

Modelamiento 3D aplicado a sectores con intensa fracturación y disolución de venillas de yeso en el yacimiento Bajo de la Alumbreira, provincia de Catamarca, Argentina.

Autores

Ariana Carrazana¹, Leandro Sastre Salim², Cristina Carrizo³

Resumen

Este trabajo muestra el proceso de interpretación y modelación geológica de determinados sectores dentro del yacimiento en los que predominan fragmentos de roca entre 1 cm y 8 cm, producidos por disolución total y/o parcial de venillas de yeso. Estas áreas reciben la denominación de *Rubble Zone* en el depósito de cobre y oro de Bajo de la Alumbreira. En base a la descripción de testigos de diamantina se estableció una nueva clasificación de zona de *rubble* subdividida según su tamaño en *Rubble Fino* y *Rubble Medio*. Es importante destacar que la ocurrencia de *rubble* en el yacimiento se concentra casi exclusivamente en zona de interés económico, en rocas con alteración potásica que pueden o no estar afectadas por eventos sobreimpuestos de alteración destructiva de feldespatos. El departamento de Geología perteneciente a la Gerencia de Servicios Técnicos de Mina, realiza periódicamente la interpretación y modelación tridimensional de las zonas de *rubble*. Esto incide directamente en optimización de la información geológica, estructural y económica generada para los diferentes clientes internos de Minera Alumbreira Ltd.

Palabras Claves: Bajo de la Alumbreira; disolución de venillas; rubble zone; modelamiento.

Abstract

This paper shows the geological interpretation and modeling process of the ore body sectors where there is predominance of rock fragments between 1 cm and 8 cm. These are formed by total and/or partial dissolution of gypsum veins. These areas are called *Rubble Zones* at the Bajo de la Alumbreira mine. Based on diamond drill hole core sample descriptions, a new classification of *rubble zones* has been established. These areas have been subdivided into *Fine Rubble* and *Medium Rubble*. It is important to highlight that the occurrence of rubble in the deposit is almost exclusively concentrated in the zone of economic interest, in rocks with potassic alteration that can be or cannot be affected by overlapping events of feldspar destructive alteration. The Mine Geological Department, which is part of the Technical Services Area, periodically performs the tridimensional interpretation and modeling of the s. This results in a better control of the structural and economic geology for the different Alumbreira internal customers.

Keywords: Bajo de la Alumbreira; veins dissolution; rubble zone; modeling.

¹ acarrazana@xstratacopper.com.ar Dpto. Geología. Gcia. Servicios Técnicos de Mina. Minera Alumbreira Ltd.

² lsastresalim@xstratacopper.com.ar Dpto. Geología. Gcia. Servicios Técnicos de Mina. Minera Alumbreira Ltd.

³ ccarrizo@xstratacopper.com.ar Dpto. Geología. Gcia. Servicios Técnicos de Mina. Minera Alumbreira Ltd.

INTRODUCCIÓN

El yacimiento de Bajo de la Alumbraera está ubicado en el noroeste de Argentina, en la provincia de Catamarca (Figura 1). Ocurre en una región conocida como “Cinturón Metalogénico de Pórfidos de Cobre”. Se encuentra a 400 Km. al noroeste de Catamarca Capital y a 320 Km. al suroeste de San Miguel de Tucumán. La ruta que posibilita el acceso a la mina, es la Nacional N° 40 que une las localidades de Belén, Los Nacimientos y Santa María.



Figura 1: Mapa de ubicación de Bajo de la Alumbraera

En este trabajo se hace un enfoque particular de sectores donde la disolución de venillas de yeso ha ocasionado que el material rocoso se encuentre finamente fragmentado (*rubble zone*). Estos sectores son considerados en el diseño del pit final, incidiendo en la determinación de los ángulos inter-rampa y de las zonas de doble banco, afectando directamente a la estabilidad de taludes.

Las zonas de rubble causan, además, situaciones particulares en las operaciones de mina y en la perforación de pozos de voladuras, tales como aprisionamiento de herramientas, derrumbes, rediseños de mallas y modificaciones en el factor de carga de explosivos. En la Planta de Tratamiento el *rubble* produce alteraciones en el proceso de molienda disminuyendo

la eficiencia de los molinos SAG, debido a que el material no logra ser expuesto en su totalidad a los eventos de fractura; esto tiene como efecto un incremento en la carga circulante ocasionando desajustes en el sistema de flotación.

Por este motivo se ha considerado de gran importancia, la realización de un modelo tridimensional de estos sectores mediante el software MineSight 3D, para poder realizar el cálculo de los volúmenes de roca afectados y su continuación en profundidad. De esta manera se logra obtener información predictiva de las futuras áreas a ser minadas.

GEOLOGIA

Bajo de la Alumbraera es según Guilbert (1995) un yacimiento porfírico de cobre y oro muy regular y de alta simetría con un zonamiento clásico de alteración hidrotermal y mineralización. Se localiza en el complejo Volcánico de Farallón Negro emplazado durante el Mioceno medio a tardío (Sasso 1998); situado sobre uno de los escalones topográficos que ascienden desde las Sierras Pampeanas hacia la Puna. Aflora en un bajo topográfico, formado por la erosión diferencial de los distintos halos de alteración que componen el depósito. Tiene una superficie de 3.200 m por 2.200 m y una elevación central promedio de 2.560 m.s.n.m.

Está enmarcado por rocas de composición andesítica con intrusión de una serie de pórfidos dacíticos que generaron circulación de fluidos hidrotermales a gran escala alterando y mineralizando, tanto a las fases intrusivas, como las rocas volcánicas de caja. Mediante un mapeo detallado (Proffett 1997, 2000), se pudo definir un total de 7 intrusiones separadas, incluyendo fases pre-, sin- y post-mineralización.

Los eventos de alteración hidrotermal frecuentes en el yacimiento están caracterizados por alteración potásica, alteración cuarzo-magnetita, alteración destructiva de feldespatos (FDA) y alteración propilítica.

El yacimiento se encuentra afectado por un importante fallamiento post-mineral, que desplaza litologías, alteraciones y mineralizaciones. En la parte central y este predominan fallas normales de rumbo

norte-noroeste/sur-sureste con fuerte buzamiento hacia el oeste (Falla Ron, Falla de Yeso, Falla 56-50, Falla Colorado norte y sur). En el sector suroeste se observan fallas normales con dirección noroeste/sureste y moderado buzamiento hacia el noreste (Falla Steve's y SOS).

La mineralización de interés económica se encuentra diseminada y en stockwork. Los sulfuros principales son calcopirita y pirita. La calcopirita es el principal mineral de cobre y se encuentra diseminado y en venillas de distintos tipos y asociaciones mineralógicas. La mayor parte del oro se presenta en granos libres, el promedio de las partículas es de alrededor de 10 micrones.

Los minerales de ganga más abundantes son el cuarzo, los carbonatos y los sulfatos cálcicos, principalmente yeso y anhidrita. Los dos últimos presentan la particularidad de estar ausentes en ciertos sectores de la mina debido a procesos de disolución, lo que da origen a sectores denominados *rubble zone*; concepto que será ampliado a continuación.

CONCEPTO Y CLASIFICACION DE RUBBLE ZONE

El término *rubble zone* hace alusión a una característica física particular presente en algunas rocas. La traducción literal corresponde a ***rubble*** = *escombro*, ***zone*** = *zona*.

Las zonas de *rubble* se presentan en las paredes del *open pit* como material colapsado, debido a la disolución de venillas de yeso. Se observa una roca muy fragmentada y con bastante friabilidad. La fragmentación responde a diferencias litológicas e intensidad de venulación. Por ejemplo en andesitas, los fragmentos son muy angulosos y su homogeneidad en cuanto a tamaño es más evidente que en pórfidos, donde los fragmentos son un poco más redondeados y heterogéneos. En general se trata de fragmentos de roca de 1 cm a 8 cm. Litológicamente las zonas de *rubble* predominan en andesitas; esto puede deberse a la mayor concentración de yeso en estas rocas por tener un alto contenido y disponibilidad de calcio en la asociación mineral primaria (plagioclasas).

Es importante destacar que la ocurrencia de *rubble* en el yacimiento se

concentra casi exclusivamente en la zona de interés económico.

Con respecto a la alteración el *rubble* predomina en rocas con alteración potásica que pueden o no estar afectadas por eventos de alteración destructiva de feldespatos sobreimpuesta.

En pozos de perforación con diamantina las zonas de *rubble* presentan características muy particulares (Figura 2). Las más importantes son: el tamaño de fragmento varía entre 1-8 cm y son generalmente angulosos y con caras planas; no se observan minerales arcillosos y hay ausencia total de óxidos de hierro. Además en algunos fragmentos se pueden observar rastros de venillas diluidas (venillas sin relleno) y muy pocos fragmentos presentan remanentes de yeso en sus venillas.

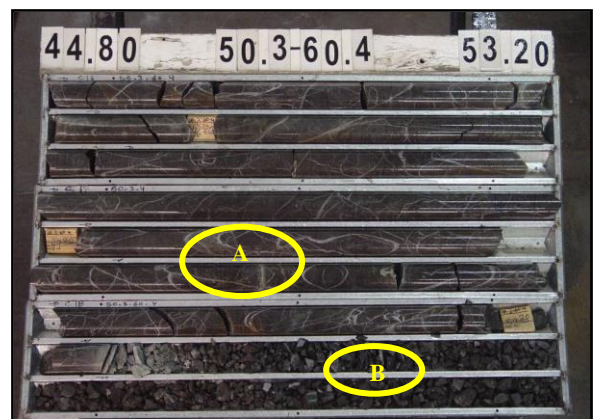


Figura 2: A) intensa venulación. B) disolución total y fragmentación muy fina.

De lo expuesto hasta ahora se ha realizado una clasificación de los sectores de *rubble* (Figura 3) principalmente sobre la base de un patrón granulométrico un tanto regular observado durante el análisis. A continuación se resume esta clasificación.

1- ***Rubble Fino* (Rf)**: corresponde a zonas donde se pueden observar las características antes enumeradas y cuyos fragmentos de roca tengan un tamaño entre 1cm – 5 cm.

2- ***Rubble Medio* (Rm)**: corresponde a zonas donde se pueden observar las características antes enumeradas y cuyos fragmentos de roca tengan un tamaño entre 5 cm – 8 cm.

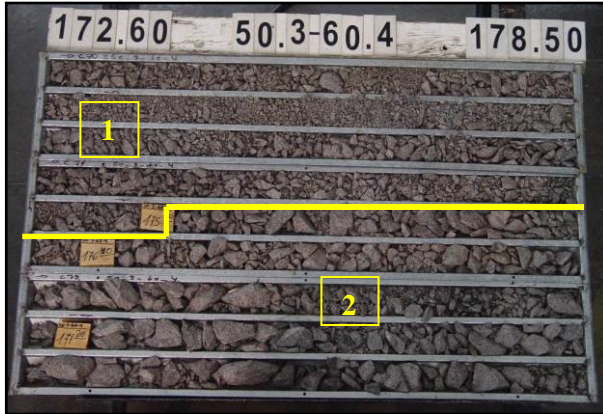


Figura 3: 1) zona de rubble fino (Rf) y 2) zona de rubble medio (Rm).

Una clasificación complementaria basada en evidencias de disolución parcial permite definir:

3- Zonas de Fractura con Disolución Parcial (ZFcd): corresponden a sectores donde se cree estar en presencia de material *rubble*, pero la fragmentación es mayor a los parámetros establecidos más arriba. Los fragmentos tienen además pequeñas venillas sin relleno, que dan una clara evidencia del proceso de disolución. Pero no se está en presencia de una zona de *rubble* propiamente dicha.

Cuando estamos en presencia de un material que no reúne estos aspectos podemos hablar de *Zonas de Fractura* o *Zonas de Falla*, según sea el caso.

De acuerdo al mapeo (escala 1:2000) realizado periódicamente en la mina y las observaciones de campo complementarias, las zonas de *rubble* son más frecuentes en andesitas y pórfidos tempranos y son nulas en pórfidos tardíos. En mayor proporción se han observado en andesitas con alteración potásica y afectando principalmente al sector suroeste del *open pit*. Es frecuente encontrar a las zonas de *rubble* asociadas y afectadas por fracturas y/o fallas, donde en algunos casos se producen deslizamientos importantes de material (Ej.: Figura 4).

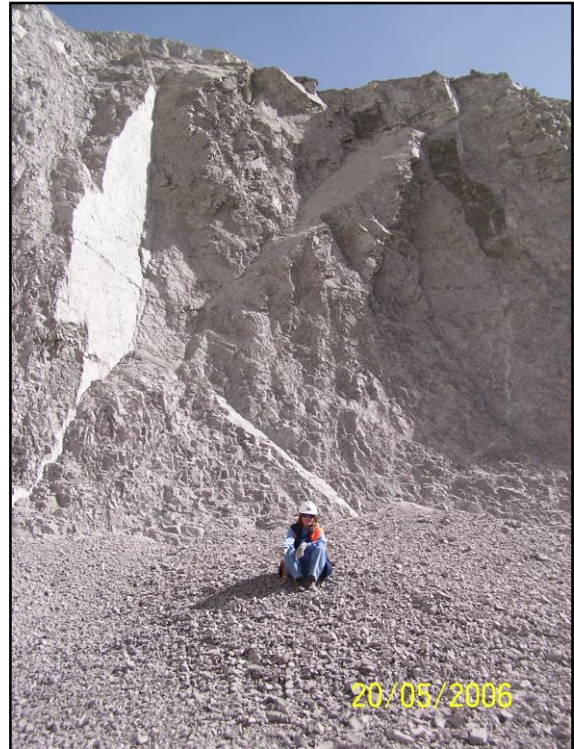


Figura 4: Sector de rubble en banco 2186 - fase 6

En lo que respecta a la estabilidad de los taludes, estos sectores presentan valores promedio de RQD (*Rock Quality Design*) de 10% (Figura 5) y GSI (*Geological Strength Index*) entre 20-40.

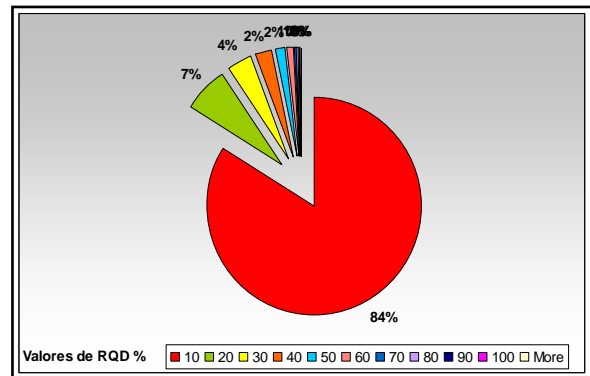


Figura 5: Síntesis del análisis estadístico sobre los valores de RQD %. Basado en el estudio de 1195 datos.

Por lo expuesto anteriormente se comenzó el proceso de modelación de las zonas de rubble utilizando el software MineSight 3D. Este programa permite graficar cuerpos sólidos para poder realizar cálculos de volúmenes correspondientes a los distintos tipos litológicos que se desean interpretar.

A continuación se hace una descripción de la metodología empleada en el proceso de modelación.

MODELACIÓN 3D

Se modelaron los cuerpos de roca separando la litología (andesitas y pórfidos) y el tipo de *rubble* (fino y medio).

Se utilizó la información procedente de todos los sondeos de diamantina y el mapeo sólo de las áreas consideradas como *rubble*. Se trabajó sobre los sondeos de exploración con una proyección de +8.5 -8.5 m utilizando las variables (litología) (*rubble* fino-*rubble* medio) y el mapeo de Pórfido *Rubble* y Andesita *Rubble*, transformados a DTM para poder utilizarlos en planta. La interpretación se hizo en cinco etapas. Las tres primeras se realizaron en 2D (interpretación en planta). Las restantes en 3D (interpretación tridimensional). Las figuras que se mencionan más abajo serán expuestas en el Anexo para mayor comprensión y visualización.

- La primera etapa consistió en el análisis de Andesita *Rubble* fino y Andesita *Rubble* medio. Se realizaron polilíneas rodeando a los tramos de sondeo y a las líneas de mapeo (Figura 6).

- La segunda etapa consistió en el análisis de Pórfido *Rubble* fino y Pórfido *Rubble* medio. Se realizaron polilíneas rodeando a los tramos de sondeo y a las líneas de mapeo (Figura 7).

- La tercera etapa consistió en analizar el mapeo donde se usó la misma metodología de polilíneas. Se interpretó tanto pórfido como andesita *rubble* (Figura 8).

- La cuarta etapa está basada en la creación de sólidos a través de todas las polilíneas realizadas en las etapas anteriores. Además se han creado polilíneas auxiliares para dar mejor forma a los cuerpos sólidos. Para poder modelar en esta etapa se debe trabajar en 3D (Figura 9).

- La quinta etapa consistió en la suavización de los sólidos creando nuevas curvas auxiliares, con equidistancias de 2

m contorneando los cuerpos realizados en los puntos anteriores (Figuras 10 y 11).

Como resultado final en este proceso, se muestran las figuras 12 y 13 del modelo terminado. La primera corresponde a una vista en planta y la segunda una vista en 3D de la intersección de los cuerpos con la topografía y su continuidad en profundidad.

Otras observaciones realizadas mediante el modelo de sólidos están referidas a dominios geotécnicos y a las fallas principales (falla de Steve y falla de Yeso) que atraviesan al *open pit*.

Se puede notar a partir de las trazas de los planos de falla que el sector en donde se concentra el mayor volumen de *rubble* es en el suroeste del *pit*, limitado por la falla de Steve. Entre ambas fallas, Steve y Yeso, la proporción de *rubble* es mínima, incrementándose nuevamente hacia el noreste entre las fallas de Yeso y Ron. En 3D la vista de las fallas y el sólido *rubble* muestran la misma tendencia en profundidad (Figuras 14-15-16).

Considerando los dominios geotécnicos, se observa que en el dominio de Steve la presencia de zonas de *rubble* es notoriamente mayor que en el resto de los dominios, mostrando un claro contraste con los dominios adyacentes, el dominio Steve Sur Oeste y el dominio 3 A.

En el sector Este del *pit*, hay un predominio de andesita *rubble*, y su distribución en los dominios de Ron y 2 A es similar. En el norte y noroeste del *pit*, los dominios de Yeso muestran menor abundancia relativa en comparación con los otros sectores (Figura 17).

CONCLUSIONES

1- Mediante observaciones de campo es frecuente observar contactos netos entre zonas con disolución total y/o parcial de venillas de yeso (*rubble*) y sectores de rocas con yeso abundante. Esto podría explicarse por desplazamientos de bloques asociados a fallas. También se observa que los contactos litológicos son sectores favorables para la generación de *rubble*, ya que es posible considerar a estos sectores como zonas de mayor debilidad en donde la fracturación es muy intensa con el consecuente relleno y disolución de las venillas de yeso.

2- Una posible hipótesis acerca de la causa de disolución de venillas en determinados sectores del yacimiento está vinculada a paleoniveles freáticos asociados a fracturas y diferencias de permeabilidad. Los sulfuros no están oxidados lo que representaría que las condiciones del agua serían reductoras, evidenciando que no se trata de agua meteórica infiltrada a través de las fracturas.

3- Se realizó un modelo de sólidos en MineSight 3D para andesita *rubble* y pórfido *rubble*, empleando como información base el mapeo de detalle 1:2000 y la descripción de sondajes de exploración. Se encuentra un volumen predominante de andesita *rubble fino* en comparación con los demás tipos presentes en el yacimiento. La fragmentación del tipo medio domina en el pórfido, sin embargo, el *rubble medio* es cuantitativamente muy inferior al *rubble fino*. Estas rocas están afectadas por alteración potásica en diferentes intensidades. Los volúmenes obtenidos son los siguientes:

- Andesita rubble fino: 4.345.156 Tn
- Pórfido rubble fino: 2.568.800 Tn
- Andesita rubble medio: 2.366 Tn
- Pórfido rubble medio: 8.057 Tn

4- Las áreas del open pit en las cuales se encuentran expuestos los mayores afloramientos de *rubble* se localizan en el sector suroeste, hacia el techo de la falla Steve's. Estructuralmente las zonas de *rubble* están controladas por fallas y fracturas, como es el caso de las áreas afectadas por la falla Steve's donde se observa un movimiento relativo de los bloques en sentido normal y de rumbo; mientras que en otras zonas como en la falla de Ron se presenta *rubble* a ambos lados del plano de falla

5- En los sectores de *rubble*, las variables geotécnicas presentan valores de 10% para el RQD (*Rock Quality Design*) y entre 20-40 para el GSI (*Geological Strength Index*). La presencia de *rubble* en el dominio Steve's (dominio 4) es volumétricamente mayor en comparación con los demás dominios geotécnicos.

6- El mayor conocimiento de las zonas de *rubble* permite:

- i. Utilizar la información en el diseño y proceso de optimización del pit final, incidiendo en la determinación de ángulos inter-rampa, para evitar realizar sectores de doble banco en zonas de *rubble* o inmediatamente por encima de ellas.
- ii. Realizar una mejor evaluación del material minado con destino a la planta de tratamiento, para evitar inconvenientes en el proceso de molienda y flotación.
- iii. Controlar la estabilidad de taludes periódicamente, según el avance y plan de minado.
- iv. Optimizar el diseño de mallas de perforación y carguío. Esto permite analizar las dimensiones de las mallas y la cantidad de explosivos a utilizar para las voladuras.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Ahumada Selva Pastora, 2000-2002.

Avance de Proyecto de Investigación: Determinación volumétrica y estudio de las implicancias técnicas-económicas de las zonas de disolución de yeso en el yacimiento Bajo de la Alumbraera, Catamarca, Argentina. Beca interna de formación de Postgrado, Rubro Minería.

Brown Steve, 2004. Geología y mineralización del yacimiento cobre-oro de Bajo de la Alumbraera. Curso Latinoamericano de Metalogenia UNESCO-SEG, 2004. Pág. 101-120.

Guilbert John M, 1995. Yacimiento de cobre y oro de Bajo de la Alumbraera, Argentina: Historia, exploración y desarrollo de modelos geológicos. Informe interno de Minera Alumbraera. Pág. 155-175.

Informe Interno. Metodología para la obtención del valor de GSI en sondajes mediante fotografías. Gerencia de Servicios Técnicos de Mina, Departamento de Geología, Área de Geotecnia. Minera Alumbraera. Catamarca, Argentina.

Informe Interno, 2004. Bajo de la Alumbreira, Open Pit Dewatering Model Update. Preparado por Water Management Consultants Ltda. Minera Alumbreira. Catamarca, Argentina. 3381/R1_Draft. Agosto 2004.

Informe Interno, 2005. Open Pit Hidrology and Dewatering Study. Preparado por HYDRO-GEO Consultants. Minera Alumbreira. Catamarca, Argentina. Final Report. 14 de Julio, 2005.

Proffett John M., 1997. Geology of the Bajo de la Alumbreira porphyry copper-gold deposit, Catamarca Province, Argentina. May, 1997. Pág. 1-169.

Proffett John M., 2000. Geology of the Bajo de la Alumbreira porphyry copper-gold deposit, Catamarca Province, Argentina. September, 2000 version. Pág 1-77.

Sasso Anne M., Clark Alan H., 1998. The Farallón Negro Group, northwest Argentina: Magmatic, Hydrothermal and Tectonic Evolution and Implications for Cu-Au Metallogeny in the Andean Back-arc. Society of Economic Geologists Newsletter. Number 34. Julio 1998. Pág. 7-18.

Tambor J.L., McWilliam W.J. Distribution and origin of the "gypsum line" in the Valley Copper Porphyry deposit, Highland Valley, British Columbia. Project 70004. Geology Survey, Canada, Paper 76-1B. Pág. 335-341.

Ulrich Thomas, 1999. Bajo de la Alumbreira: Genesis of a Porphyry Cu-Au Deposit, based on Geology, Alteration Geochemistry, Fluid-inclusion Microanalysis and Stable Isotope Studies. Final Report to Mount Isa Mines Exploration. Swiss Federal Institute of Technology – ETH. Isotope Geology and Mineral Resources. Zurich, Switzerland. Pág. 1-131.

ANEXO

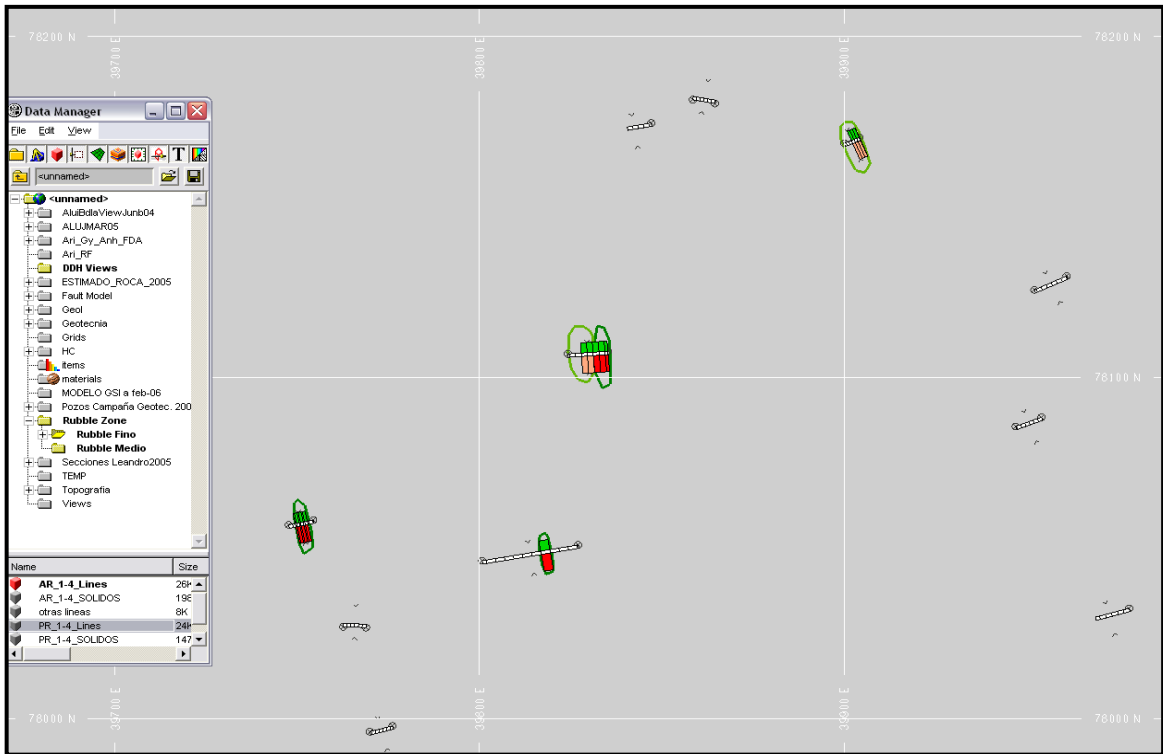


Figura 6: interpretación de los sectores con andesita rubble fino y medio en los tramos de sondeos de diamantina. El análisis se realiza en 2D con una superposición vertical de $\pm 8,5$ m.

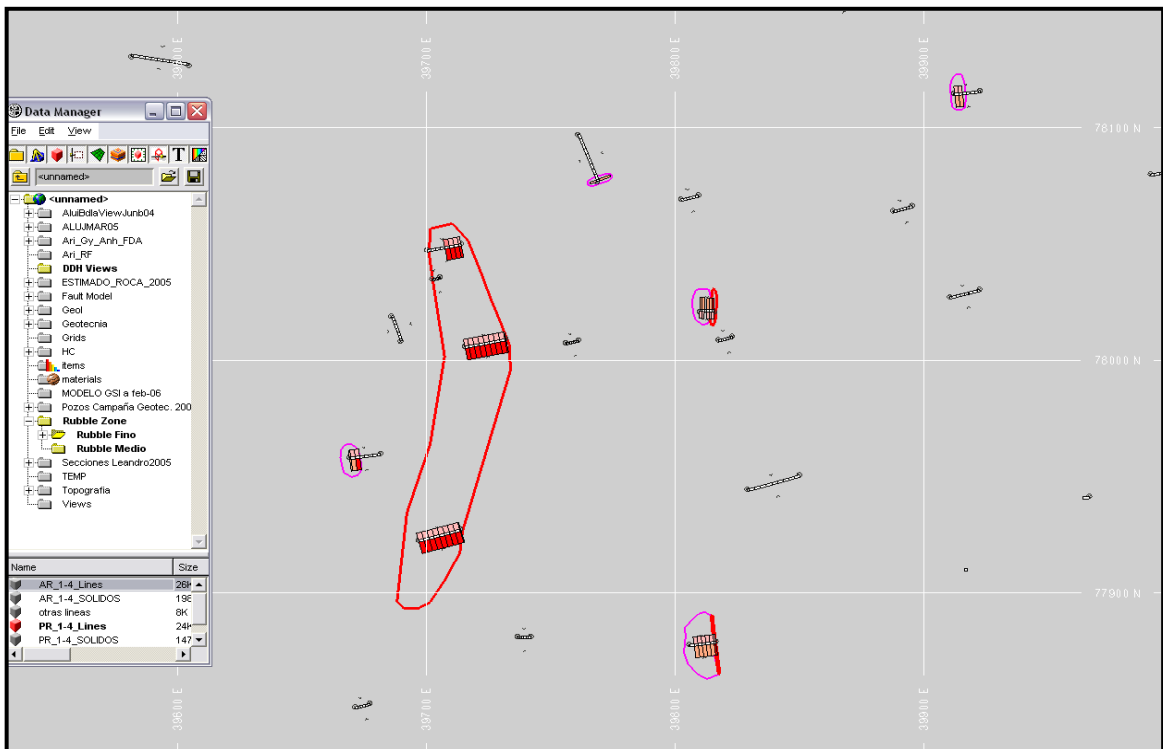


Figura 7: interpretación de los sectores con pórfido rubble fino y medio en los tramos de sondeos de diamantina. El análisis se realiza en 2D con una superposición vertical de $\pm 8,5$ m.

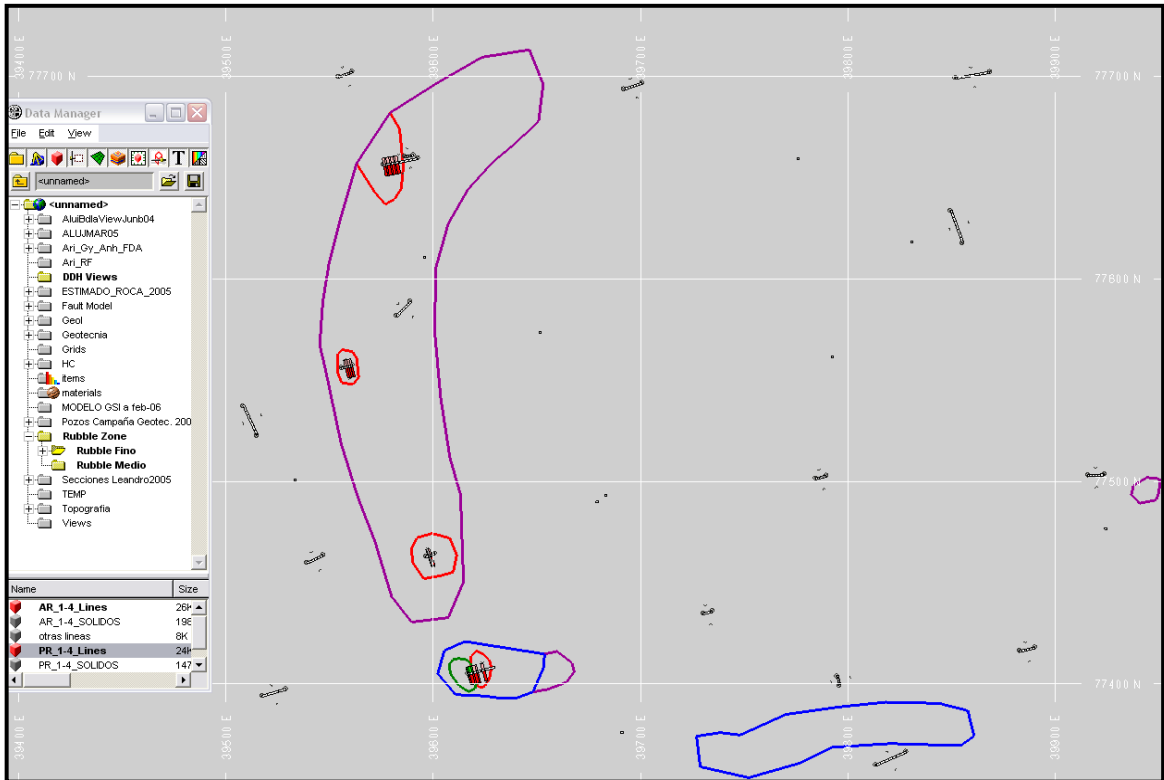


Figura 8: interpretación de los sectores con pórfido rubble y andesita rubble según tramos de mapeo en la cara de los bancos del open pit y su correlación con sondajes de diamantina. El análisis se realiza en 2D con una superposición vertical de $\pm 8,5$ m.

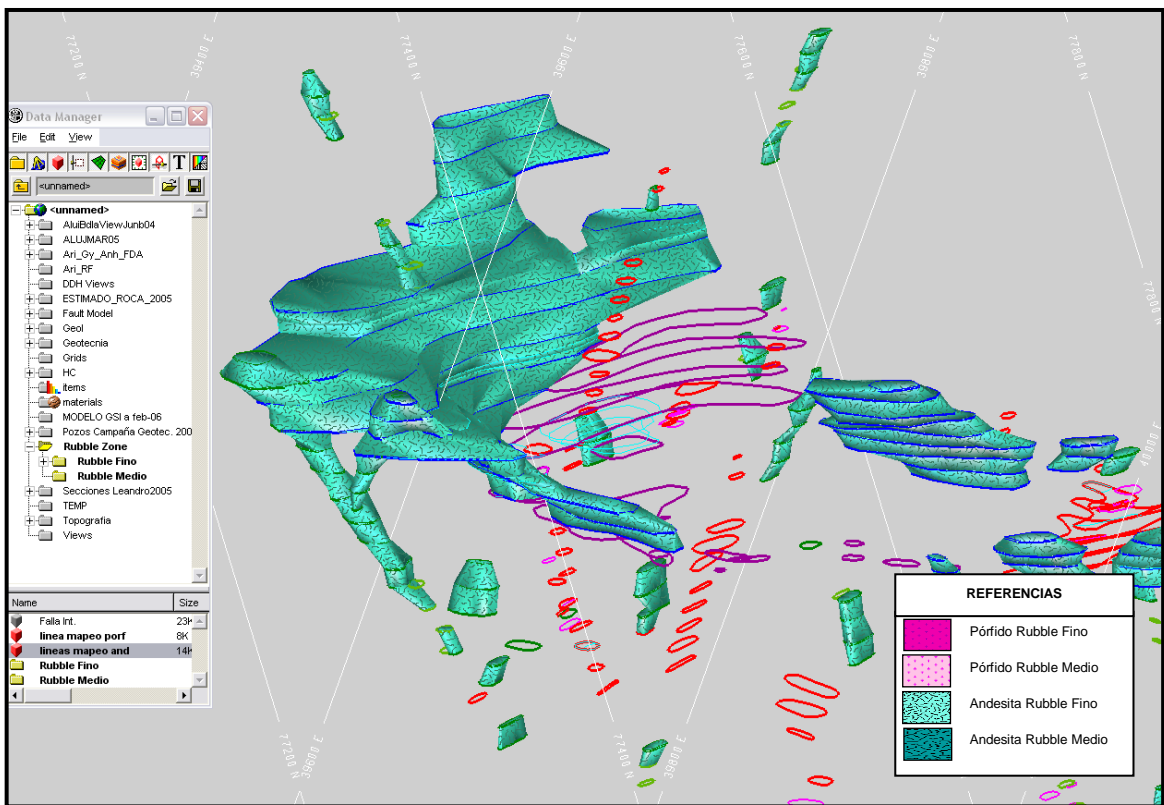


Figura 9: creación de cuerpos sólidos según las polilíneas antes interpretadas. La modelación se realiza en 3D.

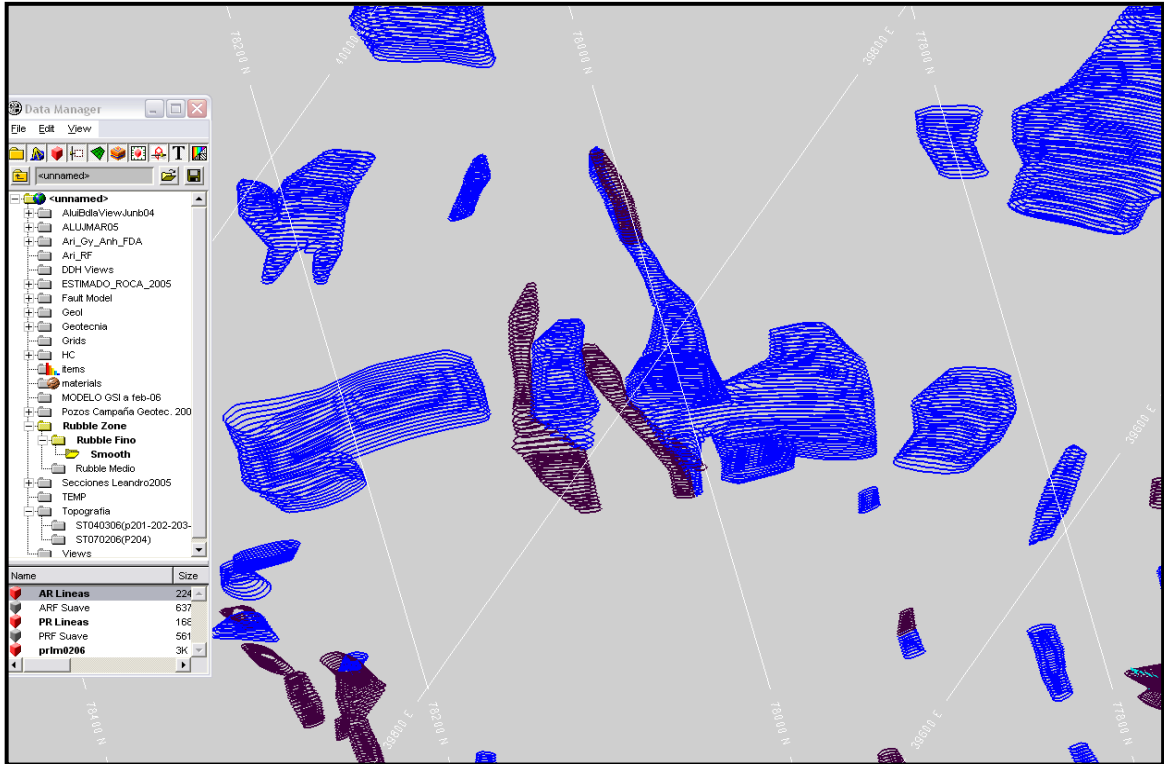


Figura 10: creación de curvas adicionales equidistantes 2 metros para lograr cuerpos sólidos de geometría más suave. La modelación se realiza en 3D.

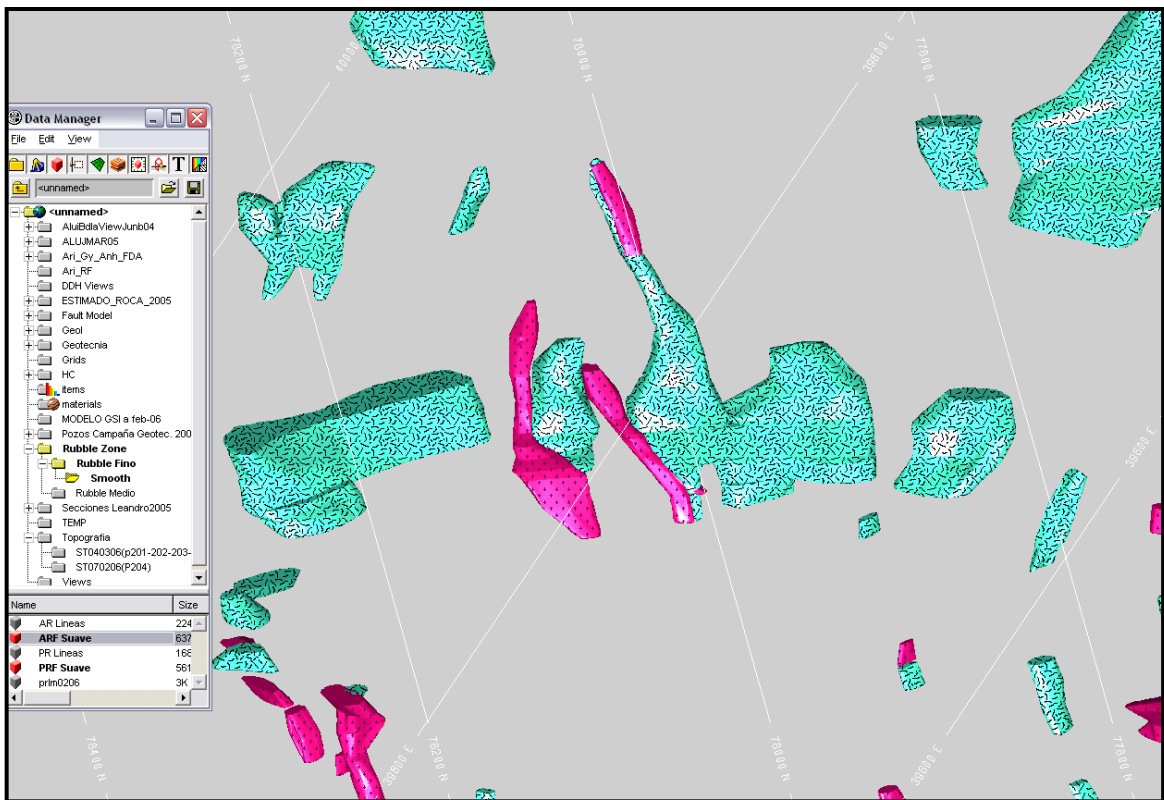


Figura 11: modelo suavizado según los pasos de la figura anterior. La modelación se realiza en 3D.

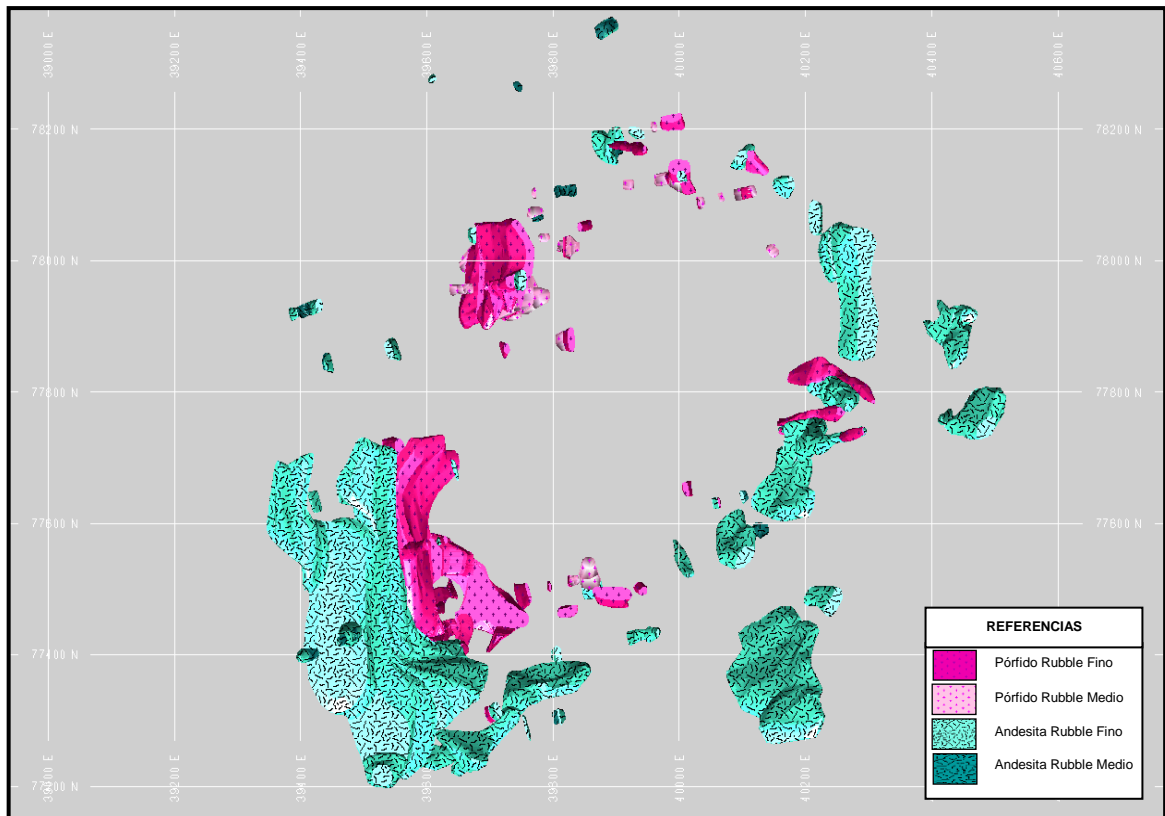


Figura 12: vista en planta del modelo final. Se puede observar que el mayor volumen de rubble se concentra en rocas de composición andesítica.

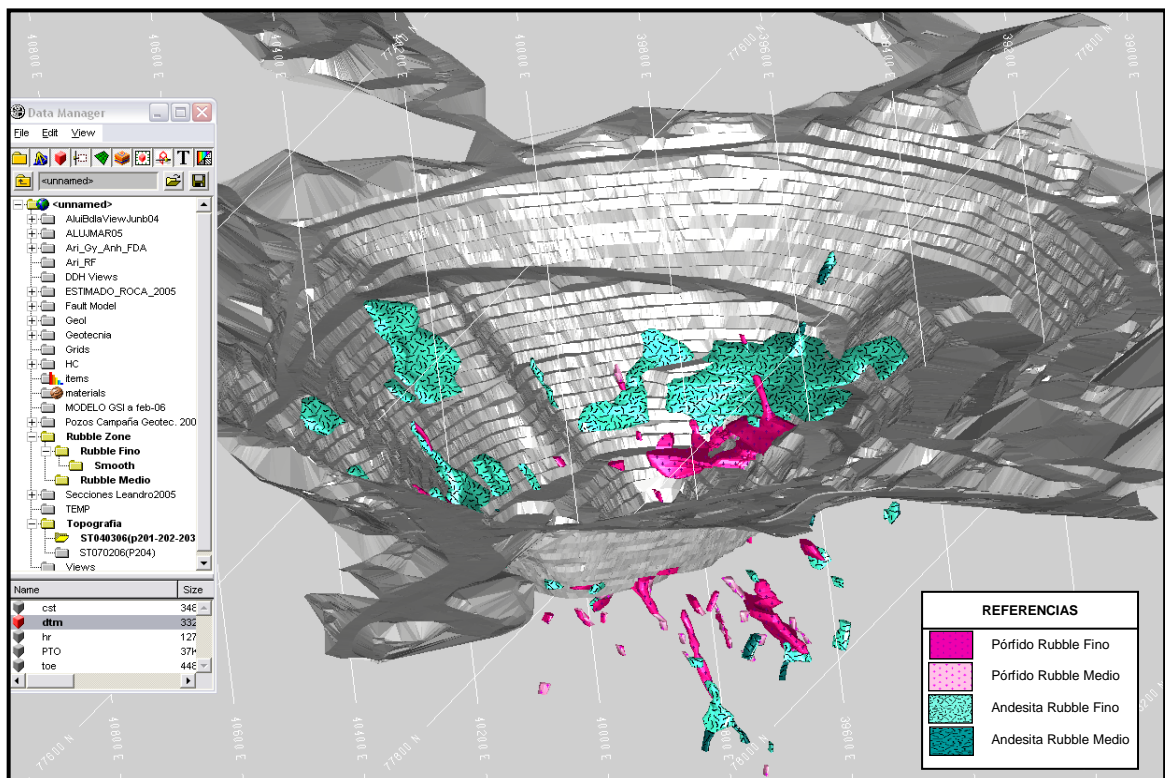


Figura 13: vista 3D del modelo final interceptando a la topografía. Continuidad de los cuerpos en profundidad. La modelación en profundidad está basada sólo en datos de sondajes de diamantina.

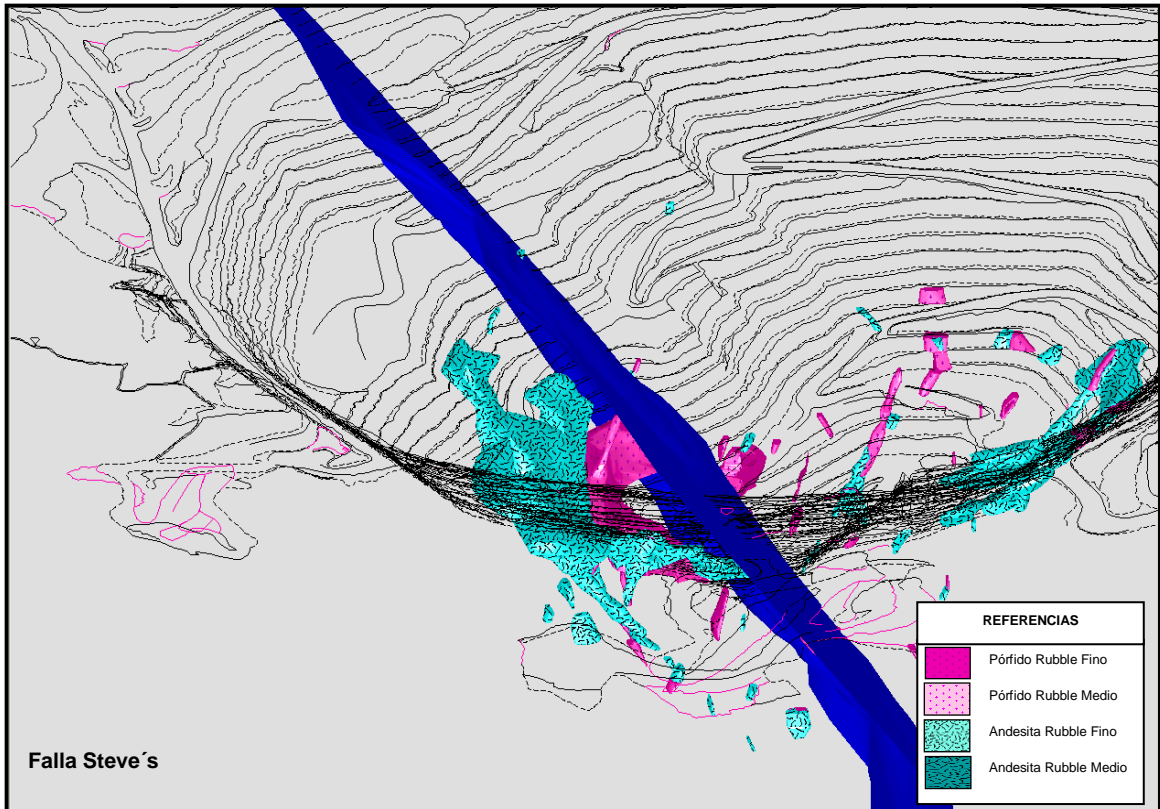


Figura 14: intersección de la falla de Steve con la topografía y las zonas de rubble. Se puede observar el predominio de andesita rubble y el mayor volumen de estos cuerpos en el bloque elevado de la falla.

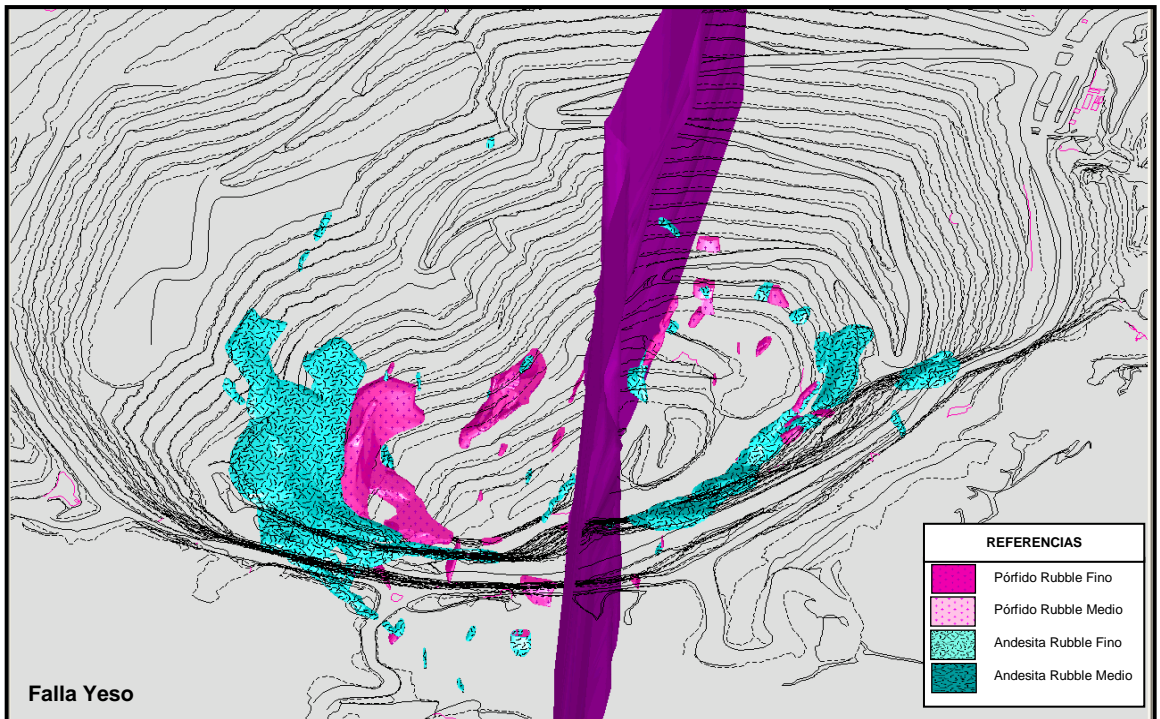


Figura 15: intersección de la falla de Yeso con la topografía y las zonas de rubble. Se puede observar un volumen menor de sectores con rubble.

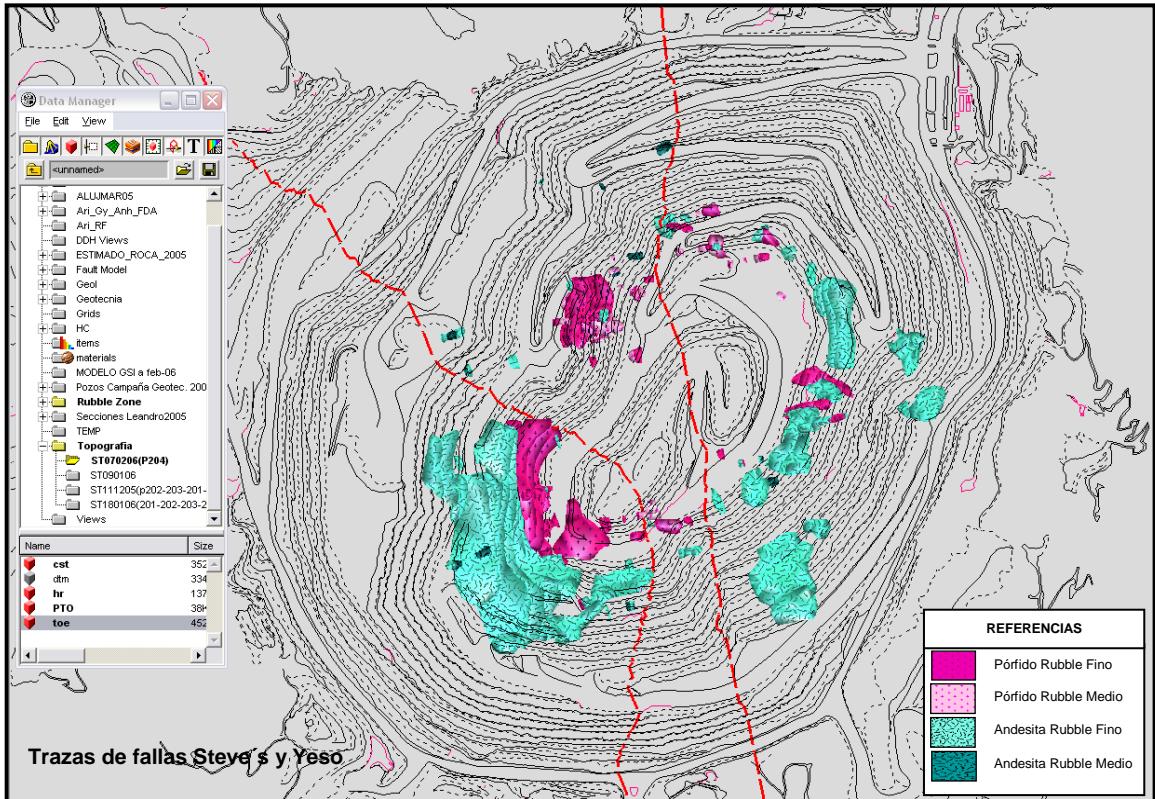


Figura 16: intersección de las trazas de falla con la topografía y las zonas de rubble. Se puede observar en planta lo descrito para las figuras 14 y 15. Nótese que entre ambas fallas el volumen de rubble es mínimo.

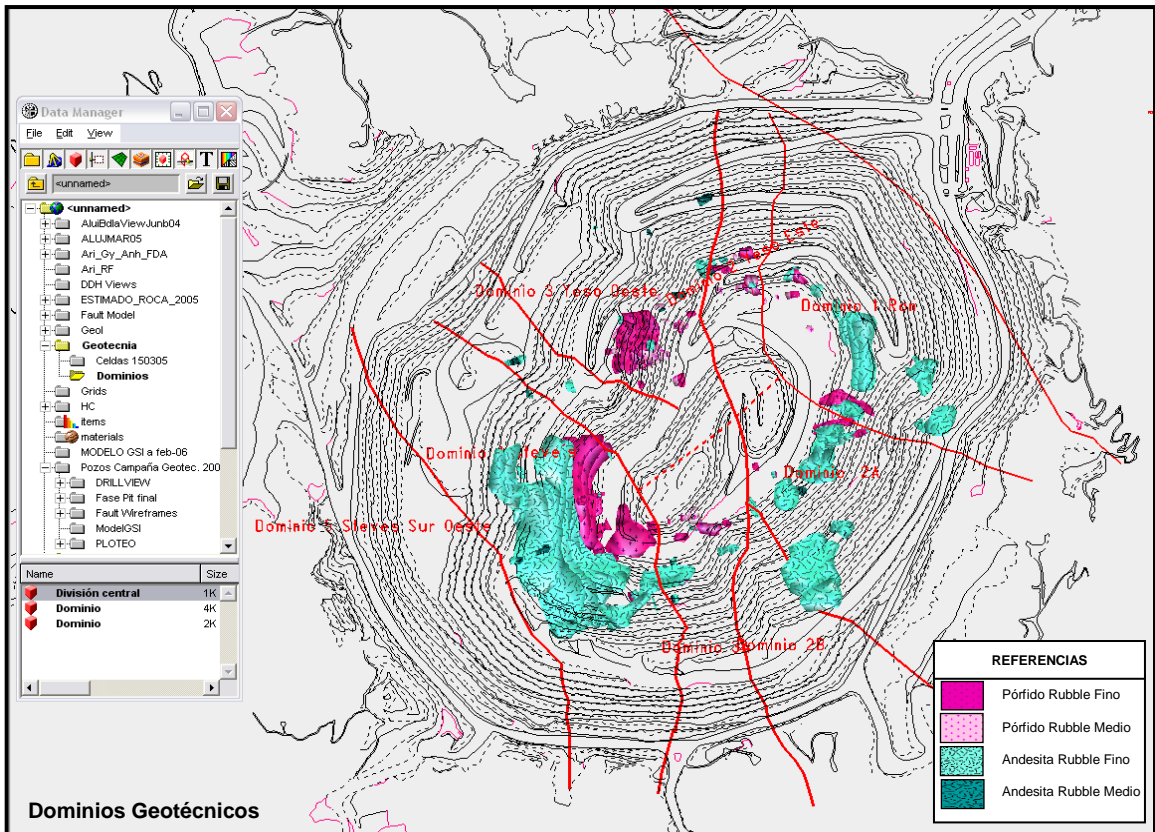


Figura 17: dominios geotécnicos y su relación con las zonas de rubble. El dominio de Steve concentre la mayor cantidad de material afectado por disolución.