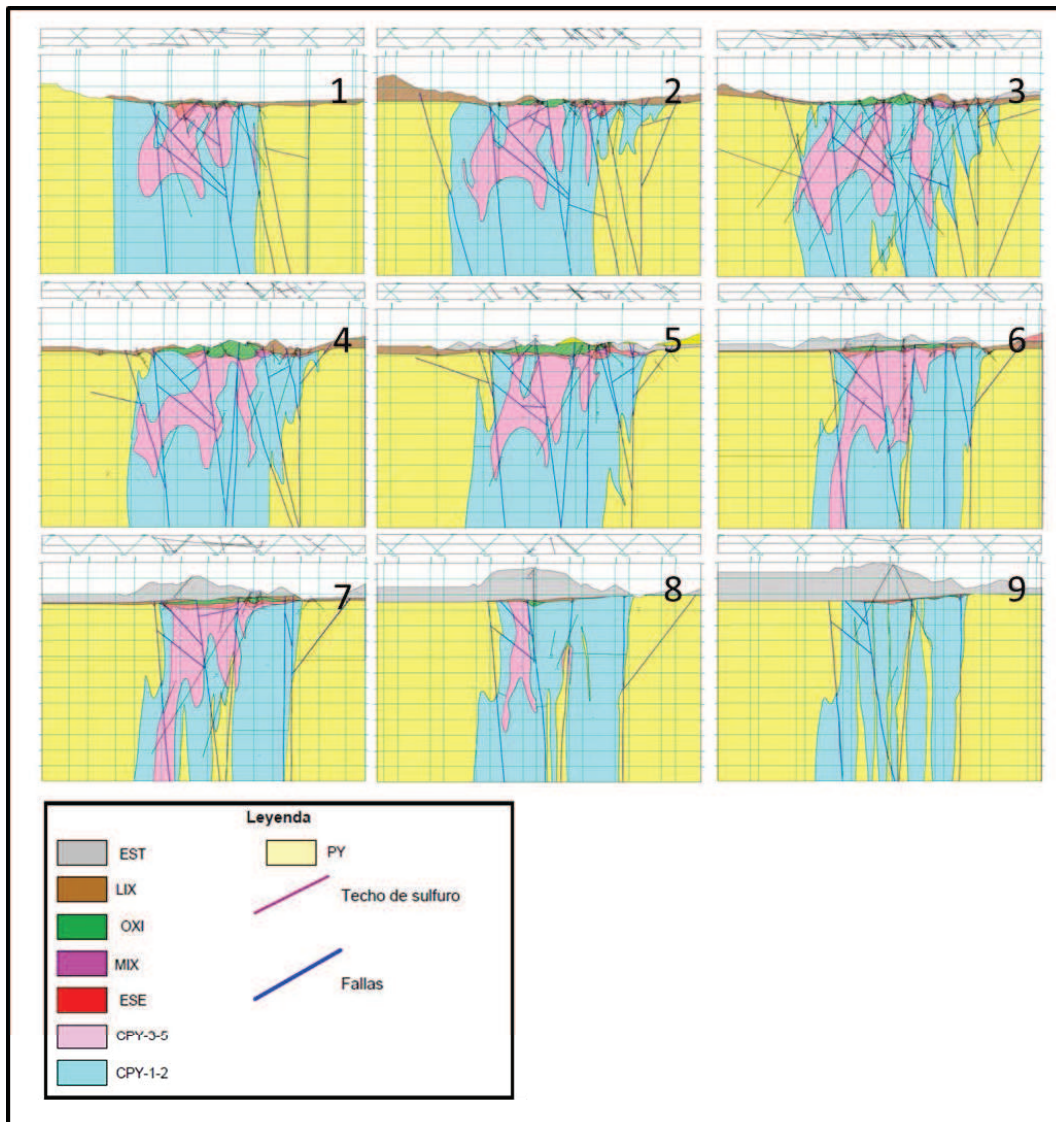


Figura 3.4: Secciones de zona mineral del proyecto Mocha (Chiang et al., 2006)

El modelo de zona mineral 3D año 2006, generado a través de la “extrusión” de los polígonos contenidos en cada sección (Figura 3.5), muestra una continuidad no natural entre las secciones y no considera el 100% de la información de los sondajes entre las secciones. Por este motivo, el “modelamiento implícito” es una herramienta potente para construir modelos tridimensionales que respeten las bases de datos y representen la continuidad natural de las variables en el espacio.

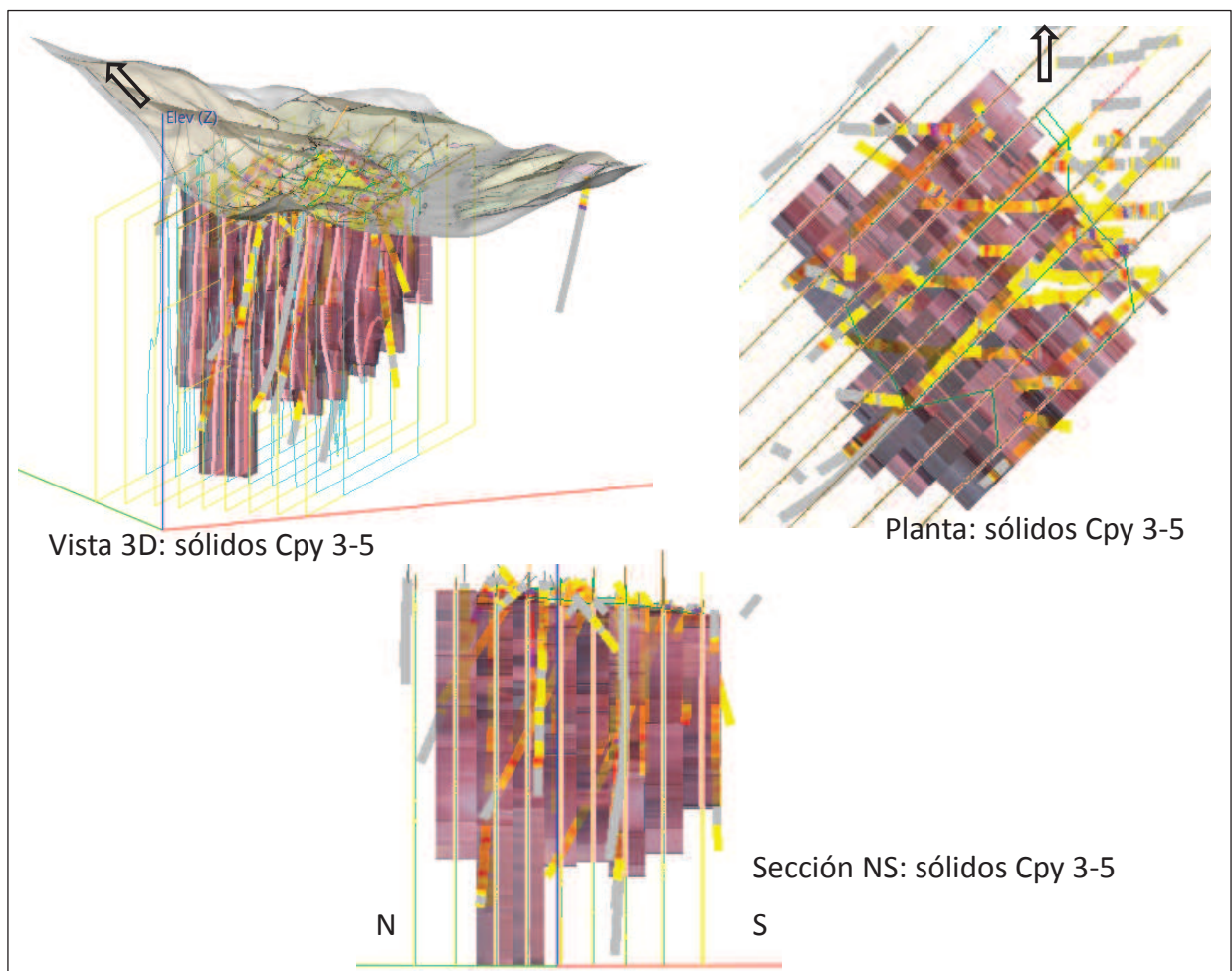


Figura 3.5: Sólidos del modelo 3D “explícito” Mocha 2006, cuerpo de calcopirita 3-5 (Cpy-3-5), vista en 3D, planta y una sección NS vista desde el W.

La metodología utilizada en el modelo 2006, corresponde a la tradicional, utilizando secciones y plantas para interpretar y configurar la geometría e un depósito. La generación de los sólidos empleada con el software Gemcom (extrusión de polígonos) es simple, y principalmente la inversión de tiempo está enfocada a la interpretación de cada sección y planta y la digitalización de estas. También, en la metodología tradicional o “explícita”, se pueden generar sólidos que representen la continuidad en el espacio de las variables. Es muy similar a la descrita anteriormente, pero la diferencia está en la unión de los polígonos de distintas secciones manualmente, a través de “tie lines” (Figura 3.6). Esta metodología requiere de muchas horas de trabajo, y tampoco se vincula 100% a los datos, y al incorporar información nueva, se debe iniciar el ciclo de construcción digital del modelo, desde la digitalización de las secciones y plantas.

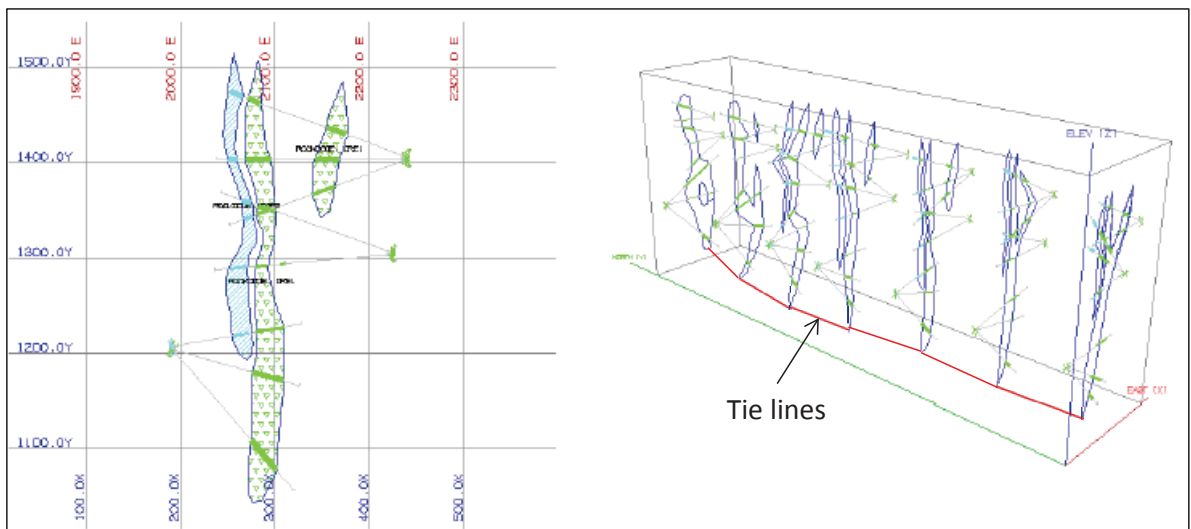


Figura 3.6: Ejemplo de construcción de sólidos utilizando “tie lines” entre secciones (Tomado de Riquelme, 2011).

3.3 Generación Modelos 3D Implícitos

Este estudio tiene por objetivo comparar modelos geológicos 3D generados a través de dos distintas metodologías, por modelamiento “explícito” y por modelamiento “implícito”. Este capítulo describe la metodología para construir los modelos implícitos de la zona mineral de calcopirita de intensidades 3 a 5 (Cpy 3-5) del proyecto Mocha. Para construir los modelos implícitos se utilizó la base de datos de sondajes de las campañas de exploración desarrolladas durante el periodo 1982-2005.

La mineralización del proyecto Mocha (Capítulo 1.3), se caracteriza por la presencia pequeños cuerpos de óxidos, mixtos y enriquecimiento secundario, y el primario por la ocurrencia de calcopirita y pirita (Figura 3.3). Este primario se subdivide en tres cuerpos: calcopirita de intensidad 1 a 2, calcopirita de intensidad 3 a 5 y un cuerpo de pirita (estéril).

En la Figura 3.1 (a) y (b) se observa el mapa geológico de Mocha y sondajes con información de contenido de calcopirita 3-5, vista en planta y 3D. En (c) y (d) se observa mapa geológico de Mocha con leyes de cobre, vista en planta y 3D. La distribución del cuerpo primario de calcopirita 3-5, y foco de este estudio, corresponden a cuerpos subverticales con una tendencia de la mineralización en orientación NW-SE (N 315° azimuth). El total de metros perforados en este proyecto entre los años 1982 y 2005, corresponden a 30.175 m, de los cuales solamente 7.660 m están contenidos en el cuerpo de calcopirita de intensidades 3-5 (cpy 3-5).

Para la construcción de los modelos de zona mineral 3D “implícitos” del proyecto Mocha, se utilizó la intensidad de ocurrencia de calcopirita 3 a 5 (cpy 3-5) de los sondajes. Para la construcción de los cuerpos de lixiviado, óxidos, enriquecimiento secundario y mixtos, se utilizaron los polígonos originales de

las secciones (modelo explícito). Por lo tanto, solamente la zona mineral cpy 3-5 y cpy 1-2 están generadas en su totalidad por la interpolación de datos de sondajes.

En este estudio se utilizó el software Leapfrog Mining para el modelamiento implícito, ya que posee herramientas robustas para la interpolación de datos y parámetros para configurar las características geológicas de los cuerpos.

Cada modelo implícito se generó en base a los datos duros de cada sondaje, los mismos del modelamiento explícito (Chiang et al., 2006). Los datos de sondajes están atribuidos según la zona mineral, siendo el primario caracterizado por Cpy 1-2, Cpy 3-5 y Py. Para generar los sólidos en Leapfrog, primero se deben crear superficies por interpolación de los datos, según las características geológicas correspondientes. Luego, cada una de las superficies se intersectan contra un sólido inicial y se obtienen los sólidos de cada zona mineral. En la Figura 3.7 se puede observar la distribución de las muestras de sondajes con intensidad de Cpy 3-5 (color rojo).

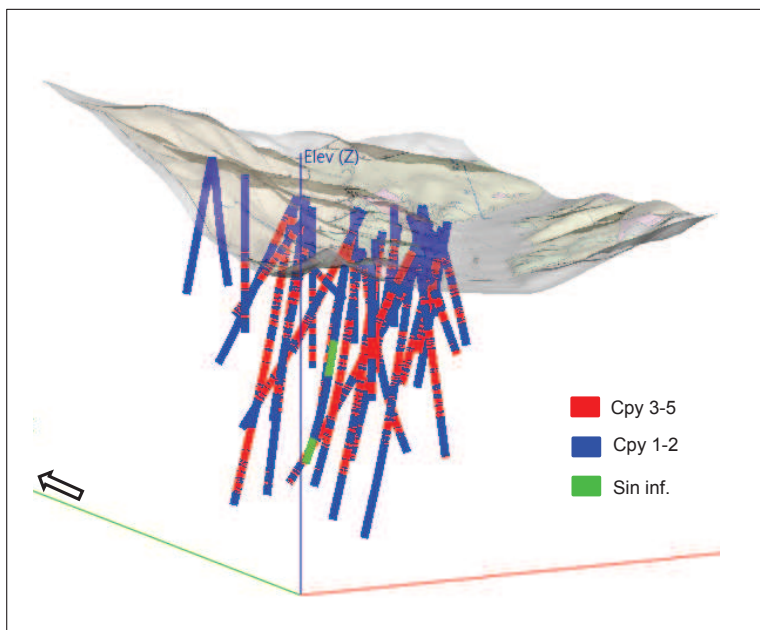


Figura 3.7: Vista 3D de mapa de superficie de Mocha y sondajes con datos de intensidad de calcopirita.

Según la descripción del ítem 2.3, se destaca que las superficies se construyen determinando una “isosuperficie 0” que representa una superficie de contacto entre dos litologías, alteración, o cualquier otro parámetro que se desee interpolar.

Para la construcción de modelos implícitos y dependiendo de la densidad de datos de sondajes, ocasionalmente es necesario incorporar “polilíneas” para forzar la interpolación de los datos en búsqueda de generar una superficie que satisfaga el modelo conceptual definido por el geólogo. Mientras mayor sea la densidad de datos, menor será la necesidad forzar las superficies. Para el caso de Mocha, en la superficie que representa la intensidad de Cpy 3-5 de Mocha, se incorporaron polilíneas, sólo en los casos que no existía información de sondajes, y se conservó la interpretación original de Chiang 2006 et al. (2006).

En la Figura 3.8 se pueden observar las polilíneas incorporadas al modelo implícito Mocha, para complementar la interpolación de la superficie de calcopirita 3-5.

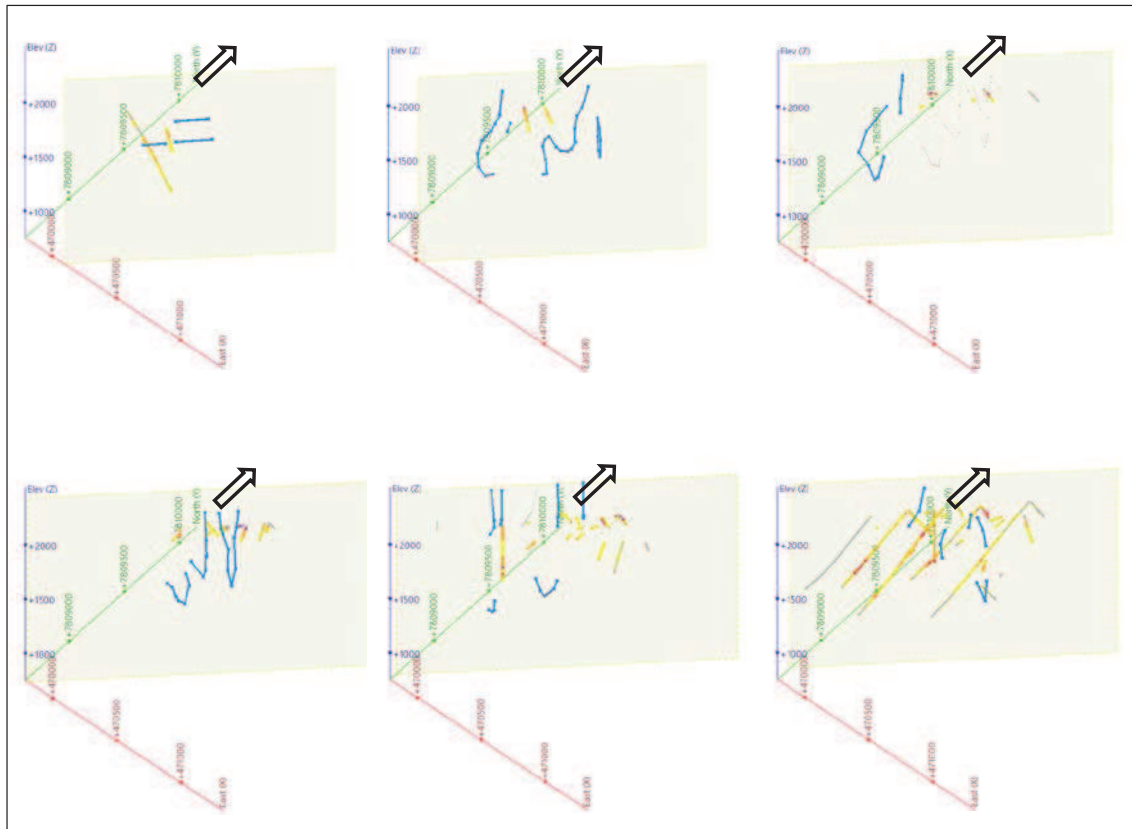


Figura 3.8: Vista 3D de polilíneas (color azul) que apoyan la generación de la superficie de Cpy 3-5, en los casos que no exista información de sondajes.

Para construir los sólidos (método implícito), a través del software Leapfrog Mining, se deben seguir los siguientes pasos básicos:

- Disponer de modelo geológico conceptual
- Disponer de base de datos de sondajes completa
- Si es necesario, incorporar polilíneas
- Definir parámetros geológicos principales para ser incorporados a la interpolación.
- Generar superficies 3D en base a los datos de sondajes
- Generar los sólidos de cada unidad
- Revisar si el resultado coincide con el modelo geológico conceptual
- Probar varios modelos modificando parámetros de interpolación

En la Figura 3.9 se observan las superficies de las subzonas minerales (lix, oxi, py, etc.) interpoladas para la generación de los sólidos que conforman el modelo 3D de Mocha. En la Figura 3.9 k) se observa en color rosado, el sólido de calcopirita 3-5; en la Figura 3.9 l) se muestra el modelo final.

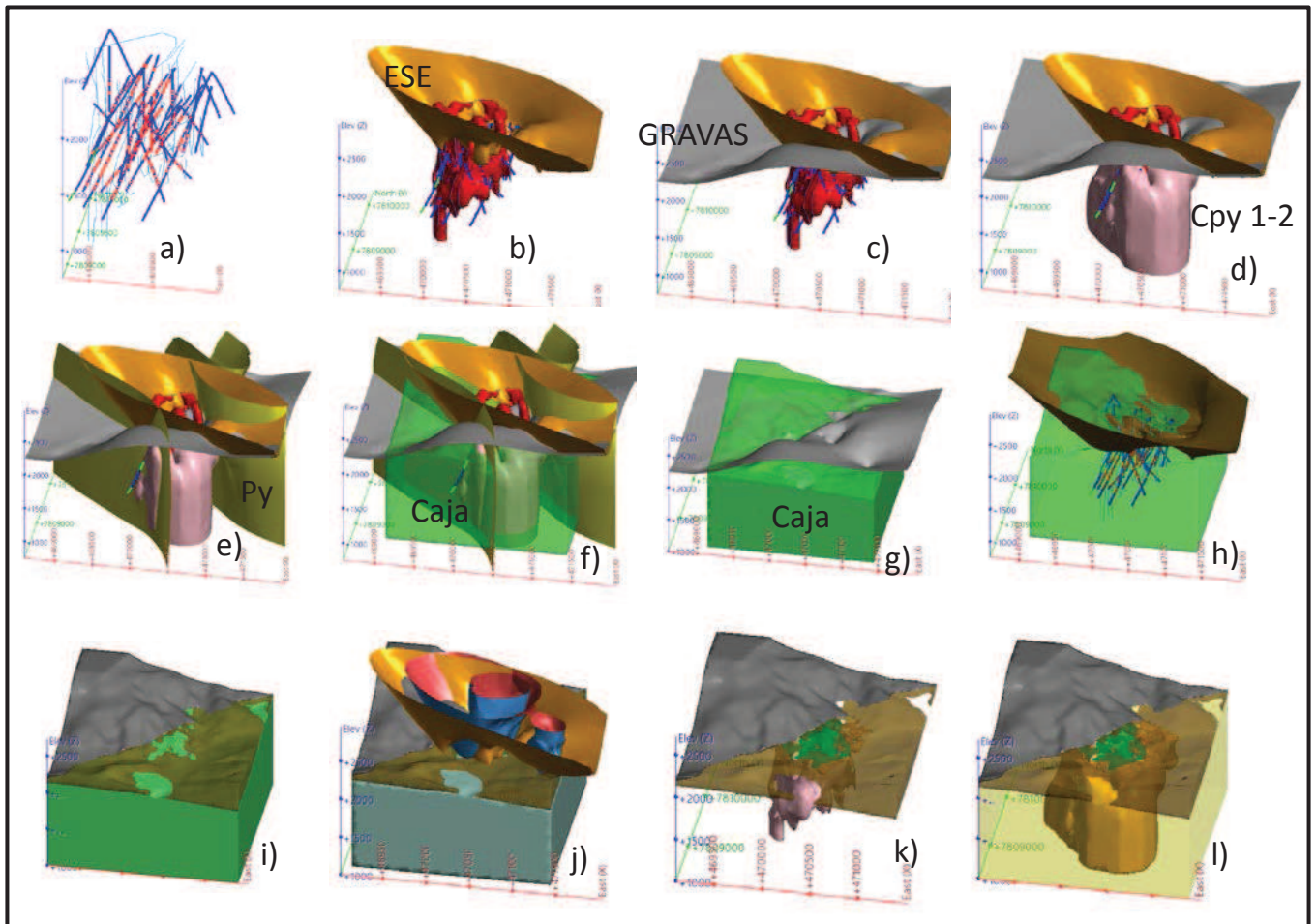


Figura 3.9: Vista 3D de las superficies (a-e) para generar los sólidos (f-i) del Modelo implícito Calcopirita 3-5 del proyecto Mocha.

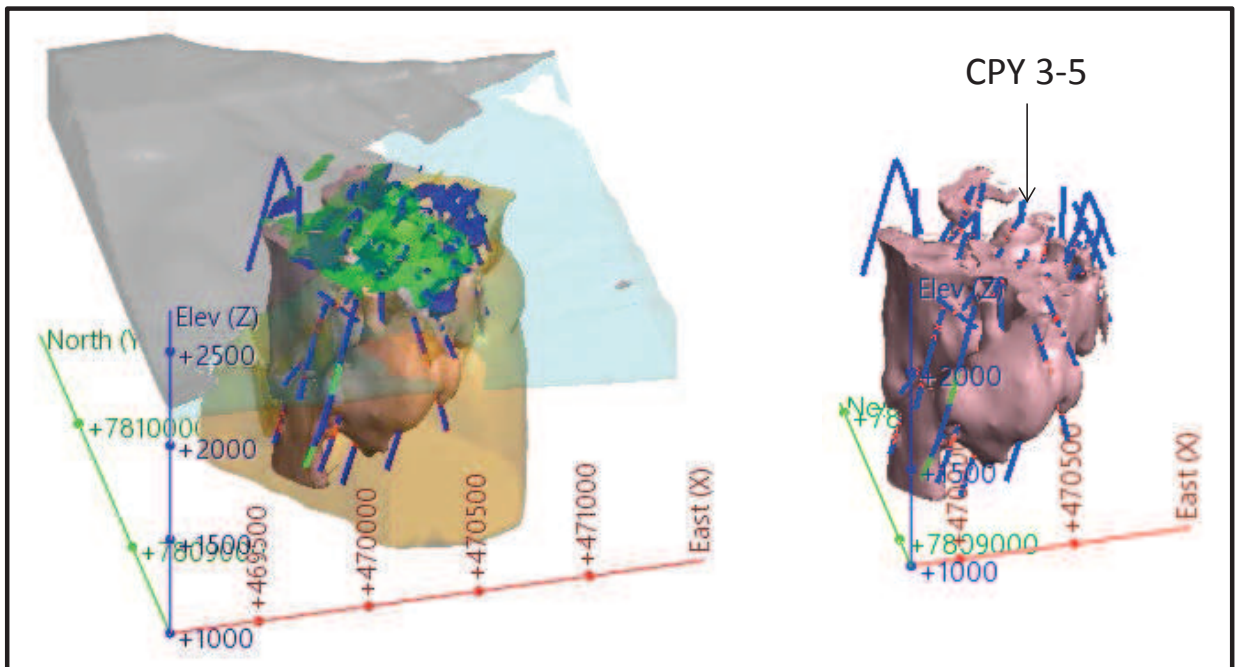


Figura 3.10: izquierda Vista 3D del modelo implícito (4.1) de subzonas minerales; a la derecha vista 3D del modelo implícito (4.1) de la subzona mineral de calcopirita 3-5 de Mocha.

En la Figura 3.10 se observa el resultado final del modelamiento implícito (uno de los ejemplos) de las subzonas minerales del proyecto Mocha, y el resultado en el modelamiento de la subzona mineral calcopirita 3-5 (a la derecha), siendo los datos de sondajes en color azul no pertenecientes a la subzona de calcopirita.

3.4 Descripción Modelos 3D Implícitos

El proceso de generación modelos implícitos con interpolación de superficies, requiere que el geólogo conozca la geología del objetivo, siendo vital la caracterización de los parámetros que ofrece el método de modelamiento a utilizar para obtener un resultado de acuerdo a la hipótesis de trabajo. El modelamiento implícito es una herramienta para generar el modelo 3D que ha

definido el geólogo, según la información disponible. Este debe reflejar los eventos litológicos, de alteraciones, mineralización, estructurales y la cronología entre ellos, permitiendo un modelo implícito congruente con lo observado en terreno (superficie), en sondajes (subsuperficie) y su integración.

Para este ejercicio, se generaron nueve modelos implícitos de subzona mineral (lixiviado, enriquecimiento secundario, óxidos, calcopirita 1-2, calcopirita 3-5, y pirita) de Mocha. Los parámetros variables de los nueve modelos corresponden al tipo de interpolación (esferoidal y lineal) con diferentes alcances (300 m, 400 m y 500 m), “drift” (constante, lineal y cuadrático) y “drift constante” con “clip y sin “clip”.

A continuación se describe cada uno de los parámetros utilizados y variables (en www.Leapfrog3d.com):

- **Interpolador función Lineal:** Corresponde al modelo lineal teórico y espacial de los datos. Significa que los valores más cercanos a un punto, tienen mayor importancia, y viceversa, los puntos más alejados menor influencia o peso. Gráfico 3.1

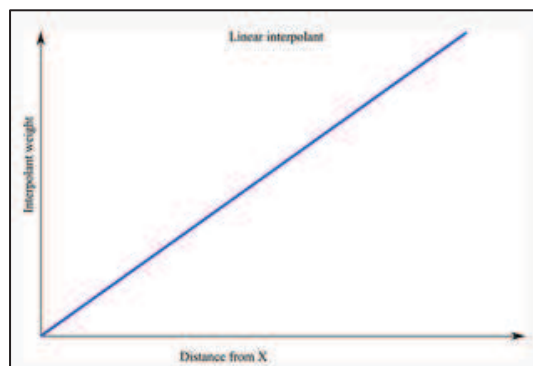


Gráfico 3.1: Modelo lineal

El interpolador lineal, es recomendado para data de distribución no regular y es eficaz para variables categóricas, pero no para leyes.

- **Interpolador función Esferoidal:** Corresponde al modelo “esferoidal” teórico y espacial de los datos. Significa que los valores más cercanos o dentro del “rango”, poseen mayor importancia, y los que están ubicados más allá del “rango”, su influencia o peso, será menor y sin gran diferencia entre ellos. Gráfico 3.2

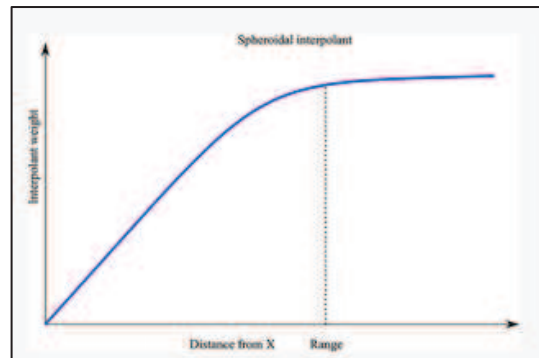


Gráfico 3.2: Modelo Esferoidal

A medida, que aumenta los valores en los ejes, disminuye el peso en el punto de origen. Más allá de la distancia “x”, las muestras tendrán el mismo peso sobre el origen y tendrán la misma influencia en el valor desconocido.

- **Rango:** Las funciones “Radial Basis (RBF)” son muy similares a los variogramas (Stewart et al., 2014). Para el caso de un modelo esférico se caracterizan por un rango y sill. El rango estará definido por la densidad y distribución de los datos. En el caso de los modelos de Mocha, se utilizaron rangos de 300 m, 400 y 500 m, buscando la interpolación entre los datos, ya que existen datos a más de 100 m de separación. Este parámetro permite controlar la distancia de la continuidad de los datos en el espacio.

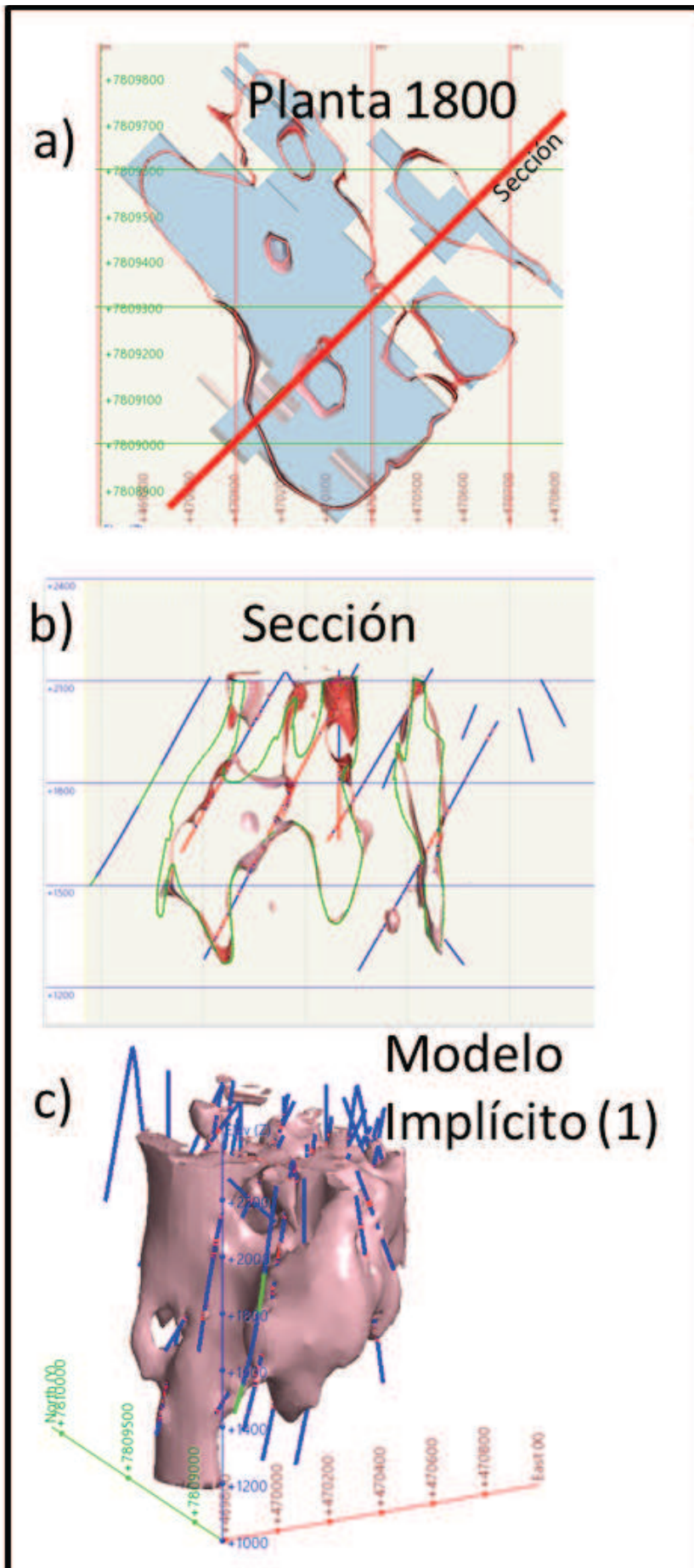
- **Drift:** Corresponde al modelo de distribución de los datos, más allá de los datos disponibles, por lo tanto, controla el comportamiento de los datos a gran distancia, o fuera del alcance de los datos duros. Los modelos de “drift” pueden ser: constante, lineal, o cuadrático. Cuando es “Constante”, el interpolador asume la media de los datos. En el caso de drift “Lineal”, el interpolador asumirá un comportamiento lineal alejándose de los datos. Y finalmente, se utiliza “None”, el interpolador llevará a “0” los valores, al alejarse de los datos.
- **Clip:** Permite manipular datos de distancia en los puntos de volumen que controlan la localización de los contactos, estableciendo rangos de tolerancia en función de la distancia fuera y dentro de la triangulación. En la práctica, permite evitar la generación de cuerpos muy pequeños entorno a datos aislados y controlar el alcance del contacto definido por los puntos de volumen. Este parámetro permite limitar la distribución de los datos.

Para la generación de modelos implícitos, se utilizó una tendencia de mineralización N 45° W y vertical. Los modelos generados para la subzona mineral calcopirita 3-5, corresponden a:

- Modelo 1: Se utilizó un interpolador “esferoidal” con rango de 300 m
- Modelo 2: Se utilizó un interpolador “esferoidal” con rango de 400 m
- Modelo 3: Se utilizó un interpolador “esferoidal” con rango de 500 m
- Modelo 4.1: Se utilizó un interpolador “lineal” y “drift constante”
- Modelo 4.2: Se utilizó un interpolador “lineal” y “drift lineal”
- Modelo 4.3: Se utilizó un interpolador “lineal” y “drift cuadrático”

- Modelo 4.4: Se utilizó un interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 10 m” dentro y fuera de las superficies.
- Modelo 4.5: Se utilizó un interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 20 m” fuera de la superficie y 40 en el interior de la superficie.
- Modelo 4.5.1: Se utilizó un interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 20 m” fuera de la superficie y 40 en el interior de la superficie, pero sin polilíneas.

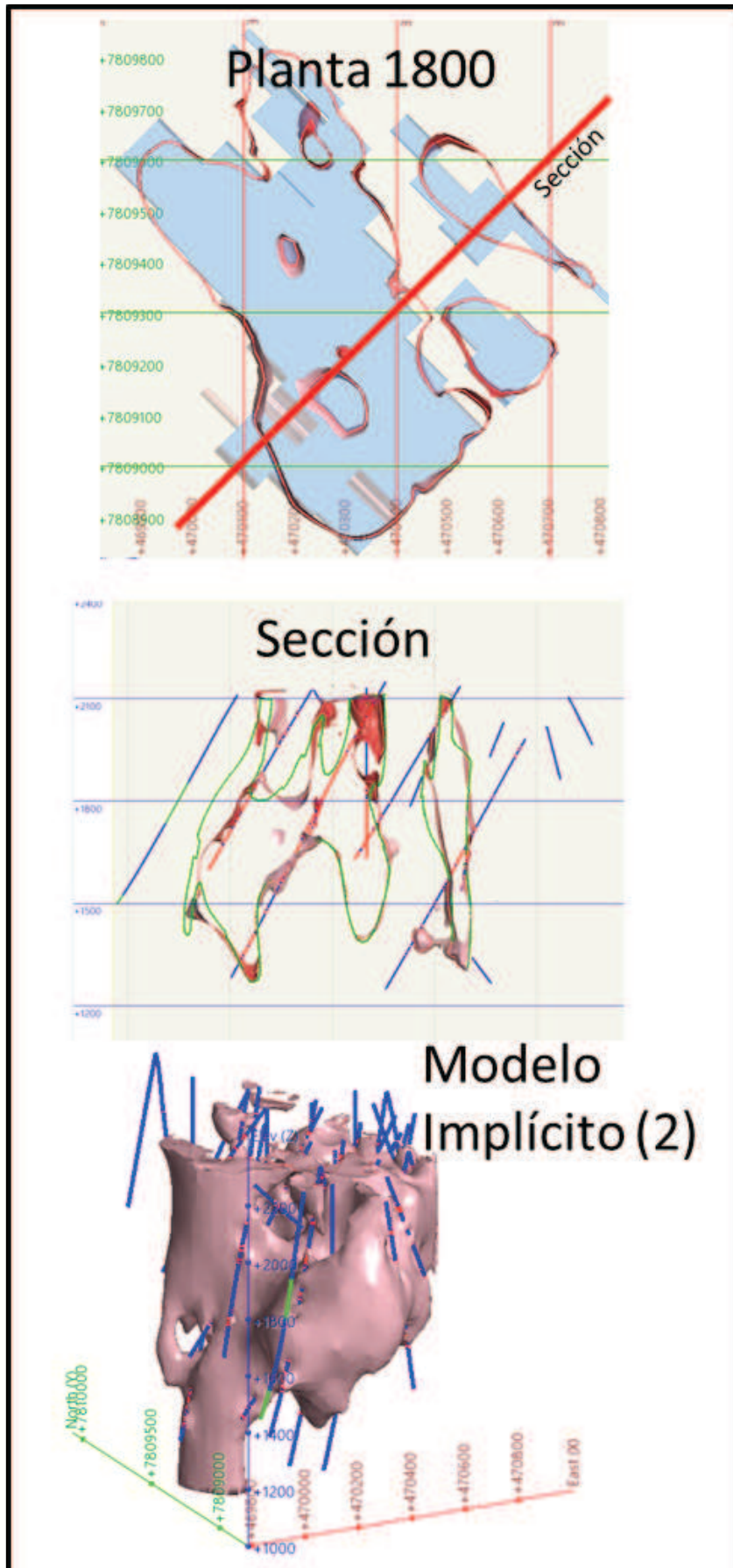
Ver figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

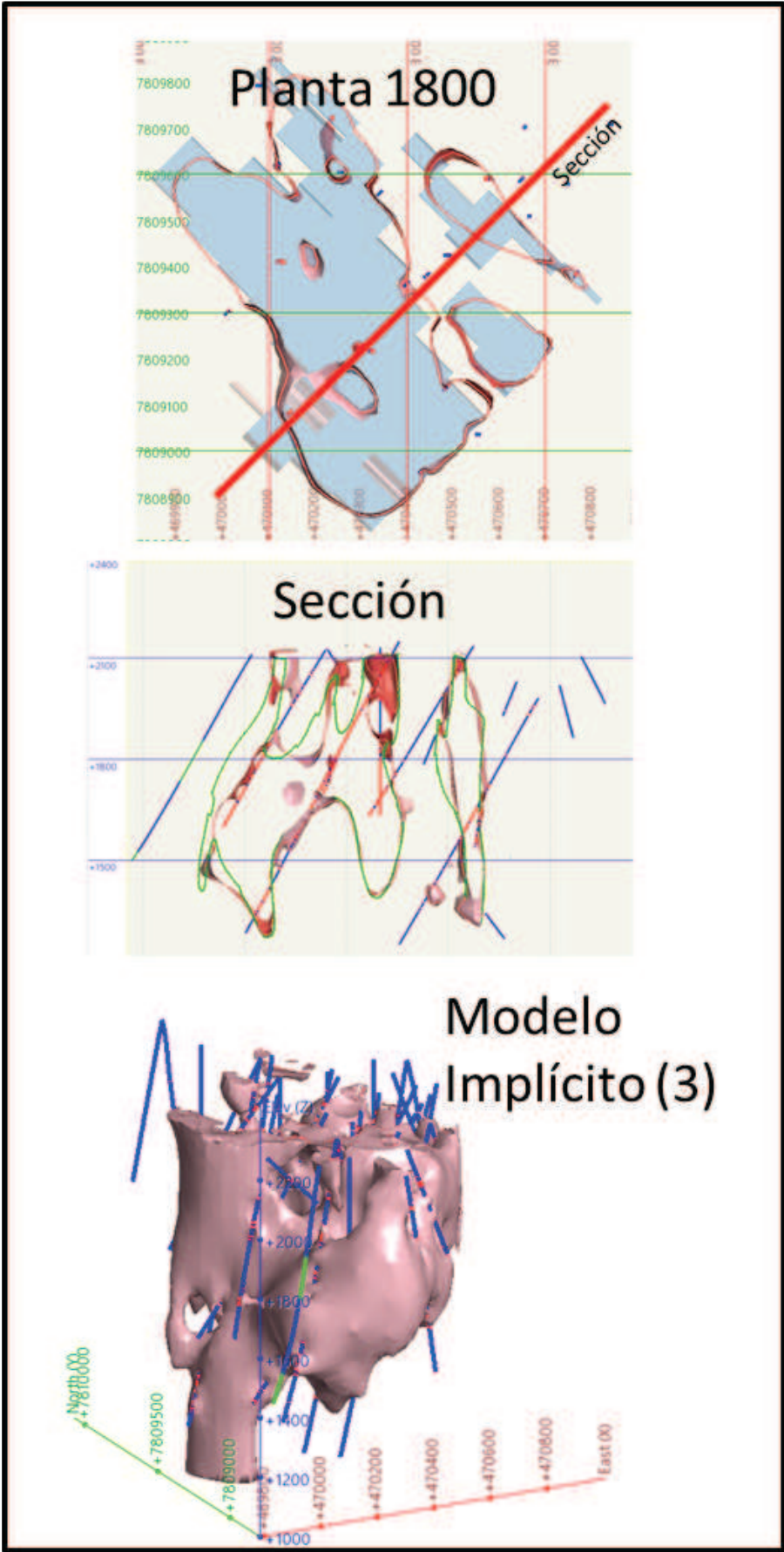
Figura 3.11:
 Proyecto Mocha,
 modelo implícito de
 subzona mineral
 CPY 3-5 N° 1.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

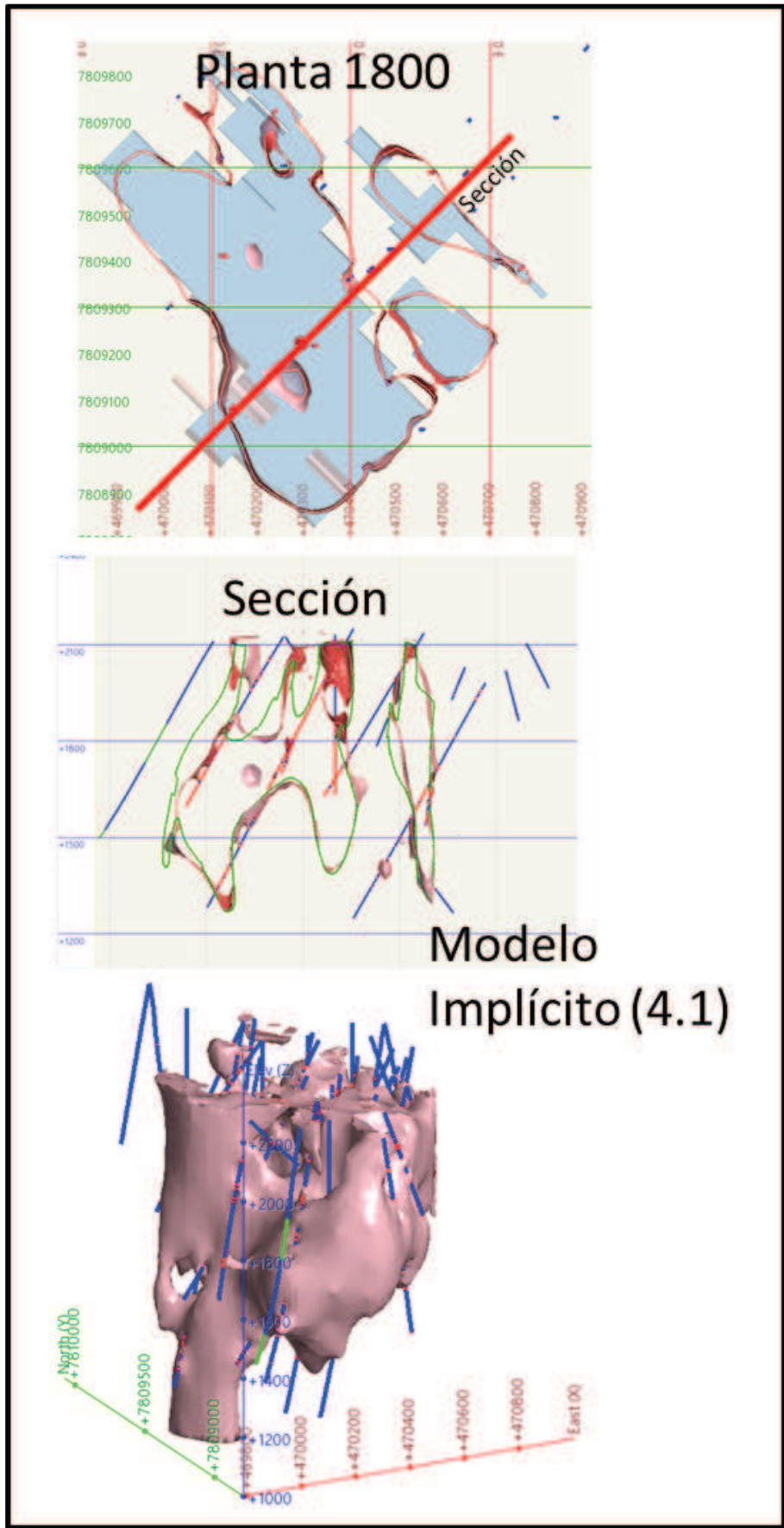
Figura 3.12:
 Proyecto Mocha,
 modelo implícito de
 subzona mineral
 CPY 3-5 N° 2.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

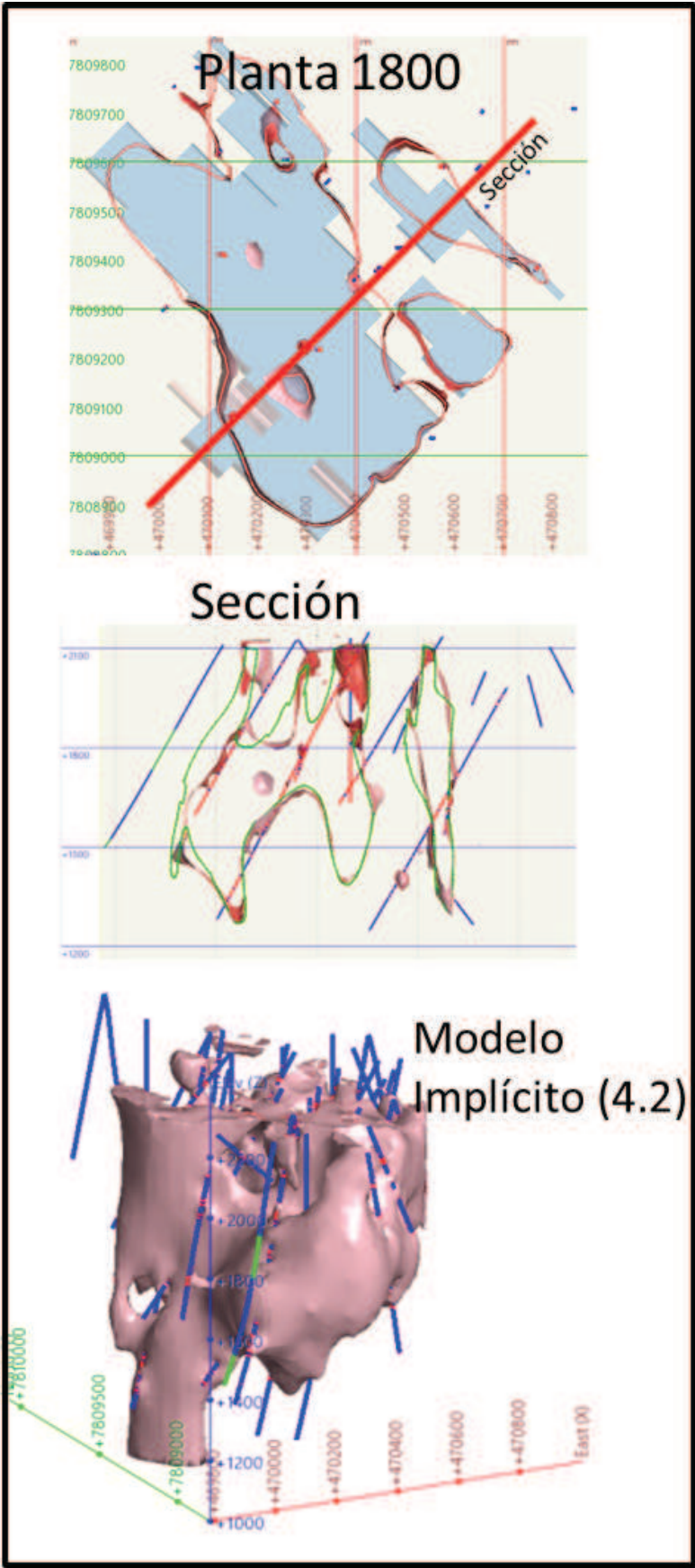
Figura 3.13:
 Proyecto Mocha,
 modelo implícito de
 subzona mineral
 CPY 3-5 N° 3.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

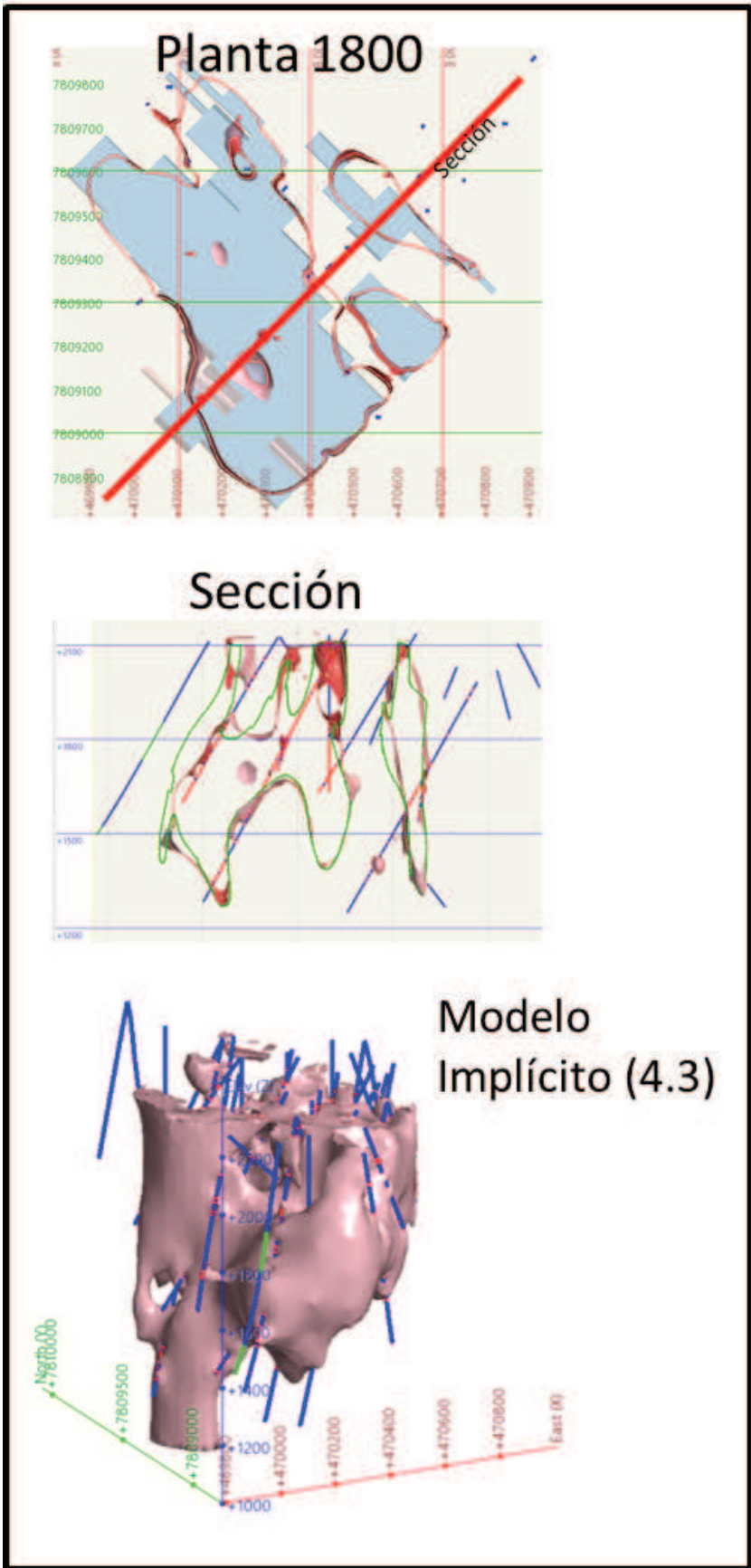
Figura 3.14:
 Proyecto Mocha,
 modelo implícito
 de subzona
 mineral CPY 3-5
 N° 4.1



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

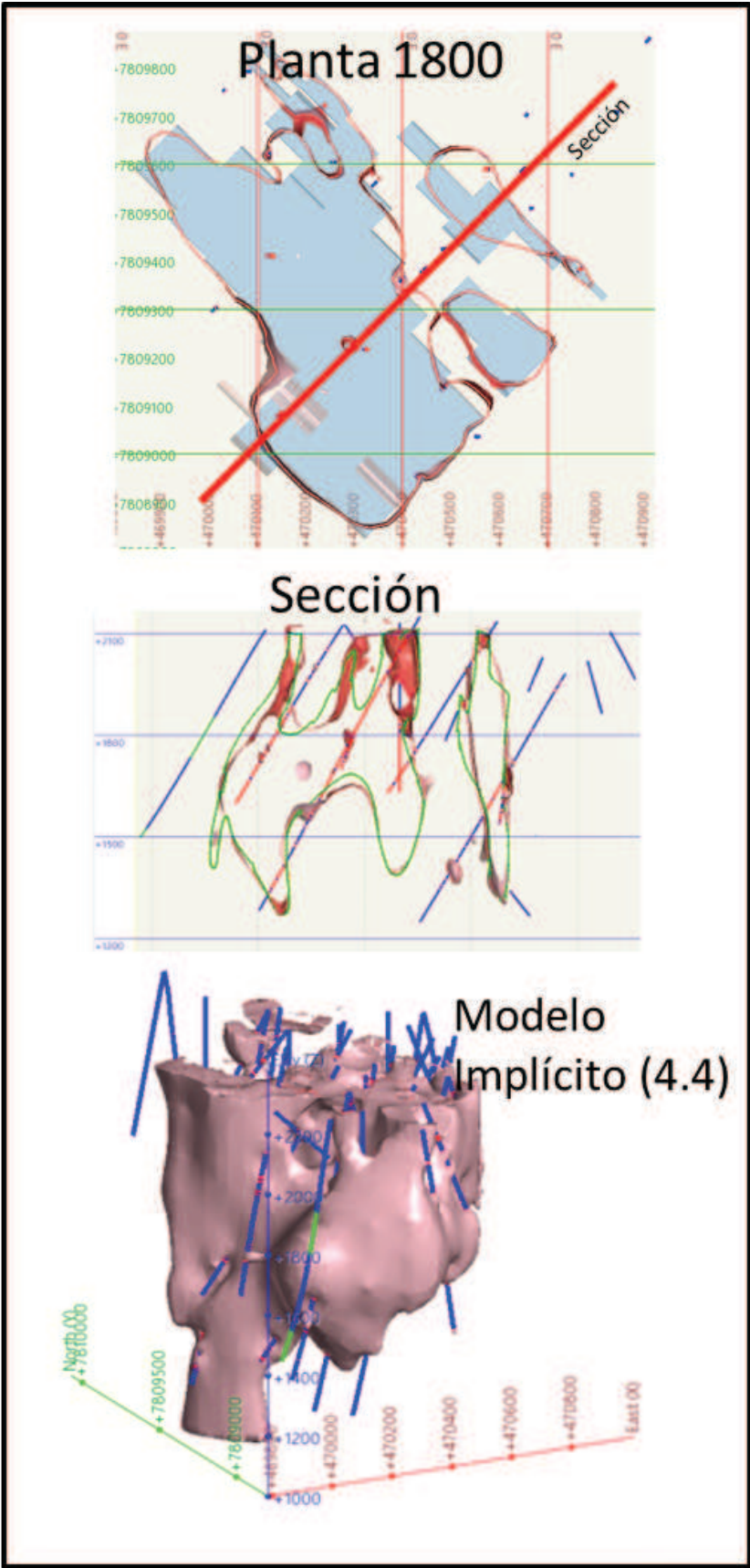
Figura 3.15: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.2.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

Figura 3.16: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.3.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

Figura 3.17: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.4.

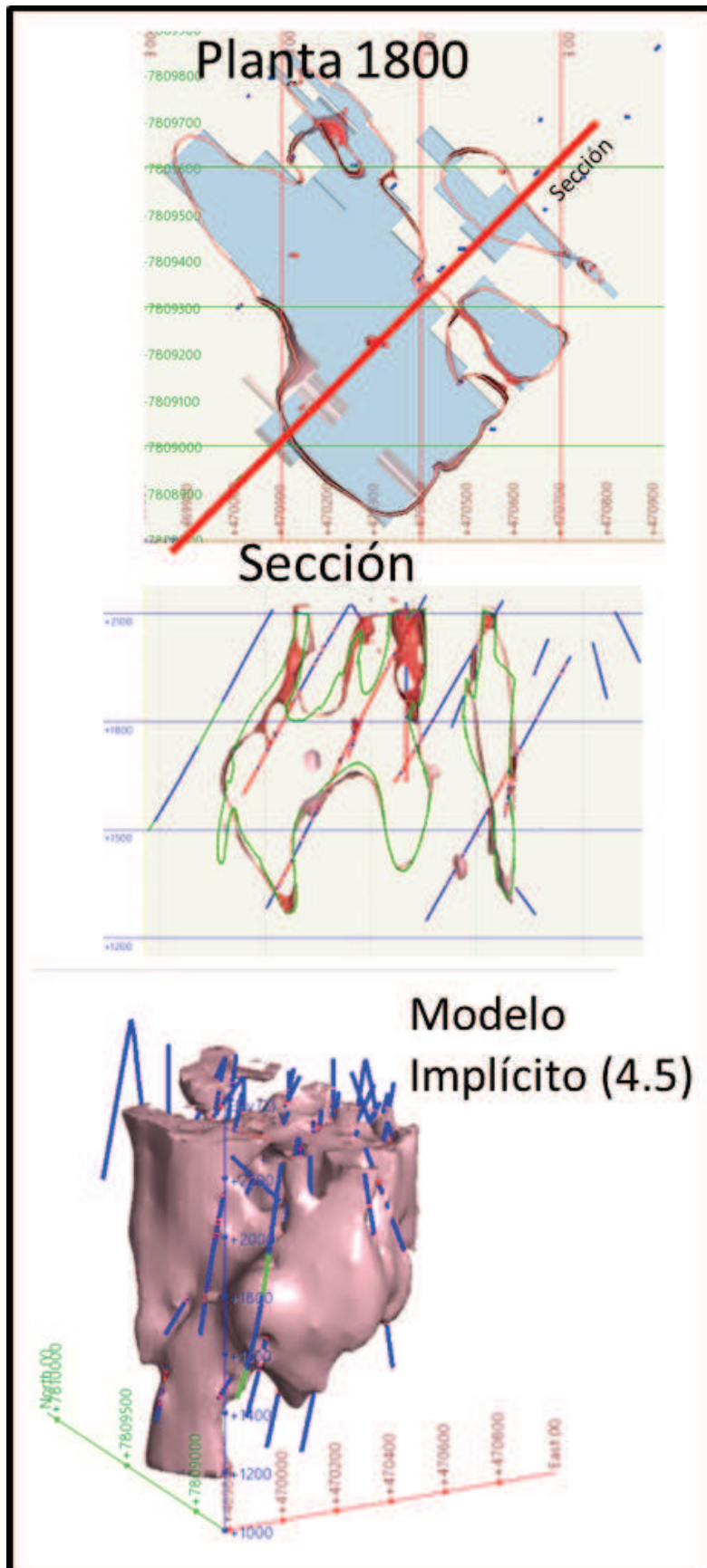
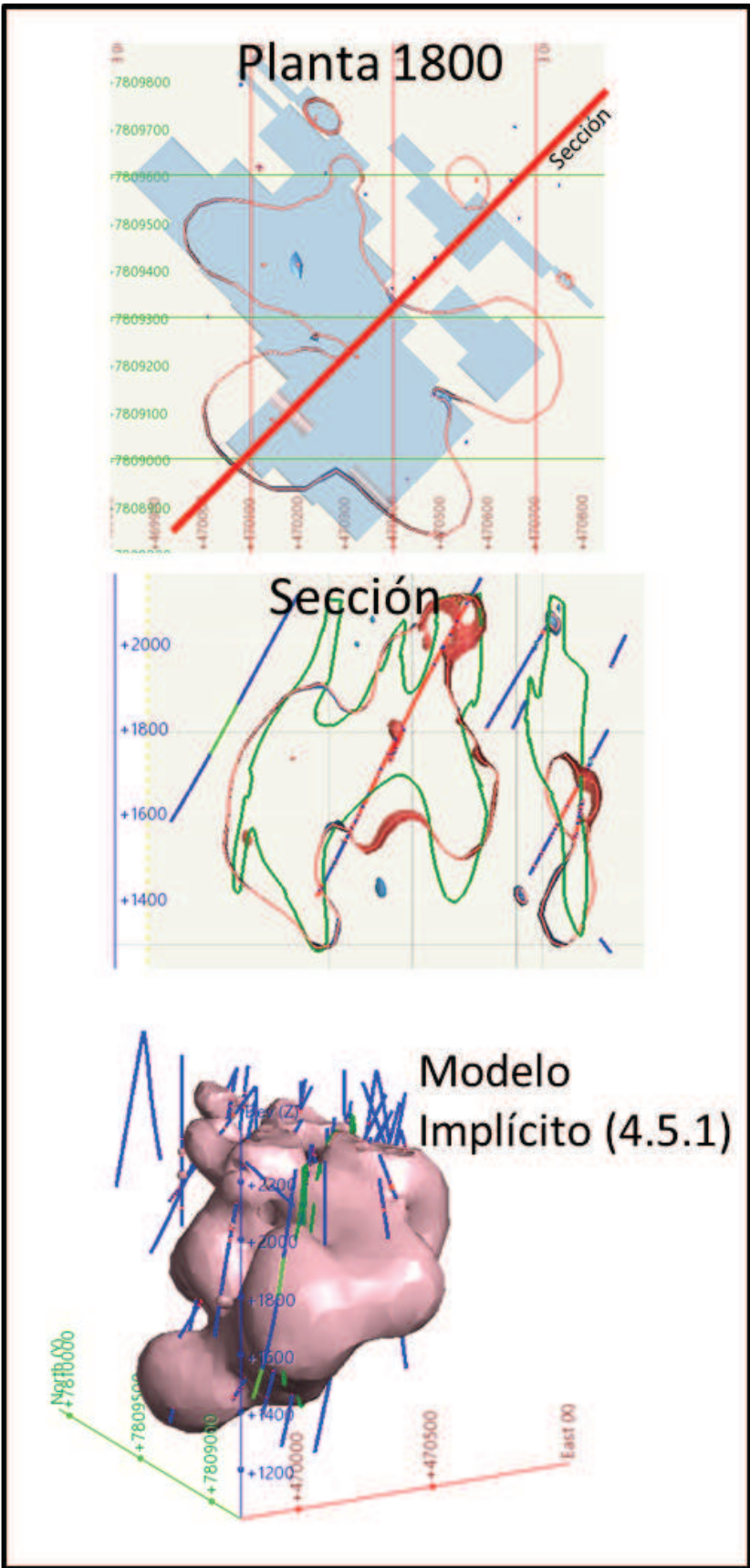


Figura 3.18: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.5.



Modelo explícito
 Modelo implícito

Modelo explícito
 Modelo implícito

Figura 3.19: Proyecto Mocha, modelo implícito de subzona mineral CPY 3-5 N° 4.5.1 (sin polilíneas).

La construcción de los modelos implícitos permite, probar varios escenarios posibles como resultado, son rápidos, y de acuerdo al conocimiento geológico, es posible controlar parámetros para validar las hipótesis.

En este estudio, se observa diferencias entre los modelos implícitos, con interpolador esferoidal o lineal. En los interpoladores esferoidales, se asume que la continuidad de las variables es finita y de acuerdo a un “rango”, donde existe continuidad, pero luego de alcanzar el rango (alcance), donde desaparece la continuidad, por lo tanto las superficies son más pequeñas en comparación con las superficies generadas a través de un interpolador lineal.

Los interpoladores lineales, asumen que las muestras más cercanas al punto a estimar, son los que tienen mayor influencia. Este interpolador funciona bien para variables categóricas, con información de distribución irregular. Las superficies generadas tienden a ser más amplias.

Al comparar todos los modelos implícitos contra el modelo implícito 4.5.1, donde **no** se utilizaron polilíneas para restringir algunos sólidos, se aprecia que la geometría varía levemente, los cuerpos tienden a más redondeados, ya que el interpolador, al no existir una polilínea que restrinja su generación, la superficie creada será más amplia. Pero, de igual forma, el volumen conserva similitud con el modelo explícito original (Chiang et al., 2006).

Los nueve modelos implícitos generados, corresponden a un posible escenario de la geometría de Calcopirita 3-5 en el proyecto Mocha. Para definir “el mejor” modelo implícito, sugiero los que utilizaron interpoladores lineales y “drift” constante. Ya que la variable interpolada es categórica (CPY) y donde no existen datos, se asumen la media de los datos. Como también, al observar el resultado, es compatible con modelo conceptual.

CAPITULO IV

ESTIMACIÓN RECURSOS

Para comparar los distintos modelos tridimensionales (implícitos y explícito), se utilizó el software Vulcan, calculando la ley y tonelaje bajo parámetros geoestadísticos similares.

Por tratarse de un proyecto vigente de Codelco, se debe resguarda la confidencialidad de los datos, y para ello se ha aplicado un factor a los resultados finales.

4.1 Estimación potencial cuerpo calcopirita 3-5 Proyecto Mocha

Para el cálculo del potencial de recursos geológicos, se utilizó el modelo estático (Chiang et al., 2006) y los nueve modelos implícitos generados en este estudio de la subzona mineral de calcopirita 3-5. Se utilizaron los nueve modelos implícitos, para comparar los resultados entre ellos. El modelo explícito se construyó en base a secciones y plantas (extrusión en Vulcan) y los modelos implícitos, en base a la información de sondajes.

La orientación de los cuerpos mineralizados en el proyecto Mocha es N 45° W y son cuerpos verticales. Los sólidos de la subzona mineral utilizados en este cálculo de potencial, se describieron en el capítulo 3 de este documento.

Los sondajes existentes del proyecto Mocha alcanzan a 30.175 m, perforados entre los años 1982 y 2005. Los metros contenidos en los sólidos de Calcopirita 3-5 de cada uno de los modelos implícitos, se observan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Metros de sondajes contenidos en sólidos de modelos

MODELOS PARA CALCULO POTENCIAL	m contenidos en sólidos
• Modelo 1: Esferoidal, rango de 300 m	7,156.3
• Modelo 2: Esferoidal, rango de 400 m	7,714.3
• Modelo 3: Esferoidal, rango de 500 m	7,764.0
• Modelo 4.1: Lineal, drift constante	7,804.3
• Modelo 4.2: Lineal, drift lineal	7,234.3
• Modelo 4.3: Lineal, drift cuadrático	7,228.3
• Modelo 4.4: Lineal, drift constante, clip +10/-10 m	7,259.3
• Modelo 4.5: Lineal, drift constante, clip +40/-20 m	7,284.3
• Modelo 4.5.1: Lineal, drift constante, clip +40/-20 m, sin polilíneas	7,397.3
• Modelo 5: Explícito (extrusión secciones)	7,660.1

Los metros de sondajes (Tabla 4.1) que sustentan al modelo de Calcopirita 3-5, varía según el modelo implícito, los cuales caracterizan a la base de datos del modelo de bloques. Los modelos implícitos poseen los mismos datos, pero difieren en el volumen resultante, de acuerdo al interpolador (lineal-esferoidal) y “drift” (constante, lineal).

La base de datos utilizada en la estimación de recursos tiene compositos a 10 m y sólo se estimó el contenido de cobre.

Para el cálculo de tonelaje se utilizó un valor arbitrario de densidad $2,69 \text{ g/cm}^3$, (Chiang et al., 2006) y para el cálculo del potencial de recursos geológicos se utilizó el método de estimación Kriging Ordinario, y la variografía se calculó en base a las direcciones preferenciales de la zona mineral definidas por Chiang et al. (2006).

4.2 Modelo de bloques

El modelo de bloques utilizado en este estudio, considera bloques de $15 \times 15 \times 15$ m. En la Figura 4.1 se observa una planta del modelo de bloques en base al

Modelo implícito 4.1 (lineal) y además, se aprecia el contorno de los sólidos generados a través de la extrusión de polígonos de las secciones geológicas.

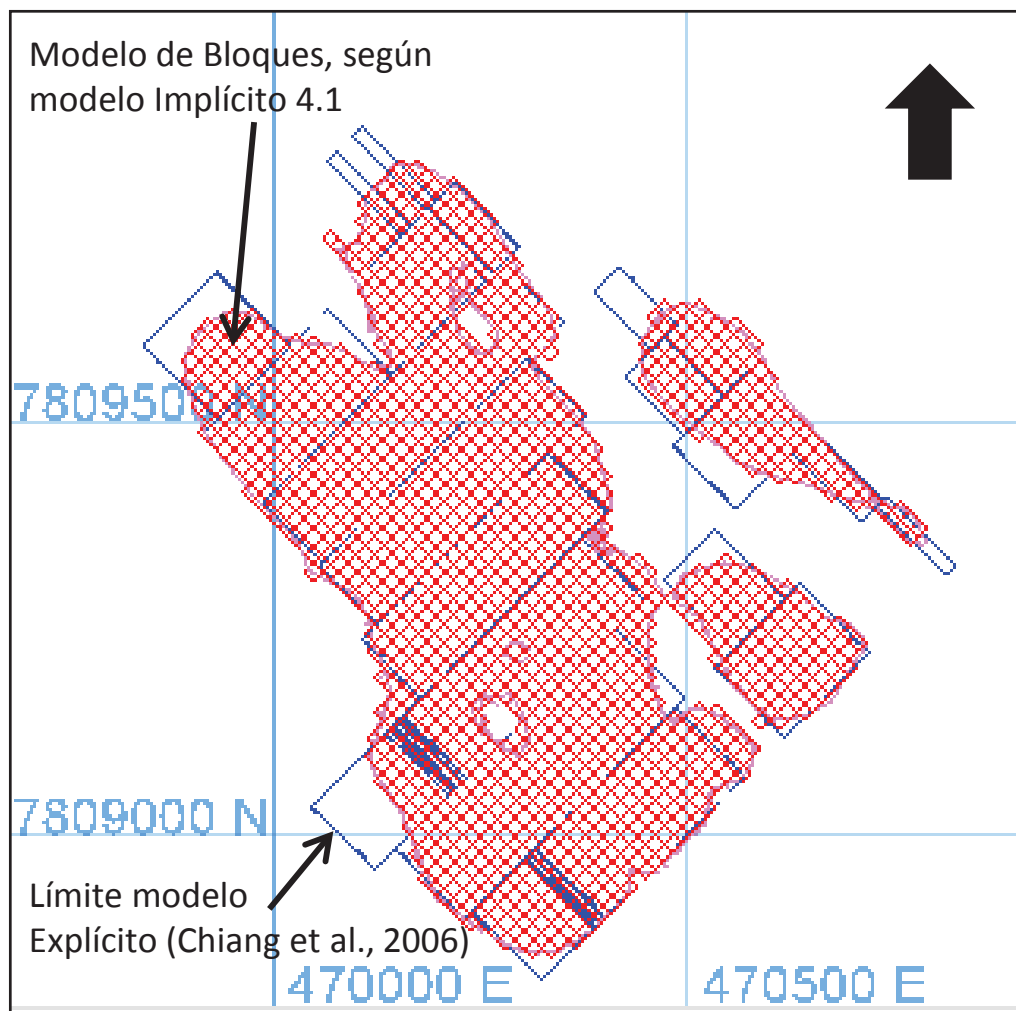


Figura 4.1: Extensión Modelo de bloques Mocha, subzona mineral Calcopirita 3-5, planta a cota 1.800 m s.n.m. En color rojo bloques 15x15x15 de Modelo Implícito 4.1 (interpolador lineal). En color azul, contorno de sólidos de Modelo explícito (extrusión de polígonos de secciones).

4.3 Validación estimación de Modelo de Bloques

Para validar el modelo de bloques, se utilizó el método visual principalmente y por derivas por coordenadas N, E y cota, comparando entre la ley estimada (CUT) y “Vecino más cercano (CUTN)”. Ver Figura 4.2.

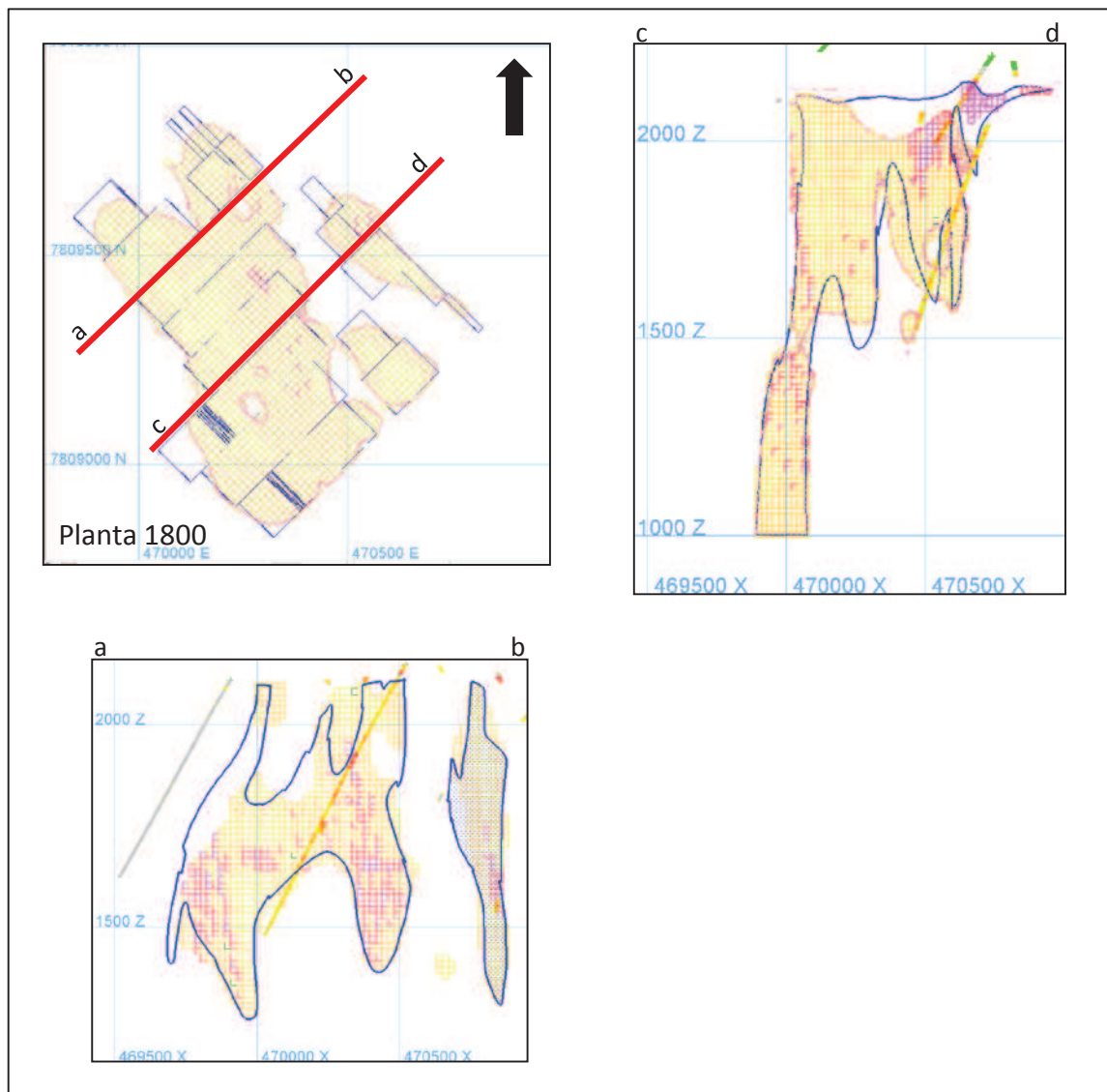


Figura 4.2: Cobre estimado y datos de sondajes, validación visual

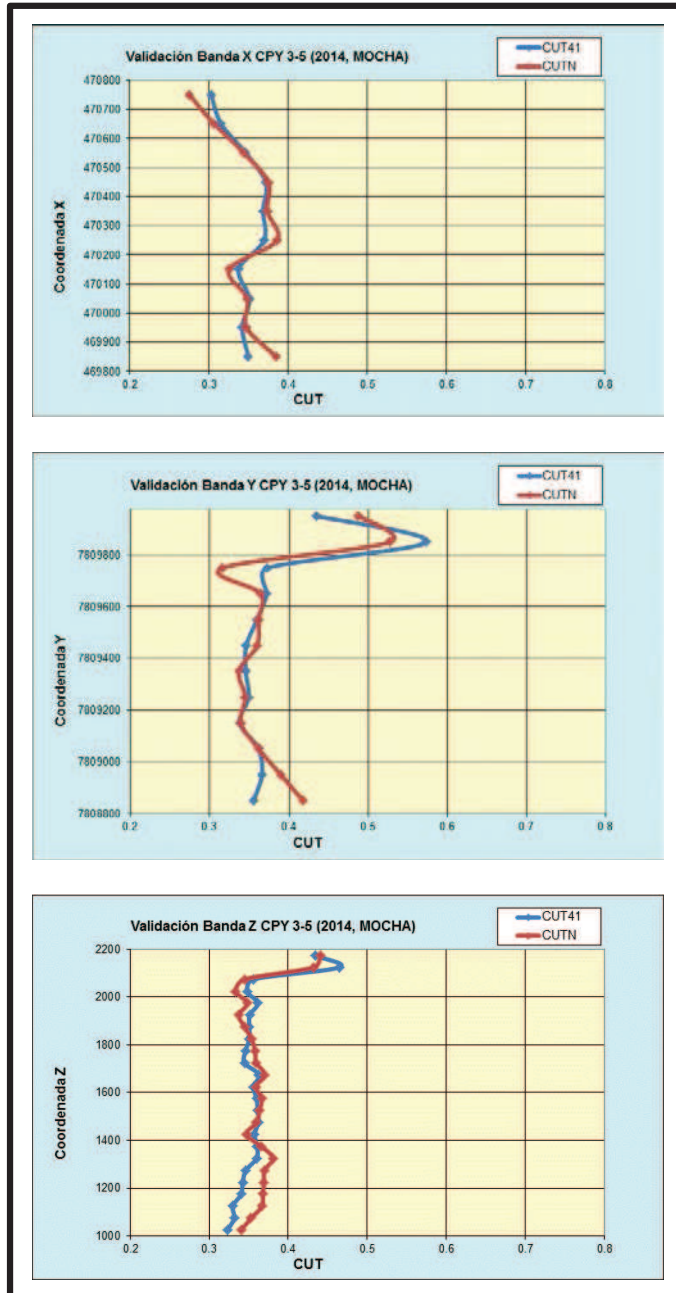


Figura 4.3: Comparación por deriva de cobre estimado y vecino más cercano en las coordenadas este, norte y cota.

En la Figura 4.3 se observa buena correlación entre los valores de cobre estimado y cobre del “vecino más cercano”. El cobre estimado por Kriging Ordinario se correlaciona con los datos duros, y sigue la tendencia en el espacio.

4.4 Resultados estimación de recursos

Los resultados del cálculo de potencial de la subzona de calcopirita 3-5 del proyecto Mocha, según los modelos implícitos y explícitos, a una ley de corte 0,0% Cut, varía entre 374 a 428 Mt (Figura 4.4).

1. Modelo Esferoidal, rango 300 m			4.3 Modelo Lineal, drift cuadrático		
Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)	Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)
0.00	0.35	373,509,272	0.00	0.35	394,908,657
0.10	0.35	373,509,272	0.10	0.35	394,908,657
0.20	0.35	373,494,754	0.20	0.35	394,894,139
0.30	0.36	372,805,154	0.30	0.35	394,197,280
0.40	0.38	271,709,757	0.40	0.38	279,367,950
0.50	0.45	64,386,887	0.50	0.46	65,526,542

2. Modelo Esferoidal, rango 400 m			4.4 Modelo Lineal, drift constante, clip +10/-10 m		
Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)	Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)
0.00	0.36	382,611,996	0.00	0.36	415,632,959
0.10	0.36	382,611,996	0.10	0.36	415,632,959
0.20	0.36	382,597,478	0.20	0.36	415,611,182
0.30	0.36	381,973,208	0.30	0.36	415,030,466
0.40	0.38	279,665,567	0.40	0.38	305,224,330
0.50	0.45	68,785,810	0.50	0.45	81,960,804

3. Modelo Esferoidal, rango 500 m			4.5 Modelo Lineal, drift constante, clip +40/-20 m		
Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)	Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)
0.00	0.35	386,430,203	0.00	0.36	427,929,620
0.10	0.35	386,430,203	0.10	0.36	427,929,620
0.20	0.35	386,415,685	0.20	0.36	427,915,103
0.30	0.36	385,791,416	0.30	0.36	427,232,761
0.40	0.38	280,405,980	0.40	0.38	313,572,122
0.50	0.45	68,364,791	0.50	0.46	75,870,545

4.1 Modelo Lineal, drift constante			4.5.1 Modelo Lineal, drift constante, clip +40/-20 m		
Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)	Cutoff	% Cut	Tonnage
0.00	0.35	393,841,591	0.00	0.36	410,558,953
0.10	0.35	393,841,591	0.10	0.36	410,558,953
0.20	0.35	393,827,073	0.20	0.36	410,558,953
0.30	0.35	393,130,214	0.30	0.36	410,094,380
0.40	0.38	278,475,099	0.40	0.38	286,300,247
0.50	0.45	65,366,845	0.50	0.46	77,859,498

4.2 Modelo Lineal, drift lineal			5. Modelo Estático, extrusión poligonos de secciones		
Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)	Cutoff	% Cut	Tonelaje (t)
0.00	0.35	393,906,922	0.00	0.34	428,053,023
0.10	0.35	393,906,922	0.10	0.34	428,053,023
0.20	0.35	393,892,404	0.20	0.34	427,508,601
0.30	0.35	393,195,545	0.30	0.34	421,955,505
0.40	0.38	278,569,465	0.40	0.38	271,825,901
0.50	0.45	65,410,398	0.50	0.46	61,563,155

Figura 4.4: Curvas tonelaje / ley de los modelos implícitos y explícito

La variación del tonelaje total (Figura 4.4) de cada uno de los modelos geológicos implícitos en relación al modelo estático, varía entre un 13% y 0,03% de diferencia.

Todos los resultados son consistentes, y su variación se debe al modelo geológico implícito utilizado. Los modelos implícitos son el resultado de la interpolación de datos de sondajes, aplicando distintos parámetros, que permiten controlar la interpolación y que dependen del usuario, el cual persigue generar los posibles modelos tridimensionales que represente el modelo geológico conceptual de mejor manera.

El potencial resultante del modelo implícito 4.5.1, que fue generado sólo con los datos de sondajes, y sin utilizar polilíneas, también está dentro del rango. Por lo tanto, sin restricción en las superficies, también las superficies interpoladas representan al modelo geológico original.

Se debe considerar que el modelo geológico implícito será una interpretación más, pero que considera los datos duros en el espacio, a diferencia del modelo estático, que sólo considera la ubicación espacial de los datos en dos dimensiones, y entre secciones no es posible controlar la triangulación de manera expedita.

CAPITULO V

ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE MODELOS 3D

5.1 Comparación Modelos 3D Implícitos

Los modelos implícitos generados en este estudio, se enfocaron a representar una variable categórica (subzona mineral calcopirita 3-5) del proyecto Mocha. Se utilizaron interpoladores lineales y esféricos, con y sin polilíneas, variando algunas características y logrando así nuevos distintos modelos geológicos, que representan nueve opciones de interpretación, según datos de sondajes y conocimiento geológico.

Los modelos implícitos generados para la subzona mineral de calcopirita 3-5 del proyecto Mocha son:

- Modelo 1: interpolador “esférico” con rango de 300 m
- Modelo 2: interpolador “esférico” con rango de 400 m
- Modelo 3: interpolador “esférico” con rango de 500 m
- Modelo 4.1: interpolador “lineal” y “drift constante”
- Modelo 4.2: interpolador “lineal” y “drift lineal”
- Modelo 4.3: interpolador “lineal” y “drift cuadrático”
- Modelo 4.4: interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 10 m” dentro y fuera de las superficies.
- Modelo 4.5: interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 20 m” fuera de la superficie y 40 en el interior de la superficie.
- Modelo 4.5.1: interpolador “lineal”, “drift constante” y “clip a 20 m” fuera de la superficie y 40 en el interior de la superficie, sin polilíneas.

La aplicación de un interpolador esferoïdal permite definir la distancia de influencia de los datos, otorgando un “peso” según la distancia, lo que se asemeja a la naturaleza, a cierta distancia superior a un rango definido, los datos no influyen. En cambio un interpolador lineal asume que los datos más cercanos influyen más que los lejanos, y su influencia será inversamente proporcional a la distancia del punto a estimar.

En la Tabla 5.1 se puede observar que existe una diferencia de 13 Mt entre el modelo Esferoidal con rango de 300 m y el Esferoidal con rango 500 m. Esta diferencia se produce al aumentar el rango o distancia de influencia de los datos para interpretar la continuidad de la mineralización e intensidad de la calcopirita 3-5 en el espacio. Obviamente al aumentar el rango a 500 m, los volúmenes aumentarían.

Se observa que la diferencia de tonelaje entre los modelos lineales y con diferentes tipos de “drift” no es significativa. Pero en comparación con los modelos lineales con “clip”, se aprecia una diferencia de 20 Mt.

Los modelos lineales 4.1 al 4.5, tienen una diferencia de hasta 41 Mt con respecto al modelo esferoïdal (3). En el interpolador lineal los datos más cercanos influyen más en el punto estimado, y los más lejanos menos, pero nunca llega a ser cero su influencia. En cambio, en el modelo esferoïdal, luego de superar el rango de influencia, los datos más allá de él, no influyen en el punto estimado. En la práctica, en un modelo esferoïdal el volumen generado es más restringido a los datos, en cambio en un modelo lineal, el volumen tiende a ser mayor.

Además, en los modelos lineales 4.4 y 4.5, se utilizó “clip” en el interpolador para manipular datos de distancia en los puntos de volumen que controlan la

localización de los contactos, estableciendo rangos de tolerancia en función de la distancia de 20 m fuera de la triangulación y de 40 m en el interior de la triangulación. En la práctica, permite evitar la generación de cuerpos muy pequeños entorno a datos aislados y controlar el alcance del contacto definido por los puntos de volumen. En este caso, al interior de la triangulación los puntos que estén a menos de 40 m, tienden a generar una sola superficie y no cuerpos pequeños aislados.

Con respecto al modelo 4.5.1, éste fue generado sin el apoyo de “polilíneas” para restringir las superficies. Posee sólo un 4% de diferencia con el modelo explícito, confirmando la aplicabilidad de la interpolación de superficies para modelar.

Tabla 5.1: Comparación del tonelaje de los modelos implícitos

Modelo geológico	Tonelaje (tx) L.C. 0,0%	Dif ton c/r Modelo 5	%	INTERPOLADOR	RANGO (m)	DRIFT	CLIP
Modelo 1 Implícito	373,509,272	54,543,751	87	Esferoidal	300	Constante	
Modelo 2 Implícito	382,611,996	45,441,027	89	Esferoidal	400	Constante	
Modelo 3 Implícito	386,430,203	41,622,820	90	Esferoidal	500	Constante	
Modelo 4.1 Implícito	393,841,591	34,211,432	92	Lineal		Constante	
Modelo 4.2 Implícito	393,906,922	34,146,101	92	Lineal		Lineal	
Modelo 4.3 Implícito	394,908,657	33,144,366	92	Lineal		Cuadrático	
Modelo 4.4 Implícito	415,632,959	12,420,064	97	Lineal		Constante	10/-10
Modelo 4.5 Implícito	427,929,620	123,403	100	Lineal		Constante	40/-20
Modelo 4.5.1 Implícito (sin polilíneas)	410,558,953	17,494,070	96	Lineal		Constante	40/-20
Modelo 5: Explícito (extrusión secciones)	428,053,023		100				

(tx) factor aplicado a tonelaje

En términos globales, la diferencia del potencial de los distintos modelos implícitos esferoidales y lineales, sólo alcanza al 13%, los de mayores diferencias, son los modelos implícitos con interpolador “esferoidal”, por lo tanto diferencias menores a 10%, y mejor aún 5% (modelo 4.5 y 4.5.1), es aceptable para la etapa de exploración y densidad de datos de sondajes. Para un modelo implícito, mientras mayor sea el número de datos, menor será la incertidumbre de la interpretación (Figura 5.1).

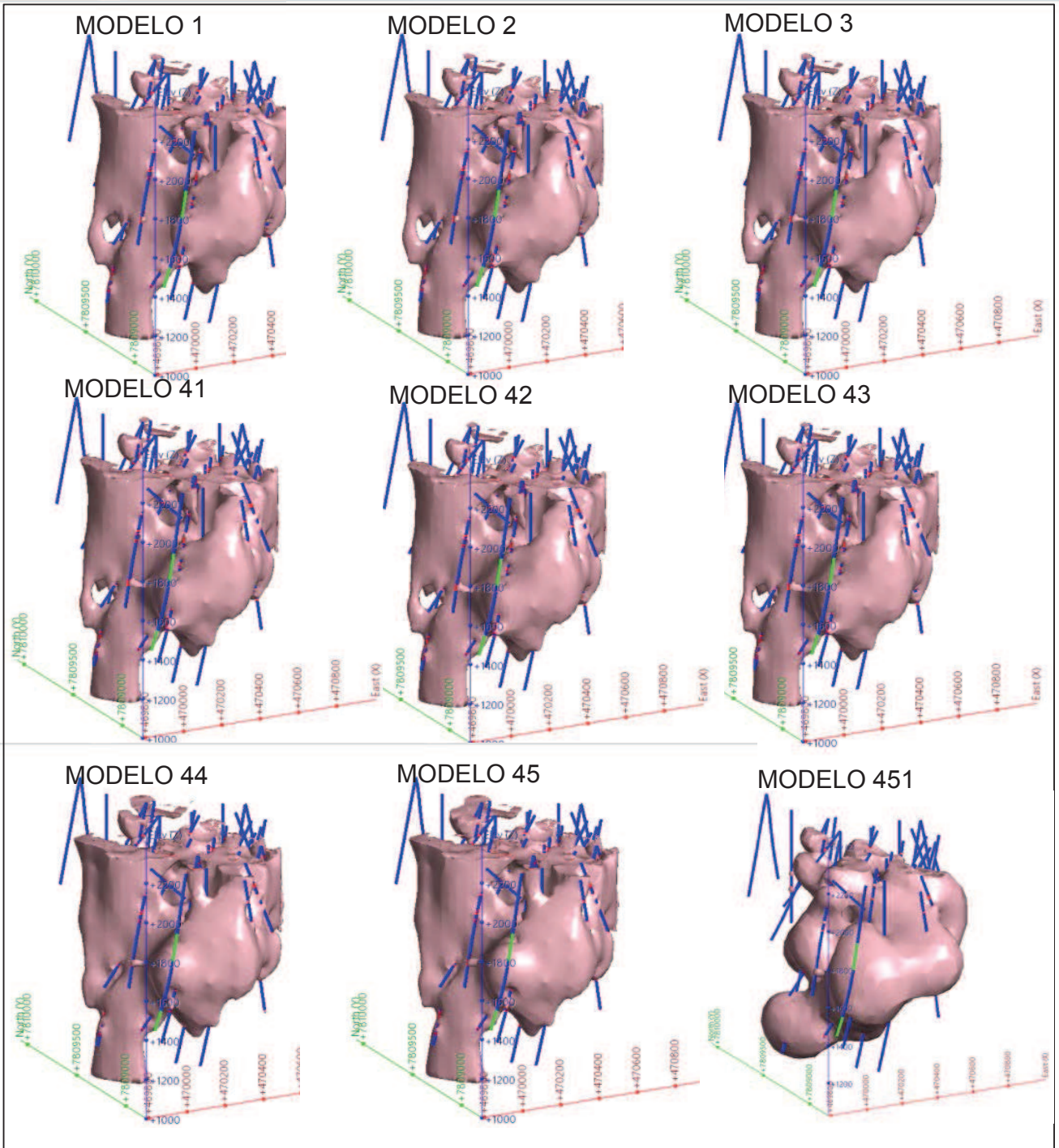


Figura 5.1: Modelos implícitos de la subzona mineral de calcopirita del proyecto Mocha.

5.2 Comparación Modelos 3D Implícitos y Explícito

Al comparar ambas metodologías de modelamiento, se desprende lo siguiente:

- Los modelos implícitos no requieren tiempo de digitalización de secciones geológicas. Implica disminución de horas de trabajo, y obtención de resultados rápidamente.
- En casos puntuales, se pueden agregar polilíneas para modificar algunas superficies.
- En este ejercicio se generaron modelos implícitos con y sin polilíneas, ambos resultados válidos.
- Con el método de modelamiento implícito se pueden probar varios escenarios posibles de modelos en un corto plazo de tiempo. En el modelo explícito se requiere destinar h/h sólo para la digitalización de una nueva interpretación.
- Los modelos implícitos pueden procesar gran cantidad de datos, sólo teniendo como límite el hardware.
- Los modelos implícitos se pueden actualizar rápidamente. En el modelo explícito es necesario volver a interpretar y digitalizar nuevamente.
- Los modelos implícitos consideran todos los datos y en función de las distancias, se generan superficies que permiten la creación de volúmenes que obedecen a los datos duros y las características geológicas aportadas por el usuario. En el modelo explícito se debe controlar la interpretación entre secciones, para evitar incluir datos ajenos a la variable a modelar.
- La utilización de modelos implícitos permite obtener resultados rápidos puede representar la viabilidad de un proyecto, por lo tanto disponer de un modelo geológico tridimensional y dependiente del 100% de los datos, permite maximizar los resultados, como también optimizar los recursos económicos.

- Con el modelamiento implícito es posible obtener un modelo geológico tridimensional, robusto y ligado a los datos duros, caracterizando de manera natural la geometría del cuerpo mineralizado, en contraste con la regularidad de una extrusión (modelo explícito), y genera formas como las que el geólogo espera observar en un espacio tridimensional.

En la Figura 5.2 se observan los modelos implícito (4.5) y estático. Este último generado por la extrusión ortogonal de los polígonos de cada sección geológica. La gran diferencia y ventaja del modelamiento implícito es la utilización de los datos duros de sondajes y la continuidad de la interpretación en el espacio.

En relación al tonelaje de los modelos explícito y los modelos implícitos (Tabla 5.1), la diferencia entre el modelo explícito y el modelo implícito 4.5 es de 123.403 t, mínima diferencia con respecto a los otros modelos, implicando la similitud entre ambos modelos, pero con gran diferencia de continuidad entre ellos. Para el caso del modelo implícito 4.5.1 (sin polilíneas), la diferencia alcanza a 17,5 Mt, con respecto al modelo explícito, representando un 4%. Para efecto de determinar el potencial del proyecto Mocha, se podrían utilizar los modelos implícitos que involucran una diferencia menor al 5%.

En la Figura 5.2 se observan los modelos a) implícito, b) explícito y en c) ambos modelos vistos en planta. Los modelos a) y b) están generados con los mismos datos de sondajes, pero su geometría difiere en la continuidad espacial. El modelo implícito representa de mejor manera, la continuidad natural de la variable de calcopirita en el espacio.

CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelamiento implícito es una herramienta ágil, eficiente y robusta para generar modelos geológicos tridimensionales. En exploraciones es importante cuantificar el potencial de los recursos geológicos en etapas tempranas y definir si es atractivo para continuar nuevos trabajos, por lo tanto esta metodología facilita la obtención de un modelo geológico rápidamente.

Los resultados de este estudio, permiten comparar dos metodologías de trabajo para la generación de modelos tridimensionales, uno es el método tradicional utilizando la interpretación de secciones geológicas (modelo explícito) con la extrusión de los polígonos de cada sección para generar los volúmenes, y el otro método es el modelamiento implícito utilizando directamente los datos de sondajes.

Las principales ventajas de un modelo implícitos son:

- Los modelos implícitos no requieren tiempo de digitalización de secciones geológicas. Implica disminución de horas de trabajo, y obtención de resultados rápidamente.
- Con el método implícito se pueden probar varios escenarios posibles de modelos en un corto plazo de tiempo. En el modelo estático se requiere h/h sólo para la digitalización de una nueva interpretación.
- Los modelos implícitos pueden procesar gran cantidad de datos, sólo teniendo como límite el hardware.
- Los modelos implícitos se pueden actualizar rápidamente. En el modelo explícito es necesario volver a interpretar y digitalizar nuevamente.

- Los modelos implícitos consideran todos los datos, y en función de las distancias, se generan superficies que permiten la creación de volúmenes que obedecen a los datos duros y a las características geológicas aportadas por el usuario. En el modelo explícito se debe controlar la interpretación entre secciones, para evitar incluir datos ajenos a la variable a modelar.
- La utilización de modelos implícitos permite obtener resultados rápidos, siendo útil para analizar la viabilidad de un proyecto en relación a su potencial, por lo tanto disponer de un modelo geológico tridimensional y dependiente del 100% de los datos, permite maximizar los resultados, como también optimizar los recursos económicos.

Del cálculo de potencial en este estudio, se alcanzó una diferencia de 0,1 Mt (123.403 t), entre el modelo estático tradicional y el modelo implícito 4.5, demostrando la semejanza en volumen entre ambos modelos, pero favoreciendo en el modelamiento implícito la continuidad de la superficie en el espacio, generando una forma natural del cuerpo mineralizado (Bloomenthal, 1994; Turk & O'Brien, 199, 2002; Carr et al., 2001).

Con el modelamiento implícito es posible obtener un modelo geológico natural, tridimensional, robusto y ligado a los datos duros, y testear varias opciones de modelos en un corto plazo, según características geológicas, y de esta manera facilitar el avance en el entendimiento de los eventos, cronología, y dimensiones, y como consecuencia poder estimar su potencial de recursos.

REFERENCIAS

Blinn, J. 1982. A Generalization of algebraic surface drawing. ACM Transactions on Graphics, Vol. 1, N° 3, July 1982, p235-256.

Bloomenthal, J. 1994. An Implicit Surface Polygonizer. Graphics Gems IV, Edited by P. S. Heckbert, Academic Press, 1994, p324-349.

Carr, J.C., Beatson, R.K., Cherrie, J.B., Mitchell, T.J., Fright, W.R., Mc Callum, B.C., Evans, T.R. 2001. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions. Computer Graphics (SIGGRAPH '01 Conf. Proc.), p. 67–76. ACM SIGGRAPH.

Chiang, O., Villegas, P., Segovia, M.E. 2006. Informe de avance proyecto Mocha, síntesis de resultados y evaluación de recursos. Informe interno Codelco.

Cowan, E.J, Beatson, R.K, Fright, W.R., McLennan, T.J., Mitchell, T.J. 2002. Rapid geological modeling. Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium.

Cowan, E.J., Beatson, R.K., Ross, H.J, Fright, W.R., McLennan, T.J., Evans, T.R., Carr, J.C., Lane, R.G., Bright, D.V., Gillman, A.J., Oshust, P.A., Titley, M. 2003. Practical Implicit Modelling. 5th International Mining Geology Conference, 17-19 November 2003, p. 86-99, Bendigo, Victoria, Australia,.

Cowan, E.J., Lane, R.G., Ross, H.J. 2004. Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D. Mining Geology 2004, Workshop (eds: M.J. Berry and M.L. Quigley), Australian Institute of Geoscientists Bulletin, p4123-4125.

Cowan, E.J., Spragg, K.J., Everitt, M.R. 2011. Wireframe-Free Geological Modelling – An Oximoron or Value Proposition? Eighth International Mining Geology Conference, Queenstown, New Zealand, 22-24 August 2011.

Cowan, E.J. 2012. The Deposit Model Paradox. Structural Geology and Resources 2012, p48-49.

Cowan, E.J. 2014. The missing link in exploration – Rapid 3D geological modeling. <http://www.orefind.com>

Franke, R. 1982. Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods. Mathematics of computation, vol 38, number 157, January 1982, 181-200p.

Galli, C. 1957. Las Formaciones Geológicas en el borde occidental de la Punta de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. Rev. Minerales, N°56, p. 14-18, Santiago.

HARDY, R. 1971. Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces. Journal of Geophysical Research, March 10, 1971, vol 76, N°8, p. 1905-1915.

Hodkiewicz, P. 2014. New software for faster and better 3D geological modeling, folleto www.Lepfrog3d.com

Knight, R.H., Lane, R.G., Ross, H.J., Abraham, A.P.G., Cowan, J. 2007. Implicit Ore Delineation. En "Proceedings of Exploration 07: Fith Decennial international Conference on Mineral Exploration" edited by B. Milkereit, 2007, p.1165-1169.

Morse, B.; Yoo, T.; P. Rheingans, P.; Chen, D.; Subramanian, K. 2001. Interpolating implicit surfaces from scattered surface data using compactly supported radial basis functions. Shape modelling and Applications, SMI 2001, International Conference, p.89-99.

Riquelme, R. 2011. Nuevas tendencias en modelamiento geológico y recursos minerales. Geolnova.

Savchenko, V., Pasko, A., Okunev, O., Kunii, T. 1995. Function Representation of Solids Reconstructed from Scattered Surface Points and Contours. Computer Graphics Forum, Vol. 14 1995, number 4, p. 181-188.

Sillitoe, R. 1981. Regional aspects of the Andean porphyry copper belt in Chile and Argentina. Trans. Inst. Min. Metall., Section B, 90, p. B 15-36.

Sillitoe, R. 1988. Epochs of intrusion-related copper mineralization in the Andes, Journal of South American Earth Sciences, V1, p. 89-108.

Steward, M., de Lacey, J., Hodkiewicz, P., Lane, R. 2014. Grade Estimations from Radial Basis Functions – How Does it Compare with Conventional Geostatistical Estimation? Ninth International Mining Geology Conference / Adelaide, SA, 18-20 August 2014, p 129-139.

Turk, G., O'Brien, J. 1999. Shape Transformation Using Variational Implicit Functions. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series (SIGGRAPH 1999), P. 335-342, AUGUST 1999.

Turk, G.; O'Brien, J. 2002. Modelling with implicit surfaces that interpolate.
ACM Transactions on Graphics. Vol 21, N°4.

www.leapfrog3d.com, Help of Leapfrog Geo 2.2