

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“MODELAMIENTO GEOLÓGICO BASADO EN TRABAJOS
HISTÓRICOS Y ACTUALES DE LA MINA AGUA DULCE,
PORTOVELO-ECUADOR”.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

INGENIERÍA EN GEOLOGÍA

PRESENTADO POR:

JUAN ANDRÉS PACHECO PAZMIÑO

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios, a mi madre Nedy por ser mi apoyo incondicional durante toda mi vida, mi padre Jhony por ser mi guía en mi carrera y a mis hermanos Javier y Priscila que con su amor y apoyo pude llegar donde estoy.

A todos mis amigos que me dio la universidad desde el pre hasta terminar mi carrera y en especial a Lady, Jennifer, Jorge, José Daniel, Rubén y Ángel que con su amistad y compañerismo hicieron que esta etapa de mi vida fuera increíble.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a cada uno de los docentes que he tenido a lo largo de mi carrera universitaria que con sus conocimientos han aportado no solo en mi formación como profesional sino también como persona. Un agradecimiento especial a mis tutores Eduardo Díaz y David Altamirano que me guiaron durante cada etapa de mi trabajo de titulación. A la empresa Minera Inca por proporcionarme acceso a las instalaciones y al Ing. Guillermo Rosero por su paciencia y proporcionarme los recursos necesarios para culminar con éxito mi trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Juan Andrés Pacheco Pazmiño* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Juan Andrés Pacheco Pazmiño

EVALUADORES

.....
Ing. David Altamirano, M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Eduardo Díaz, M.Sc.

PROFESOR TUTOR

.....
Ing. David Altamirano, M.Sc.

PROFESOR COTUTOR

RESUMEN

La mina Agua Dulce ubicada en el cantón Portovelo forma parte del subdistrito minero El Oro que, al igual que en otras ciudades del Ecuador y del mundo, cuenta con numerosas labores de pequeña minería y minería artesanal. Dichos trabajos se han realizado de una manera empírica, sin aplicar conocimientos técnicos para una óptima búsqueda y extracción de los recursos naturales, lo que ha ocasionado un mayor tiempo de producción y por ende mayores pérdidas económicas. El objetivo del presente trabajo es diseñar un modelado geológico de los recursos de la mina Agua Dulce mediante la recopilación de datos históricos y aplicaciones de los softwares RecMin, ArcGis y AutoCAD para el mejor aprovechamiento de los recursos mineros. La metodología aplicada se lo dividió en tres fases: i) Recopilación de Información y Creación de base de Datos, ii) Creación de Modelos Individuales y iii) Creación de Modelo Geológico Final. El estudio reconoció zonas favorables para la exploración y explotación de oro, se catalogó los recursos en 9 grupos de acuerdo con leyes del mineral para la veta Cantabria; así como su relación con un cierto tipo de roca (intrusión) y estructuras. En las vetas Agua Dulce y Soroche, debido a la distribución espacial y la poca cantidad de los datos de muestreo no se obtuvo resultados relevantes. Se recomienda con la información proporcionada crear planes de exploración más avanzados, así como diseños de producción y aplicación de métodos geoestadísticos con herramientas más sofisticadas.

Palabras Clave: modelado geológico, recurso, geoestadística, RecMin,

ABSTRACT

The Agua Dulce mine located in the city of Portovelo is part of El Oro mining subdistrict which, as in other cities in Ecuador and the world, has numerous small-scale and artisanal mining operations. These works have been carried out in an empirical way, without applying technical knowledge for an optimal search and extraction of natural resources, causing longer production times and therefore greater economic losses. The aim of this work is to design a geological modeling of the resources of the Agua Dulce mine by collecting historical data and applications of RecMin, ArcGis and AutoCAD software for the best use of mining resources. The applied methodology was divided into three phases: i) Compilation of Information and Creation of Database, ii) Creation of Individual Models and iii) Creation of Final Geological Model. The study recognized favorable areas for the exploration and exploitation of gold, cataloging the resources in 9 groups according to the ore grades for the Cantabria vein: as well as its relationship with a certain type of rock (intrusion) and structures. In the Agua Dulce and Soroche veins, due to the spatial distribution of the sampling data and the small amount of these, no relevant results were obtained. It is recommended with the information provided to create more advanced exploration plans, as well as production designs and application of geostatistical methods with more sophisticated tools.

Keywords: geological model, resources, geostatistical, RecMin

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Zona de Estudio.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO 2.....	6
2. Marco teórico	6
2.1 Modelos en Ingeniería Geológica	6
2.2 Modelo Geológico.....	7
2.2.1 Clasificación de Modelos Geológicos.....	7
2.3 Definiciones Importantes en Minería.....	10
2.3.1 Ley Mineral.....	11
2.3.2 Ley Mínima de Corte (cut-off).....	11

2.4	Recurso	11
2.4.1	Clasificación de Recursos	12
2.5	Reserva	12
2.5.1	Clasificación de Reservas	13
2.6	Geoestadística	14
2.7	Programas Utilizados.....	14
2.7.1	RecMin	14
2.7.2	ArcGIS.....	15
2.7.3	AutoCAD	15
CAPÍTULO 3.....		16
3.	Marco Geológico	16
3.1	Geología Regional	16
3.2	Geología Local.....	18
CAPÍTULO 4.....		20
4.	Metodología	20
4.1	Fase I: Recopilación de Información.....	21
4.1.1	Creación de Base de Datos	24
4.2	Fase II: Creación de Modelos Individuales	28
4.2.1	Modelo Litológico	28
4.2.2	Modelo Estructural	34
4.2.3	Modelo de Leyes.....	36
4.3	Fase III: Creación de Modelo Geológico Final	39
CAPÍTULO 4.....		41
5.	Resultados Y ANÁLISIS.....	41
5.1	Modelo litológico	41
5.1.1	Modelo Litológico Superficial.....	44

5.1.2	Modelo Litológico Subterráneo.....	44
5.2	Modelo Estructural.....	45
5.3	Modelo de Leyes	46
5.3.1	Métodos de estimación de datos de leyes	48
5.3.2	Análisis Final de los Métodos Geoestadísticos	50
5.3.3	Modelo de Leyes Resultante.....	53
5.4	Modelo Geológico.....	55
CAPÍTULO 5.....		60
6.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	60
6.1	Conclusiones	60
6.2	Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA.....		62
APÉNDICES		i
Apéndice A: Trabajos actuales en la mina Agua Dulce		i
Apéndice B: Planos.....		i

ABREVIATURAS

ASM	Artisinal or Small-Scale Mining
CAD	Computer Aided Design
CIMA	Compañía Industrial Minera Asociada
DEM	Modelo de Elevación Digital
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ILO	International Labor Organization
IDW	Ponderación de distancia inversa
MMSD	Mining Minerals and Sustainable Development
PRODEMINCA	Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental
RecMin	Recursos Mineros
SADCO	South American Development Company
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TIN	Red de Triangulación Irregular
Pdf	Portable Document Format
DXF	Drawing Exchange Format
DWG	Drawing Format
shp	Shapefile

SIMBOLOGÍA

g	Gramo
kg	Kilogramo
T	Tonelada
ha	Hectáreas
P-P	Piñas-Portovelo
P-B-P	Puente de Buza-Palestina (P-B-P)
N	Norte
S	Sur
SE	Sureste
SW	Suroeste
m	Metro
km	Kilómetro
m ³	Metros cúbicos
°	Grados
'	Minutos
"	Segundos
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
g/T	Unidad de ley, gramo sobre tonelada
kg/m ³	Unidad de ley mineral. Kilogramo por metro cúbico

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación zona de Estudio.	4
Figura 2.1 Modelos en Ingeniería Geológica.	6
Figura 2.2 A) Modelo litológico, B) Modelo Estructural, C) Modelo de Alteraciones. ...	8
Figura 2.3 Modelos clásicos, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se tiene: modelo de secciones, modelo por triangulación y modelo de polígonos.	9
Figura 2.4 Modelos Actuales-Geométricos, de izquierda a derecha y de arriba abajo se tiene: modelo de capas, modelo sólido tridimensional (3D) y modelo de bloques. Modificado de (I.T.G.E., 1988).....	10
Figura 2.5 Clasificación conjunta de Recursos y Reservas.	14
Figura 2.6 Subdistrito minero de Portovelo-Zaruma.	16
Figura 2.7 Mapa Geológico Portovelo-Zaruma.	18
Figura 2.8 Geología Local de la Zona de Estudio.	19
Figura 3.1 Flujograma de metodología aplicada.	20
Figura 3.2 Mapa Geológico Portovelo-Zaruma.	22
Figura 3.3 Sección de las zonas explotadas de Agua Dulce.	23
Figura 3.4 Curvas de Nivel Proyecto DYNASTY.....	24
Figura 3.5 Galerías A-H de la zona de estudio.	25
Figura 3.6. Secciones Geológicas de Figura 3.2.	26
Figura 3.7. Principales estructuras mapeadas.....	27
Figura 3.8 Digitalización de las muestras tomadas en la veta Agua Dulce.....	28
Figura 3.9 Digitalización de litología de pórfidos andesíticos.....	29
Figura 3.10 Herramienta Create TIN de ArcMap	30
Figura 3.11 Herramienta TIN to Ráster de ArcMap.....	31
Figura 3.12 Herramienta Interpolate Shape de ArcMap.....	32
Figura 3.13 Interpolación de superficie pumita y pórfido andesítico	32
Figura 3.14 Digitalización del perfil B-B'	33
Figura 3.15 Perfil litológico de Tobas Dacíticas	34
Figura 3.16 Representación tridimensional de Tobas dacíticas.....	34
Figura 3.17 Estructuras mapeadas (verde) interpoladas a través del DEM.....	35

Figura 3.18 Estructura mapeada con rumbo de 240° y buzamiento 38°.....	36
Figura 3.19 Visualización de los puntos de Muestreo en el programa ArcScene.	36
Figura 3.20 Punto de muestreo representado como sondaje en RecMin.	38
Figura 3.21 Polígono asociado a sondajes con una ley media para la veta Cantabria	39
Figura 3.22 Herramienta para el Cálculo de área total de T3.	40
Figura 4.1 Superficie tipo TIN.	42
Figura 4.2 Modelo de Elevación Digital (DEM).	43
Figura 4.3 Modelo litológico Superficial.	44
Figura 4.4 Modelo Litológico Subterráneo.	45
Figura 4.5 Estructuras Mapeadas en el proyecto RETAZOS.....	46
Figura 4.6 Puntos de muestreo Veta Agua Dulce.....	47
Figura 4.7 Puntos de muestreo Veta Soroche.....	47
Figura 4.8 Puntos de Muestreo Veta Cantabria.....	48
Figura 4.9 <i>Geostatistical Wizard de ArcMap</i>	49
Figura 4.10 Modelado utilizando el método de Interpolación de Kriging Ordinario. ...	49
Figura 4.11 Herramienta IDW de ArcMap.....	50
Figura 4.12 Modelado utilizando el método de Interpolación de IDW.	50
Figura 4.13 Herramienta Histogram de ArcMap.....	52
Figura 4.14 Transformada de Box-Cox.....	52
Figura 4.15 Mapa de Voronoi.....	53
Figura 4.16 Número total de polígonos.....	54
Figura 4.17 Modelo de Leyes para veta Cantabria.	55
Figura 4.18 Vista Panorámica del modelo geológico final.	56
Figura 4.19 Modelo litológico y de Leyes.....	57
Figura 4.20 Modelo estructural y de Leyes.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Definición de ocurrencia, depósito y yacimiento mineral.....	11
Tabla 2.2. Herramientas utilizadas del software RecMin.	15
Tabla 4.1 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Collar.	37
Tabla 4.2 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Desviación.	37
Tabla 4.3 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Litología.	37
Tabla 4.4 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Muestreo.	38
Tabla 4.5. Distribución de las Leyes para las 3 vetas.	38
Tabla 4.6 Valores de Espesores para el cálculo de Recursos.	40
Tabla 5.1 Número de polígonos para cada zona.	54
Tabla 5.2 Catálogo de los Recursos de la veta Cantabria.	59

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen muchos países, en especial los que se encuentran en desarrollo, que dependen en gran medida de las actividades mineras tanto artesanales, como de pequeña minería (ASM) para poder reducir el índice de pobreza sobre todo en el sector rural (Sophia, 2003). Según datos de la Mining Minerals and Sustainable Development (MMSD) y la International Labor Organization (ILO) existen aproximadamente 13 millones de personas en el mundo que se desempeñan directamente en actividades mineras artesanales y pequeña escala, por lo que es imprescindible que se desarrollen continuamente esfuerzos para obtener los máximos beneficios de este sector, disminuir costos y contribuir a un desarrollo sostenible de los países. (Hentschel et al., 2002).

En el Ecuador, la pequeña minería tiene su origen de manera formal hacia finales de los años 70 con la extinción de las compañías South American Development Company (SADCO) y la Compañía Industrial Minera Asociada (CIMA), esta última contaba con capital tanto estatal como privado dedicada a la explotación de oro en el sur del País, específicamente en el sector de Portovelo y Zaruma (Ministerio de Minería del Ecuador, 2016). Con el cierre de las compañías la explotación continuó a manos de los pequeños mineros y mineros artesanales que obtenían los minerales de las antiguas labores dejadas por empresas extranjeras; simultáneamente con el redescubrimiento de los yacimientos en Nambija y Ponce Enríquez se consolida este sector con el uso de técnicas de exploración empíricas como el platoneo manual que no tomaba en consideración las características de la mineralización que formaban los yacimientos (Sandoval, 2001).

El distrito minero de Portovelo-Zaruma es, desde el punto de vista histórico, el más importante y antiguo en el Ecuador con una producción estimada mayor de 120 toneladas de oro y 250 toneladas de plata; siendo los años entre 1904 hasta 1950 los de mayor producción por parte de la compañía SADCO (PRODEMINCA, 2000). La explotación de metales en el sector data desde la época precolombina a cargo de los incas y continuo posteriormente con las colonias españolas y la creación de la ciudad de Zaruma en 1549, donde se extraía únicamente material aurífero de forma hidráulica de las secciones oxidadas de las vetas (Billingsley, 1926) (Spencer et al., 2002).

En el año 2015 se fundó la empresa Minera Inca Minein S.A. que actualmente realiza trabajos de explotación y exploración en el cantón Portovelo, más concretamente en la mina Agua Dulce perteneciente a la concesión minera Bomba de Pacchapamba Unificada con código catastral 526 y una superficie de 23.34 ha.

1.1 Descripción del problema

En las concesiones mineras de Zaruma y Portovelo, debido a que cuenta con una larga historia de más de 500 años de antigüedad en la industria minera, las exploraciones y explotaciones se han realizado de una manera informal y antitécnica (empírica) lo que ha provocado el deficiente aprovechamiento de los recursos naturales y a su vez ha generado grandes pérdidas económicas para el sector (Albuja, 2017).

Actualmente, en la mina Agua Dulce se exploran y explotan un total de 9 vetas. Entre estas, las vetas: Agua Dulce, Cantabria y Soroche han sido explotadas durante décadas (Oscullo, 2019), sin que existan estudios detallados previos relacionados con la estimación de recursos y reservas de los minerales; esto ha provocado inconvenientes debido al poco conocimiento geológico de la zona y de las labores mineras, resultando en los siguientes problemas:

- Sobreestimación de las dimensiones y leyes de las vetas.
- Pérdidas económicas por metro de avance en direcciones erróneas.
- Agotamiento de las reservas y/o recursos en un tiempo relativamente corto.
- Diseño de la infraestructura interna de la mina con alto riesgo de colapso.

Una de las fases más críticas en la ejecución de cualquier proyecto minero es el cálculo e identificación de los recursos y reservas debido a que las inversiones, la continuación de la mina y la planificación de explotación se basan en las estimaciones del tonelaje y ley asociados a los recursos y reservas existentes en el área. (ORTIZ & EMERY, 2004).

1.2 Justificación del problema

En los cantones de Zaruma y Portovelo, cerca del 70% de sus habitantes se dedican a la actividad minera abarcando su comercialización, transporte, insumos y producción en las diferentes concesiones existentes (Sandoval, 2001).

La realización de este proyecto surge de la necesidad de aumentar el conocimiento y entendimiento de la geología asociado a la zona de estudio con el fin de obtener las dimensiones y leyes donde, desde un punto de vista económico-técnico, aún es rentable su explotación (recursos probables).

Al concluir el proyecto se podrá crear planes de exploración que muestren de manera clara zonas de alto interés, donde los responsables de desarrollar la explotación y extracción del mineral puedan trazar planes que sean económicamente rentables y generen una vida útil de la mina con la optimización de costos y maximizando las ganancias para la empresa.

1.3 Zona de Estudio

Se localiza en la latitud 3°41'00" S y longitud 79°36'00" O en los cantones de Portovelo y Zaruma pertenecientes a la provincia de El Oro al suroeste de Ecuador; con una superficie total de 1050 ha. Según el Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2010 se tiene una densidad poblacional de 12200 (Portovelo) y 24097 (Zaruma) con una altitud entre los 650 a 1050 m.s.n.m. (Desarrollo & Territorial, 2019)(SNGR, 2012). Los datos obtenidos de muestreo provienen de trabajos realizados en el interior de la mina Agua Dulce, donde la mayoría de las labores se ubican en la concesión minera Bomba de Pacchapamba Unificada (véase Figura 1.1).

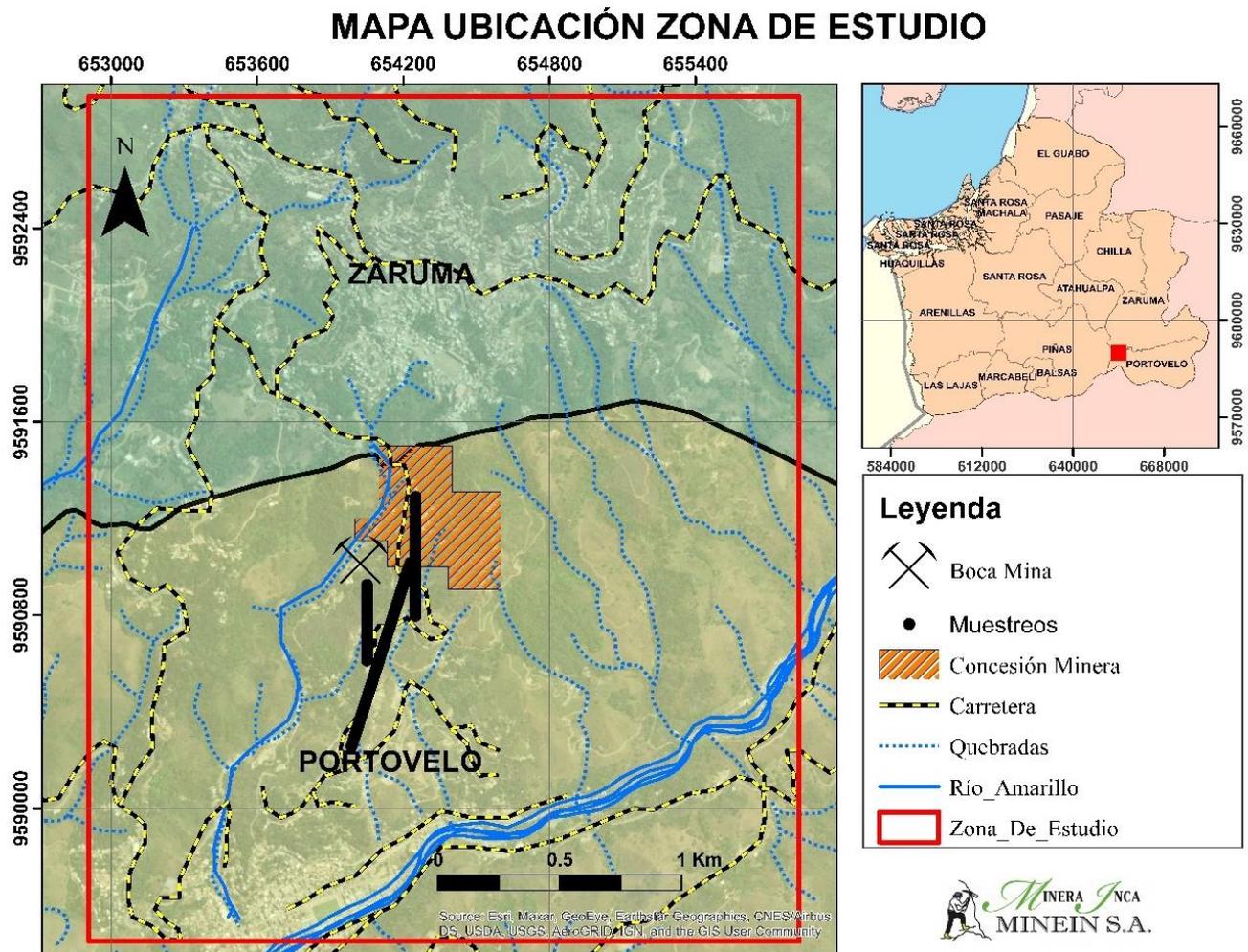


Figura 1.1 Ubicación zona de Estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un modelado geológico de los recursos de la mina Agua Dulce mediante la recopilación de datos históricos y aplicaciones de los softwares RecMin, ArcGis y AutoCAD para el mejor aprovechamiento de los recursos mineros.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Revisar la información geológica histórica de la zona de estudio y la actividad productiva mediante informes técnicos de las empresas SADCO, CIMA y IAMGOLD para el reconocimiento inicial de las características geológicas de la zona de estudio.

- b) Ingresar los datos de litología, muestreo y estructuras mediante la digitalización y recopilación en hojas de Cálculo de Excel para la obtención de una base de datos confiable.
- c) Obtener modelos individuales de litología, estructuras y leyes mediante el uso del software minero RecMin para el reconocimiento de las características geológicas de la zona de estudio.
- d) Identificar las zonas con mayor recurso mineral realizando un análisis geológico-técnico para la creación de planes de exploración y explotación.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

En el presente proyecto se utilizó una serie de conceptos tanto de carácter técnico como económicos que se detallarán a continuación para una mejor comprensión y facilidad de lectura.

2.1 Modelos en Ingeniería Geológica

En ingeniería geológica existen 3 tipos de modelos básicos: geológico, geomecánico y geotécnico de comportamiento (González de Vallejo et al., 2002), pero, el alcance del presente estudio se enfocó en el modelamiento geológico (véase Figura 2.1) ya que, únicamente se obtuvieron datos litológicos, estructurales y de leyes. Es por esto, que no fue posible considerar los otros modelos, puesto que no se consiguió datos del tipo de macizo rocoso y, además, por la limitación para realizar de ensayos de laboratorio.

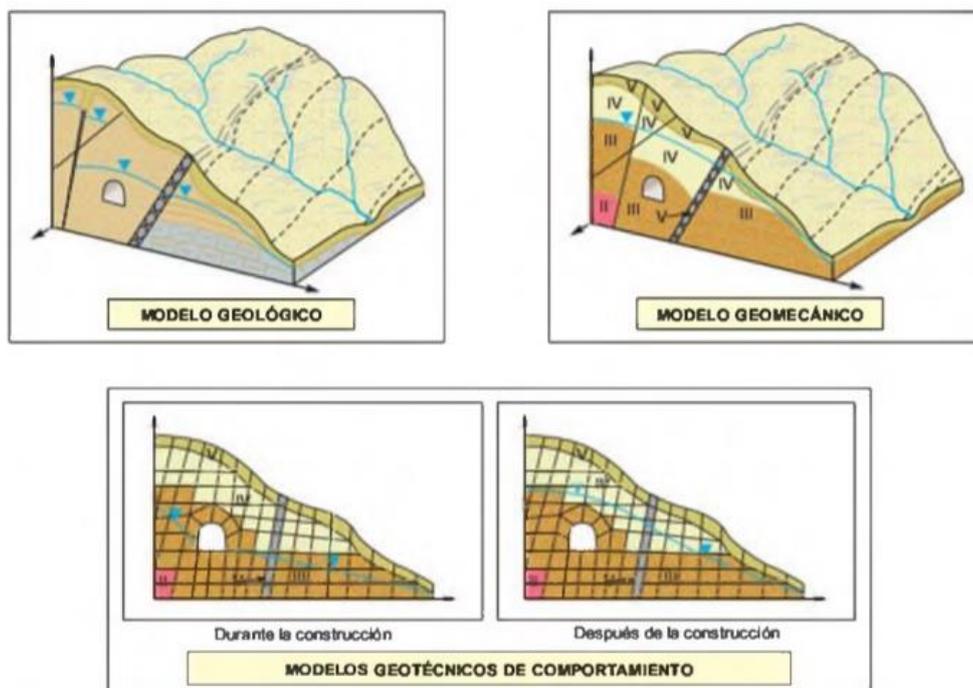


Figura 2.1 Modelos en Ingeniería Geológica.

Fuente (González de Vallejo et al., 2002)

2.2 Modelo Geológico

El modelado geológico es un desarrollo tecnológico empleado en estudios geológicos, exploración y estimación cuantitativa de recursos minerales (Wang & Huang, 2012). Es considerado una representación tridimensional de objetos geológicos de una forma sofisticada que pueden mostrar cuerpos de roca, anomalías geofísicas y geoquímicas, estratos y sobre todo cuerpos mineralizados (Kaufmann & Martin, 2008). El modelado posibilita visualizar una gran variedad de objetos geológicos irregulares y complejos en base a una información estructural, mapeo geológico, estudios geológicos previos y datos tanto de sondajes como de anomalías geofísicas y geoquímicas (Wang & Huang, 2012) (Mallet, 2002).

Es importante tener en cuenta que el paso inicial para la posterior generación de un modelo geológico consiste en la recopilación, clasificación y luego una selección de los datos utilizables. Este proceso es tedioso pero indispensable en la construcción de un modelo coherente. Seguidamente, los datos seleccionados deben procesarse para construir una base de datos sólida y deben ser referenciados en un sistema de coordenadas común para su homogenización (Kaufmann & Martin, 2008).

El modelamiento geológico orientado a diversos yacimientos minerales es muy común en países con una cultura desarrollada de minería, convirtiéndose en una herramienta esencial para el planeamiento de inversiones y la construcción de planes de desarrollo de un proyecto minero. Estos modelos son el fundamento para los reportes de recursos y reservas exigidos por bolsas de inversionistas a empresas de minería (Moraes et al., 2009).

2.2.1 Clasificación de Modelos Geológicos

Según las características geológicas de la zona de estudio que se desea representar, se puede tener diversos tipos de modelos siendo los principales y más comunes los modelos litológicos, estructurales y leyes (Machuca, 2004); estos a su vez se pueden complementar con modelos de mineralización y alteraciones para dar una mejor caracterización del depósito (véase Figura 2.2).

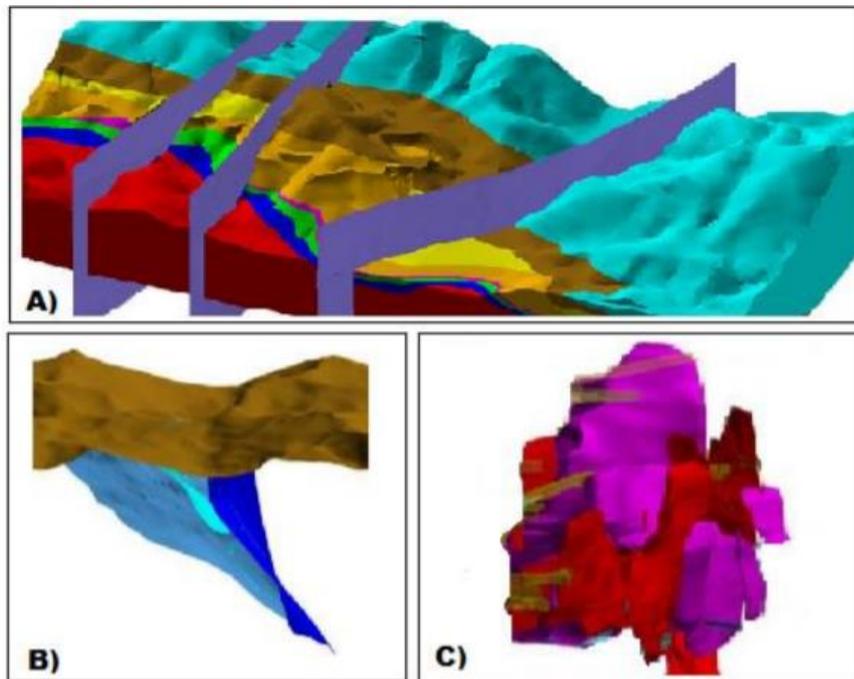


Figura 2.2 A) Modelo litológico, B) Modelo Estructural, C) Modelo de Alteraciones.

Fuente (Machuca, 2004)

La clasificación de los diferentes modelados se basa en 2 conceptos; el primero denominado “modelo geométrico del yacimiento” representa la manera de como discretizar o aproximarse a la geometría del yacimiento a través de figuras geométricas sencillas (pueden ser prismas, polígonos, etc.). El segundo concepto denominado “función de extensión” hace referencia a los valores estimados que, en base a criterios o funciones matemáticas, son realizados en puntos ubicados en el entorno de una muestra o conjunto de muestras con valores conocidos (I.T.G.E., 1988). Utilizando en conjunto estos 2 conceptos, se puede clasificar a los modelos geológicos en: Modelos Clásicos y modelos Actuales.

- **Modelados Clásicos:** en este primer tipo de modelado la denominada “función de extensión” precisa la modelización geométrica (I.T.G.E., 1988). Entre los principales modelados clásicos tenemos: modelo de secciones, modelo por triangulación y modelo de polígonos (véase Figura 2.3).

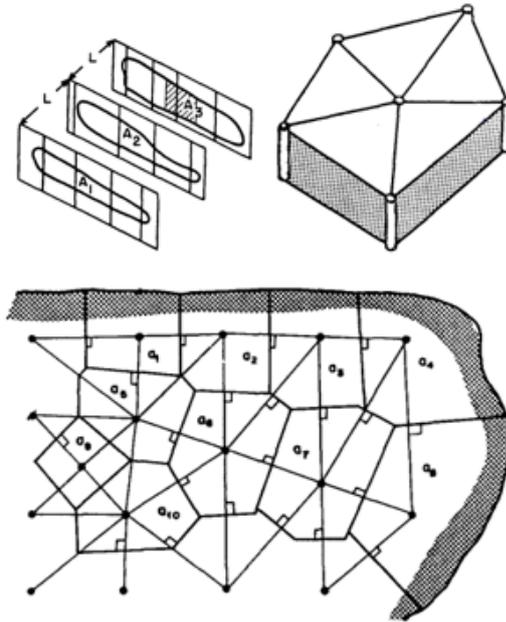
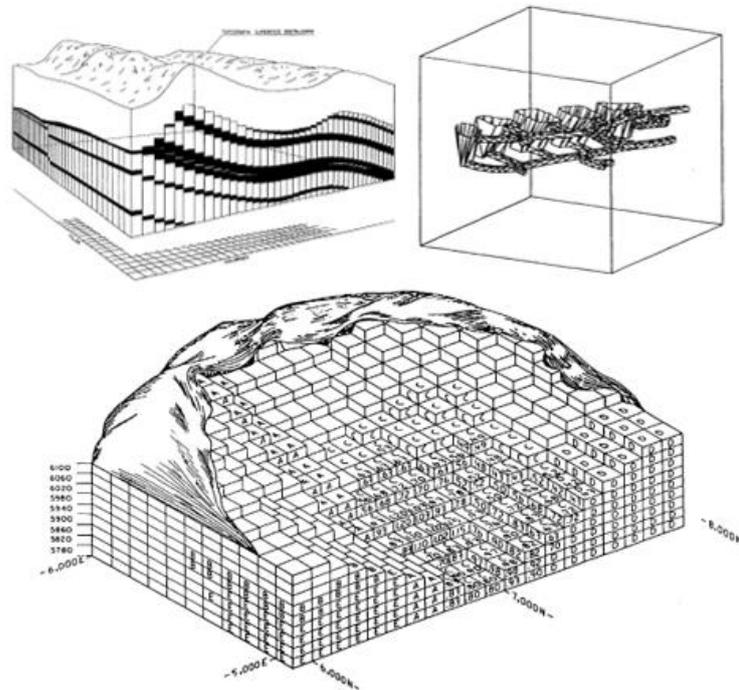


Figura 2.3 Modelos clásicos, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se tiene: modelo de secciones, modelo por triangulación y modelo de polígonos.

Modificado de (I.T.G.E., 1988)

- **Modelados Actuales:** en este caso el “modelo geométrico del yacimiento” no está vinculado con la “función de extensión” (I.T.G.E., 1988). Entre los principales modelos actuales nos vamos a enfocar en los modelos geométricos donde tenemos: modelo de bloques, modelo de capas y modelo sólido tridimensional (3D) (véase Figura 2.4).



**Figura 2.4 Modelos Actuales-Geométricos, de izquierda a derecha y de arriba abajo se tiene: modelo de capas, modelo sólido tridimensional (3D) y modelo de bloques.
Modificado de (I.T.G.E., 1988)**

2.3 Definiciones Importantes en Minería

A continuación, en la Tabla 2.1 se resumen algunos conceptos relevantes para la aplicación del presente proyecto.

Tabla 2.1. Definición de ocurrencia, depósito y yacimiento mineral.

Fuente: Adaptado de (U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 1986).

Ocurrencia Mineral	Es una acumulación de un mineral, independiente del lugar que se forma, considerada valiosa por alguien y que puede generar un intereses tanto técnico como científico.
Depósito Mineral	Ocurrencia mineral que, con las condiciones necesarias de tamaño y grado, puede ser considerado potencialmente económico.
Yacimiento Mineral	Depósito mineral donde se ha podido comprobar que posee el suficiente grado, accesibilidad y tamaño para ser considerado explotable con un margen de ganancias económicas.

2.3.1 Ley Mineral

En geología económica y minería ley de un mineral se refiere a una medida cuantitativa expresada como kg/m³, g/t o porcentaje en peso en la cual, dependiendo del tipo de recurso natural, representa al mineral y/o metal por unidad de peso o volumen (Bustillo & López, 1997).

2.3.2 Ley Mínima de Corte (cut-off)

Se lo define como la ley más baja que, en un proyecto minero en fase de explotación, puede llegar a tener un cuerpo mineralizado actual o posiblemente explotable con el fin de que su extracción sea considerado económicamente rentable en base a una ley media global (Asad, 2007).

2.4 Recurso

Un recurso es una acumulación en o sobre la corteza de la tierra de un material que puede ser un líquido, sólido o gas y que cuenta con la suficiente cantidad de tal forma que la producción económica de una fracción de la acumulación sea, con los medios actuales, potencialmente factible (U.S. Bureau of Mines & U.S. Geological Survey, 1980).

2.4.1 Clasificación de Recursos

Para obtener una clasificación de recursos es necesario tener en cuenta dos aspectos claves y poder diferenciarlos entre sí que son: el nivel de conocimiento geológico y el nivel de factibilidad económico que se necesita para obtener la materia prima (McKelvey, 1972, 1986). En base a estos aspectos se tiene dos tipos de recursos principales:

2.4.1.1 Recursos Identificados

En esta clasificación se basa en la factibilidad económica (véase Figura 2.5) e incluyen:

- Primero a los depósitos minerales ya identificados y comprobados que son económica y técnicamente viable su explotación (reserva) (McKelvey, 1972, 1986).
- Segundo a los depósitos que podrían a futuro ser aprovechados para su extracción pero sin una comprobación técnica y sobre todo económica del mismo (paramarginal); también se puede incluir a los depósitos cuya existencia es inferida pero pueden llegar a ser descubiertos (submarginal) (McKelvey, 1972, 1986).

2.4.1.2 Recursos sin Descubrir

En esta clasificación se basa en el nivel de conocimiento geológico (véase Figura 2.5) e incluyen:

- Primero los denominado recursos hipotéticos que son aquellos recursos no identificados pero, según conocimientos geológicos existentes, se puede asumir su existencia (McKelvey, 1972, 1986).
- Segundo los recursos especulativos que son aquellos recursos que se tiene un mínimo de conocimiento geológico y no cumplen las expectativas para considerar su existencia. (McKelvey, 1972, 1986).

2.5 Reserva

Se lo define como la fracción del recurso mineral medido o inferido donde se ha comprobado que es factible su extracción tanto desde un punto de viste técnico como económico (Bustillo & López, 1997).

2.5.1 Clasificación de Reservas

Para esta clasificación se toma en consideración principalmente el nivel de conocimiento geológico donde se quiere extraer la materia prima (McKelvey, 1972, 1986). En base a esto se tiene dos clasificaciones:

2.5.1.1 Reservas Demostradas

Para esta clasificación se basa en el conocimiento de la zona y un margen de error asociado al mismo (véase Figura 2.5) e incluyen:

- Primero las reservas medidas o también llamadas probadas en las cuales las zonas del yacimiento identificadas son completamente conocidas con un margen de error asociado a 10% (McKelvey, 1972, 1986).
- Segundo las reservas indicadas en la cual las zonas del yacimiento identificadas no son completamente conocidas y tienen un margen de error asociado entre un 20-30% (McKelvey, 1972, 1986).

2.5.1.2 Reservas Inferidas

Las reservas inferidas o también llamadas posibles son aquellas que su existencia es subjetiva, es decir, conocida únicamente por trabajos o conocimientos geológicos previos como: sondajes, labores mineras o los denominados supuestos geológicos, pero no se ha logrado identificar su presencia (véase Figura 2.5) (McKelvey, 1972, 1986).

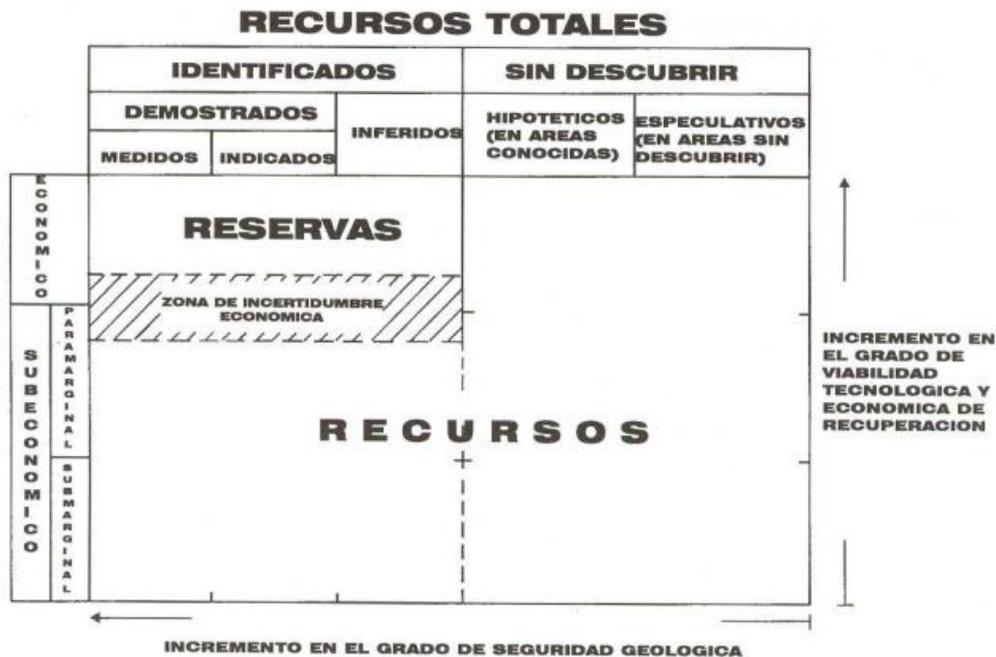


Figura 2.5 Clasificación conjunta de Recursos y Reservas.

Fuente: (McKelvey, 1972, 1986), Modificado por (Bustillo & López, 1997).

2.6 Geoestadística

En minería, la geoestadística es la aplicación de diversas técnicas para solucionar los problemas relacionados a variables regionalizadas, las mismas que son una función que muestra como varía en el espacio cierta magnitud relacionada con algún fenómeno natural y de esta forma ayudaría a la estimación de recursos mineros (Alfaro, 2007).

2.7 Programas Utilizados

Para la realización del presente estudio fue necesaria la aplicación de varios programas que permitieron la digitalización de información, elaboración de perfiles y generación de modelos tanto bidimensional como tridimensionalmente. A continuación, se describen cada uno de los programas empleados.

2.7.1 RecMin

Es un software de licencia libre aplicado para la estimación y gestión de los recursos mineros creado por el Dr. César Castañón Fernández. Dicho software posee un paquete de 5 módulos: yacimientos, edición, dibujo, renderizado 3D y seguridad; cada uno con una interfaz y uso diferente. (Ruiz Yhonny, 2011). En el proyecto se ha utilizado varias

herramientas de este software, tales como: líneas, superficies y mallados T3 que se describen a continuación.

Tabla 2.2. Herramientas utilizadas del software RecMin.

Fuente: Adaptado del manual de usuarios del software.

Líneas	son un conjunto de segmentos, por lo general unidos entre sí y que permiten separar zonas, rellenar con colores, recortar otros objetos, entre otras funciones. Las líneas se pueden guardar como ficheros texto, formato (*.LIN).
Superficies	poseen un formato similar al de las líneas, pero se las utiliza cuando se trabaja con isolíneas de superficie, normalmente son ficheros grandes y con ellos se puede construir secciones y dibujar la línea de superficie, también para renderizar y demás. Estas superficies se guardan en ficheros tipo texto, de formato (*.SUP), y en un mismo fichero se puede tener varias superficies.
Mallados T3	son conjuntos de caras en forma triangular que presentan un color asociado y que permiten, definiendo la dirección del sol, obtener una vista tridimensional del sector de trabajo. Los T3 en el módulo de renderizado ayudan a mejorar la vista, además sirven para definir volúmenes, galerías y huecos de interior. Estos mallados se extraen en ficheros texto, de formato (*.T3).

2.7.2 ArcGIS

ESPOL cuenta con una licencia académica departamental de este software que permite utilizar herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de esta forma realizar la digitalización de datos espaciales, georreferenciarlos y a su vez generar mapas temáticos de interés.

2.7.3 AutoCAD

Es un software CAD (Computer Aided Design) empleado para el dibujo en dos dimensiones y el modelado tridimensional. Además, es reconocido internacionalmente por sus múltiples capacidades de edición. ESPOL es una de las instituciones beneficiarias de licencias estudiantiles gratuitas.

CAPÍTULO 3

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1 Geología Regional

El subdistrito minero Portovelo-Zaruma forma parte del distrito minero del Azuay junto con los campos mineralizados de Ponce Enríquez, Catamayo y Molleturo (véase Figura 3.1); el sector limita al norte con el subdistrito Pucara-Alausí y al este por el subdistrito de Loja (Bonilla, 2009). Según el Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental (PRODEMINCA) realizado el año 2000 con el fin de evaluar los distritos mineros del país catalogo esta zona como un sistema de vetas epi-mesotermiales de baja sulfuración alojadas en rocas intrusivas con una extensión de (4x 15 km) y de manera vertical con una extensión de 1400 m (PRODEMINCA, 2000).

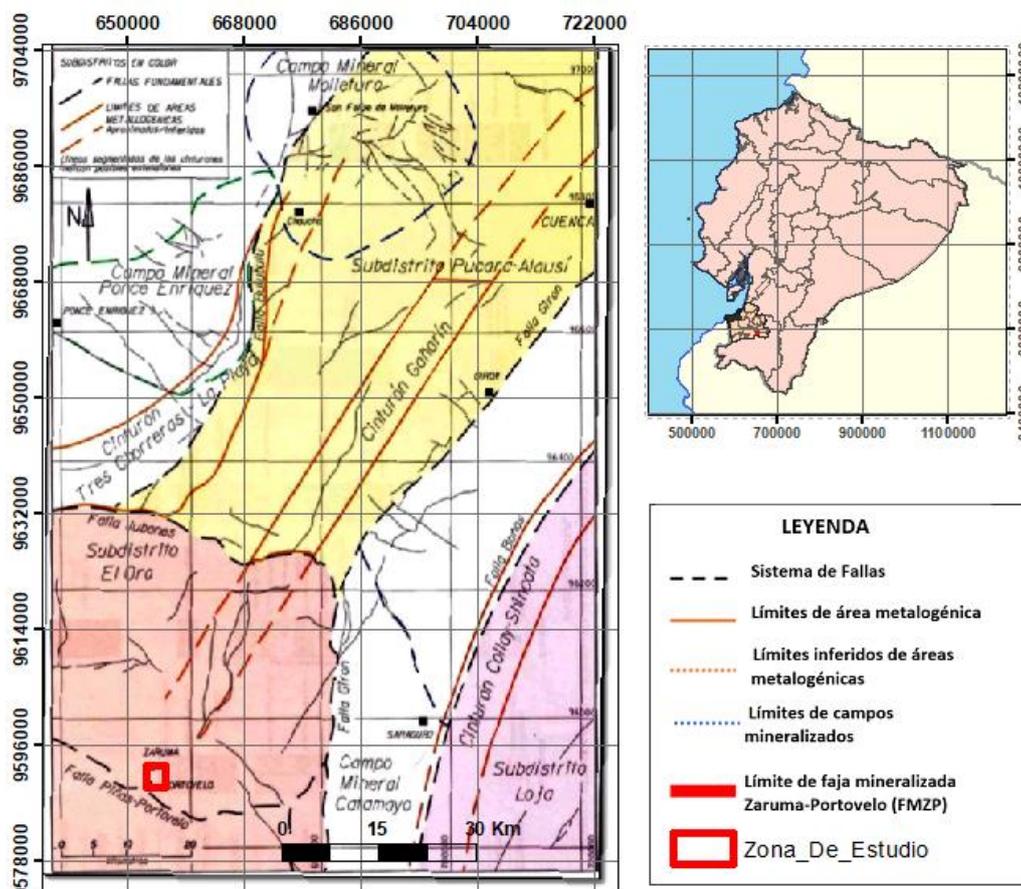


Figura 3.1 Subdistrito minero de Portovelo-Zaruma.

Modificado de (PRODEMINCA, 2000)

La mineralización del subdistrito está controlada por el sistema de fallas Portovelolo-Piñas (P-P); el cual es una falla tipo cabalgamiento con dirección E-SE y a su vez forma el límite sur del enriquecimiento polimetálico (Van Thournout et al., 1996). Según la tesis doctoral de Bonilla se reconocen 3 principales unidades litológicas en esta zona:

- **Rocas Metamórficas (Paleozoico):** Afloran hacia el S-O del subdistrito minero hasta el sur de la falla Portovelolo-Piñas, forman el denominado complejo metamórfico de El Oro integrado por granodioritas foliadas, serpentinitas fragmentadas, eclogitas, metapelitas, pizarras, lutitas, limolitas y conglomerados (Billingsley, 1926).
- **Volcánicos de Saraguro (Oligoceno):** Afloran hacia el centro y oriente del distrito, con un espesor menor a 1000 m, constituido por material volcánico re TRABAJADO, tobas de composición dacítica a brechas y andesitas (Spencer et al., 2002).
- **Unidad Portovelolo (Oligoceno):** Aflora en los poblados de Arcapamba, Huertas y Zaruma; constituido por lavas andesíticas y basalto-andesíticas (Bonilla, 2009).

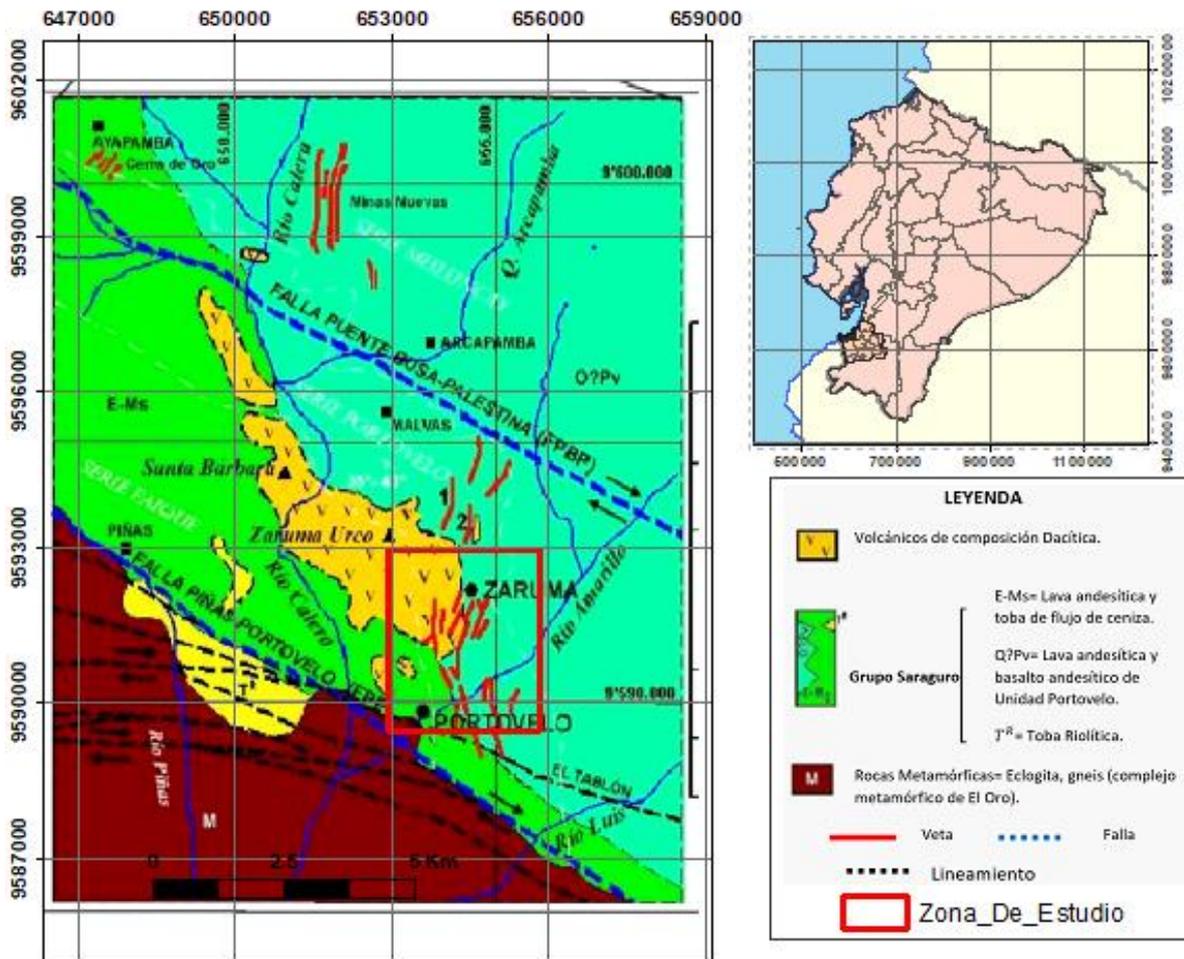


Figura 3.2 Mapa Geológico Portovelo-Zaruma.

Modificado de (Bonilla, 2009)

3.2 Geología Local

La zona de estudio está ubicada principalmente en la denominada unidad Portovelo; detallada en el proyecto RETAZOS de la compañía IAMGOLD ECUADOR S.A. como depósitos volcano-sedimentarios y diorita en mayor proporción; así mismo afloran tobas de lapilli y flujos de escombros andesíticos con pequeñas intrusiones dacíticas o cuarzo-dioríticas (IAMOGOLD, 2003). La mineralización de las vetas polimetálicas está asociado al cuarzo de color gris a claro con clorita, calcita, adularia y una gran amplia de sulfuros como galena, enargita, pirita y calcopirita típicas de vetas auríferas (PRODEMINCA, 2000).

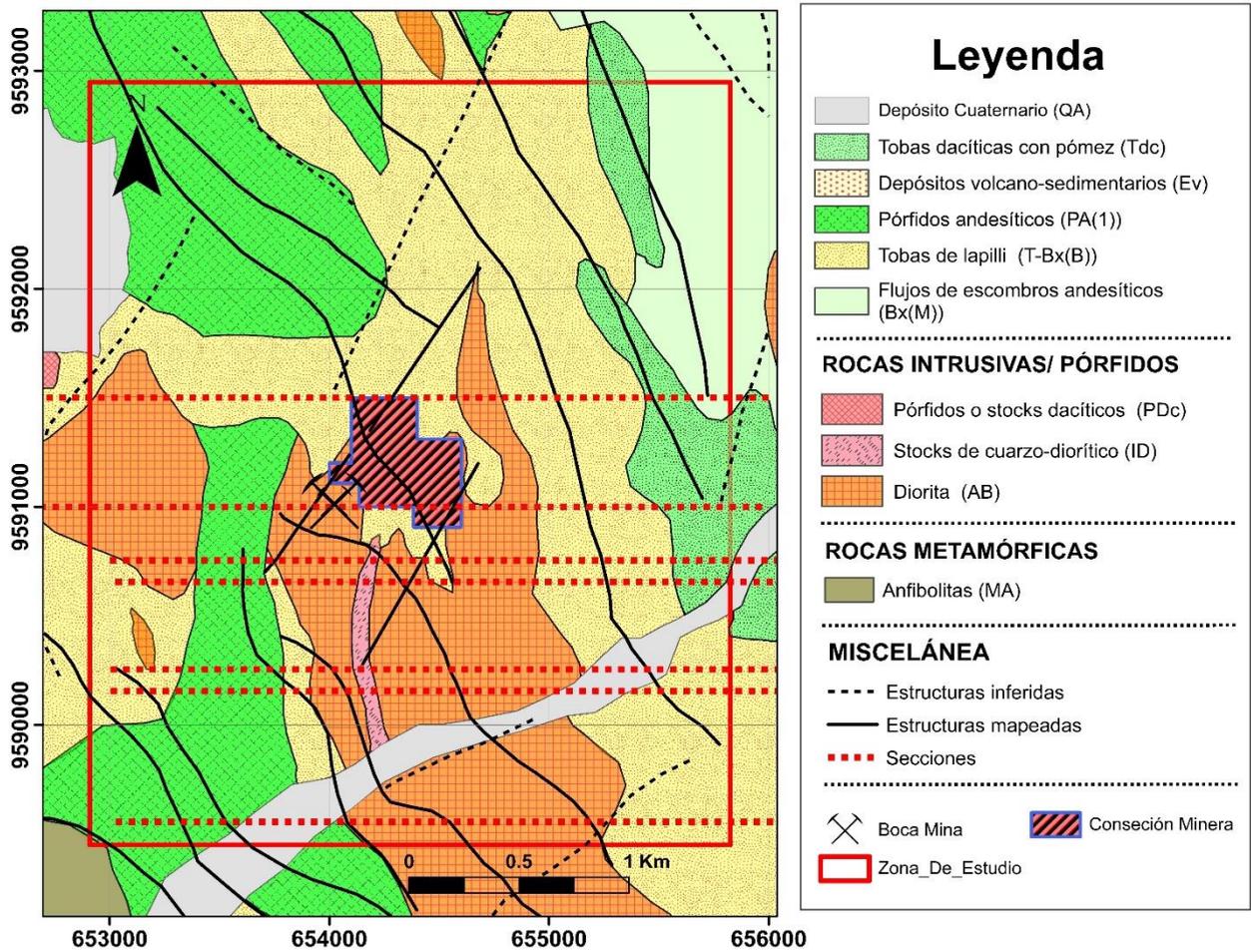


Figura 3.3 Geología Local de la Zona de Estudio.

Modificado de (IAMOGOLD, 2003)

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGÍA

Para el presente proyecto, debido a que para este tipo de trabajos es difícil que coincidan los datos recopilados con los datos necesarios en dichas metodologías se optó por una metodología generalizada, la cual se dividió en tres fases principales, la fase I abarca la recolección de información y creación de base de datos, la fase II la construcción de modelos individuales y finalmente una tercera fase de la construcción del modelo geológico final. (véase Figura 4.1)

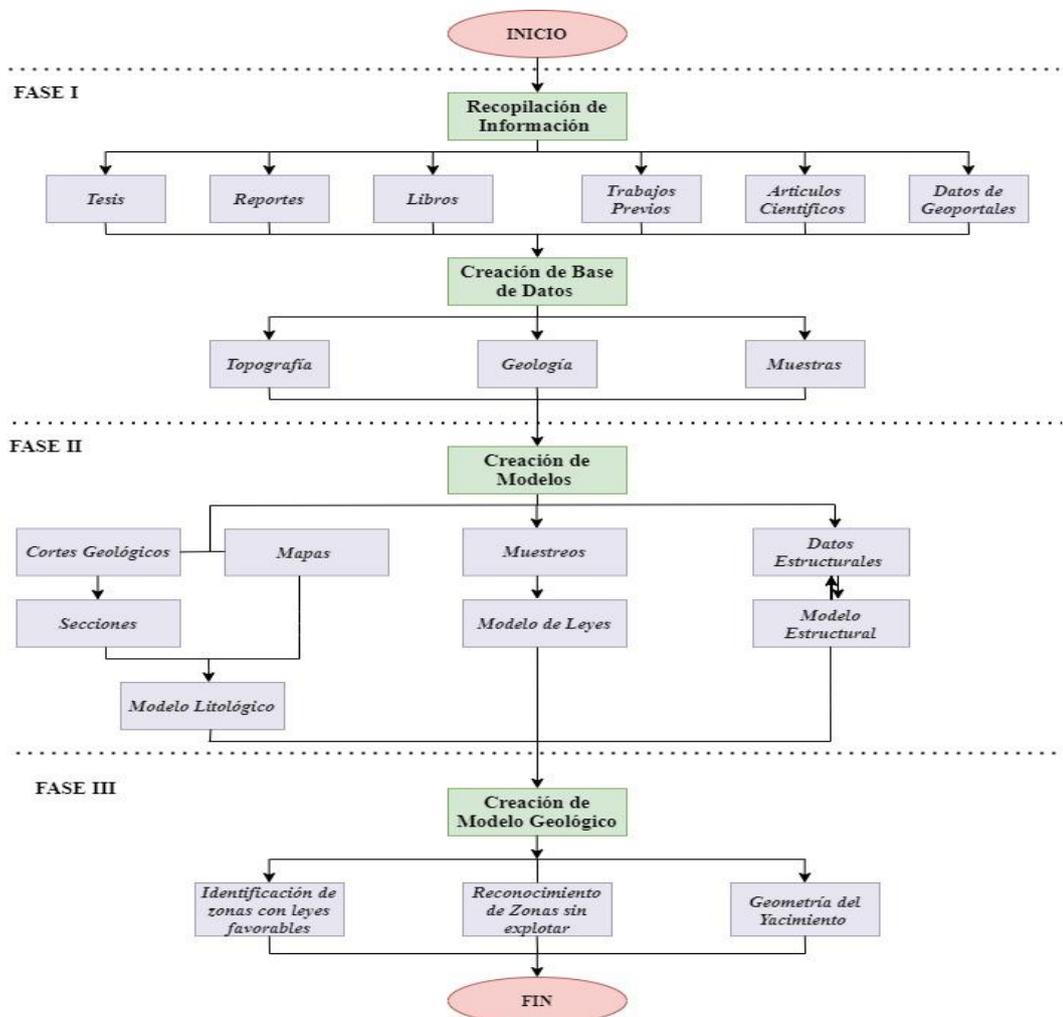


Figura 4.1 Flujograma de metodología aplicada.

Fuente: Elaboración propia

4.1 Fase I: Recopilación de Información

Esta primera fase consiste en la búsqueda y recopilación de información relacionada a la zona y temática de estudio, pero debido a la limitante de no tomar datos en campo, la información se la dividió en dos secciones: información digital e información física.

En cuanto a la información digital, comprende archivos relacionados a la temática del proyecto, tomados de geoportales, repositorios de tesis, libros, archivos comprimidos, entre otros. Los principales formatos utilizados son pdf, DXF, DWG y shp.

Ahora bien, respecto a la información física, la conforma el proyecto RETAZOS de la empresa IAMGOLD ECUADOR S.A. que evaluó de forma detallada las características geológicas de las Zonas de Portovelo y Zaruma en el año 2003 (véase Figura 4.2). El segundo tipo de archivo físico son planos que representan las diferentes secciones trabajadas por la empresa SADCO en los últimos 50 años sobre las vetas Agua Dulce (véase Figura 4.3), Soroche y Cantabria.

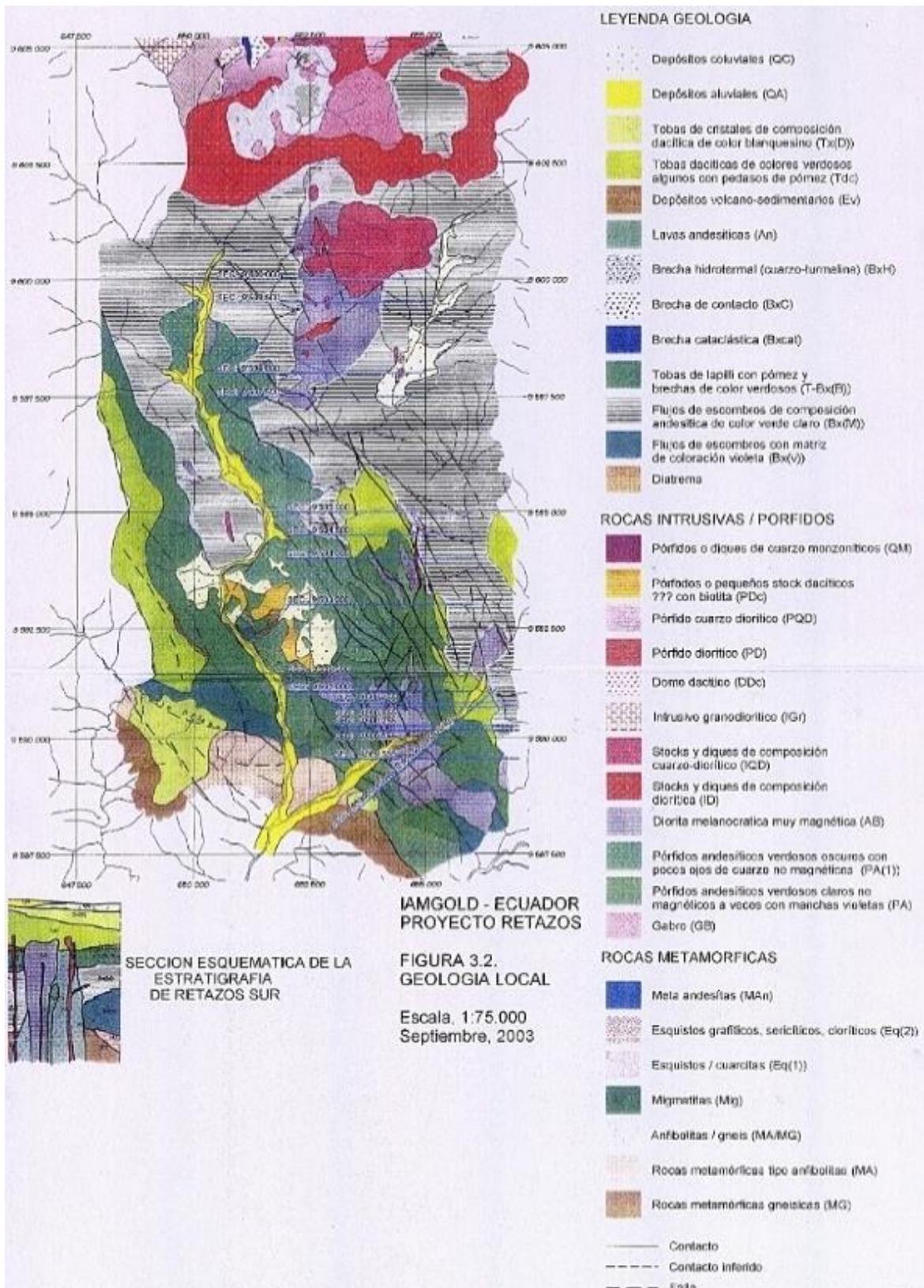


Figura 4.2 Mapa Geológico Portovelo-Zaruma.

Fuente (IAMOGOLD, 2003)

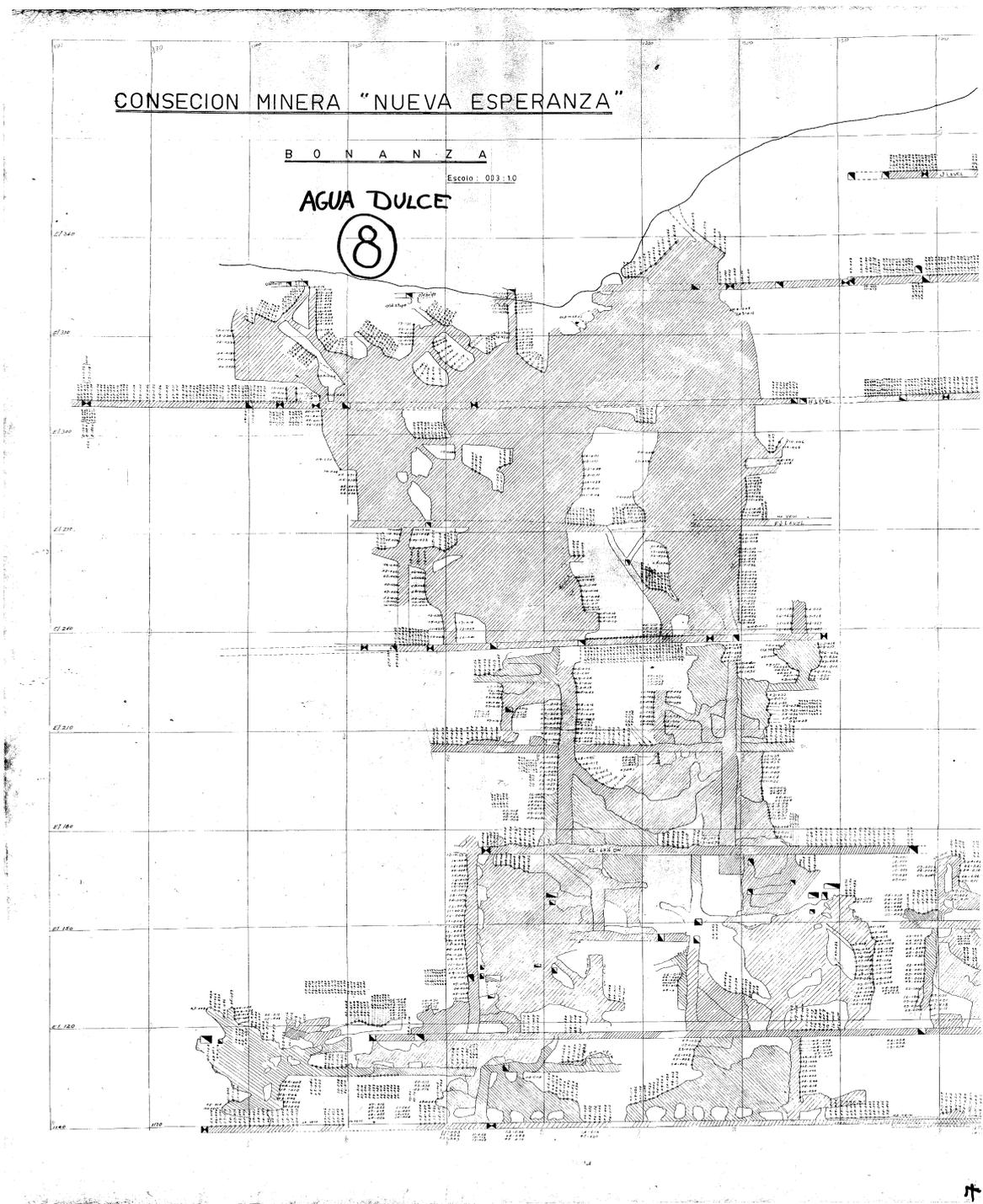


Figura 4.3 Sección de las zonas explotadas de Agua Dulce.

Fuente (Oscullo, 2019)

4.1.1 Creación de Base de Datos

Para esta segunda parte luego de obtener todos los datos de diferentes fuentes se procedió a organizar y clasificar la información en tres secciones principales:

Topografía: uno de los elementos más importantes e indispensables en cualquier trabajo geológico es la topografía, que consiste en la obtención de las curvas de nivel a partir de un archivo denominado Zaruma Total con formato DWG (AutoCAD) del proyecto DYNASTY; en el cual puede ser transformado fácilmente para ser usado en otros softwares como por ejemplo ArcMap. La separación entre curvas de nivel es de 10 metros, con un valor de cotas entre un rango de 590 a 2190 m; la zona de estudio (rojo) se encuentra hacia el suroeste (véase Figura 4.4).

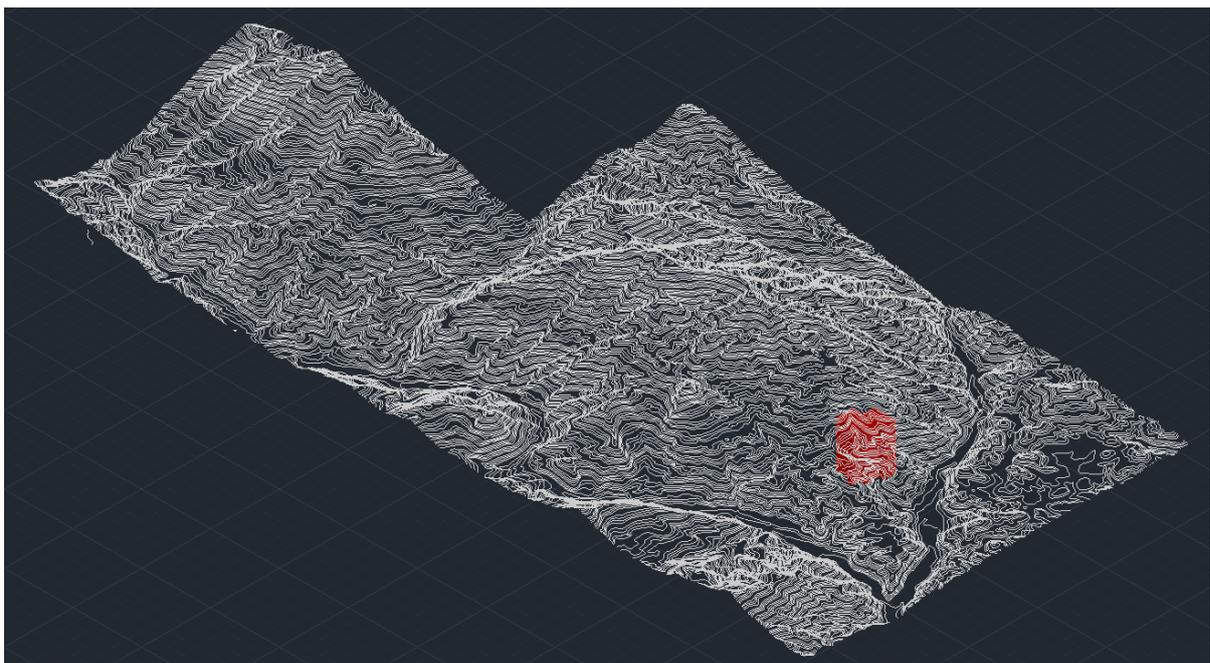


Figura 4.4 Curvas de Nivel Proyecto DYNASTY.

Fuente: ELIPE S.A.

Galerías: en las concesiones mineras de Portovelo y Zaruma; debido a la continuidad de los trabajos dejados por las grandes empresas, se ven en la necesidad de explotar las galerías diseñadas previamente; dichas galerías se dividen en números (1 al 15) y de letras (A- Z) y constan de un ancho promedio de 1.5 m con una extensión vertical de 1.80 m (véase Figura 4.5)

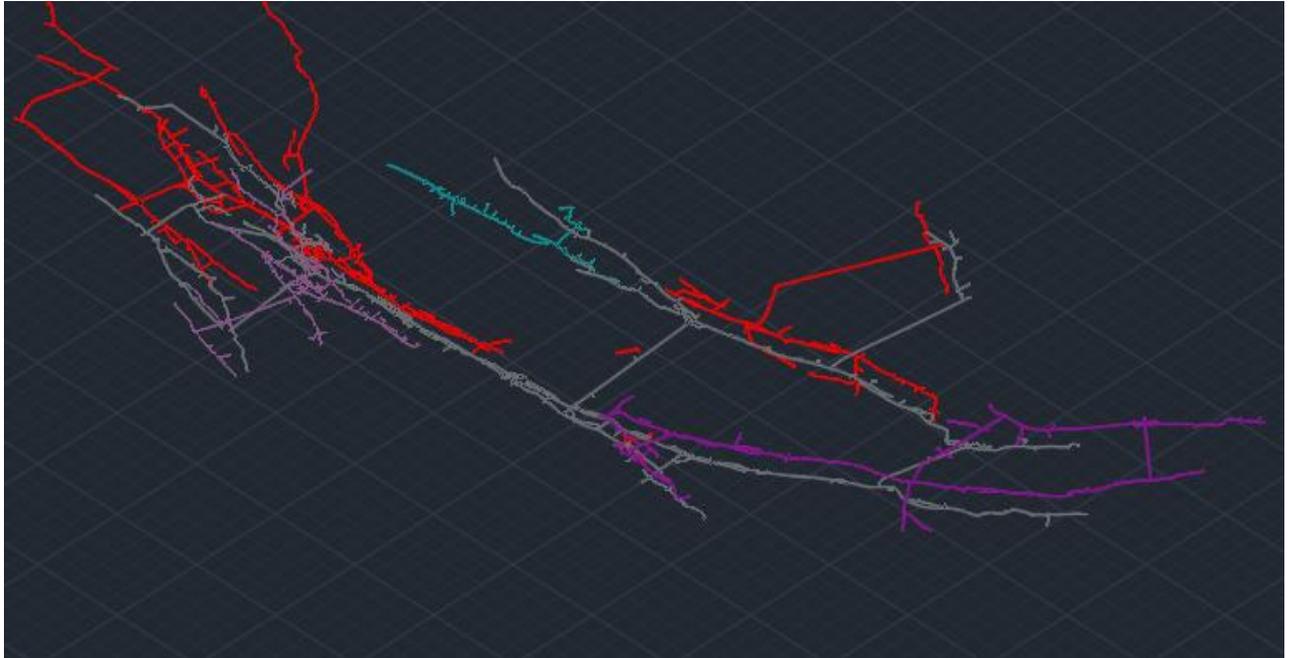


Figura 4.5 Galerías A-H de la zona de estudio.

Fuente: ELIPE S.A.

Geología: este apartado comprende dos análisis: 1) Reconocer los diferentes tipos de rocas (litología) tanto en la superficie como en el subsuelo es indispensable para el reconocimiento de las rocas caja (estéril) y las rocas asociadas a las zonas de mineralización. Para las litologías presentes en el subsuelo se tomó en cuenta las secciones geológicas (véase Figura 4.6). 2) Reconocer las principales estructuras geológicas (fallas, pliegues) a escala local; esto se lo tomo del proyecto RETAZOS (véase Figura 4.7)

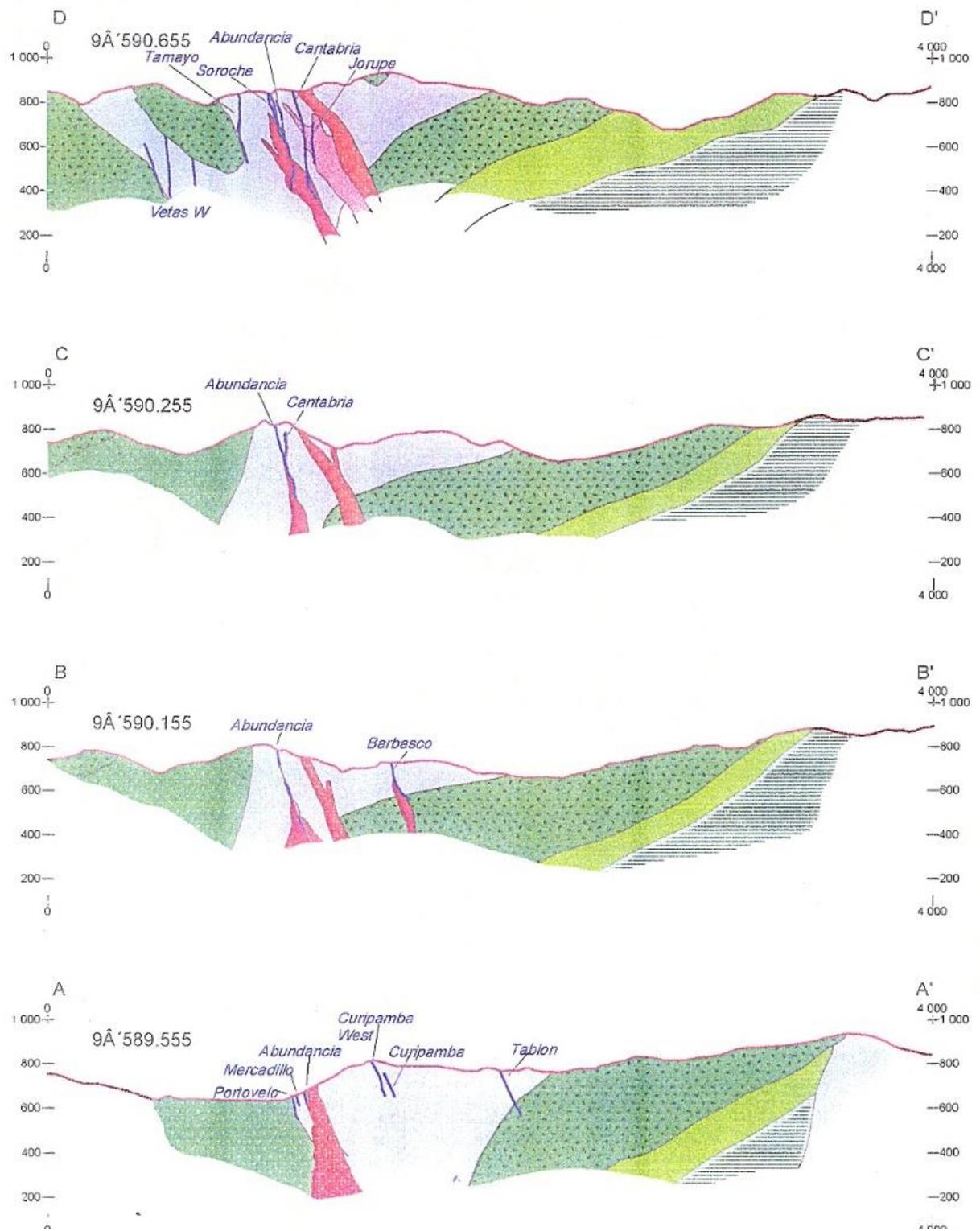


Figura 4.6. Secciones Geológicas de Figura 4.2.

Fuente: (IAMOGOLD, 2003)

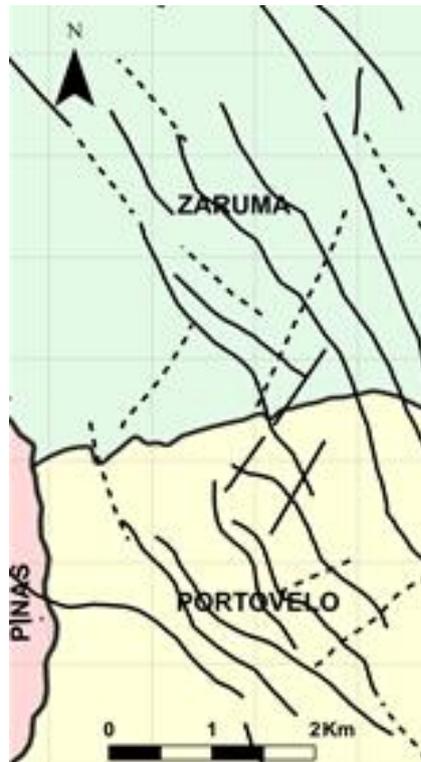


Figura 4.7. Principales estructuras mapeadas.

Fuente (IAMOGOLD, 2003)

Muestreo: estos datos se los obtuvo de las secciones pertenecientes a las vetas Agua Dulce, Soroche y Cantabria (véase Figura 4.3) que representa una recopilación de las labores de explotación durante 50 años por la empresa SADCO. Para dicho proceso se utilizó el programa Autocad y se importó cada una de las secciones en formato JPG para a continuación digitalizar cada uno de los puntos de las 3 vetas (véase Figura 4.8); estos muestreos contienen dos parámetros: ley (g/T) y potencia (m). Finalmente, los datos se los exporto como hojas de Cálculo de Excel teniendo la siguiente cantidad de puntos: Agua Dulce (1450), Soroche (1510) y Cantabria (4560).

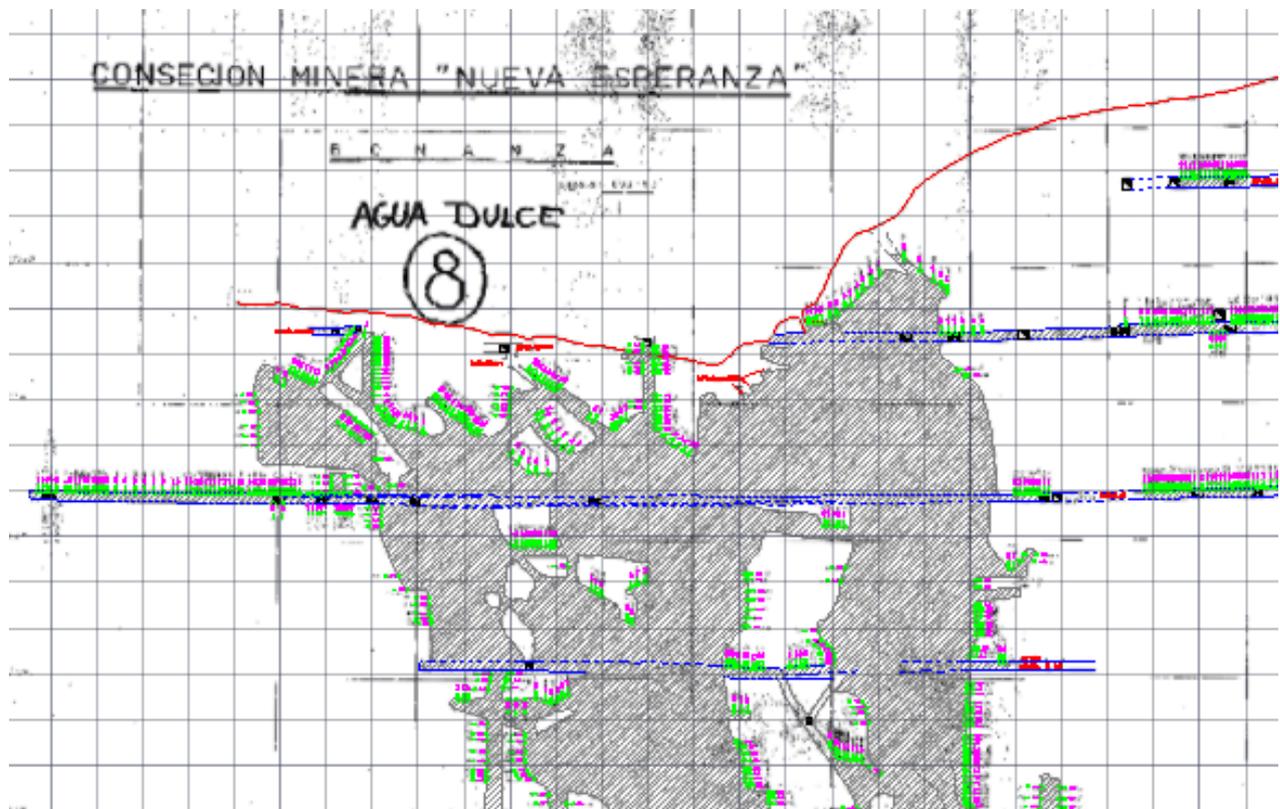


Figura 4.8 Digitalización de las muestras tomadas en la veta Agua Dulce.

4.2 Fase II: Creación de Modelos Individuales

Una vez organizada toda la información asociada a litología, estructuras y leyes se procedió a la construcción de cada modelo de forma individual.

4.2.1 Modelo Litológico

Debido a que suelen encontrarse diferencias entre el tipo de roca presente en la superficie con las del subsuelo se separó el modelo litológico en dos modelos individuales: modelo litológico superficial y modelo litológico de subsuelo.

4.2.1.1 Modelado Litológico Superficial

Muestra lo que se está observando en una vista en planta, debido a que no se pudo tomar datos de muestras de mano o realizar una descripción de los afloramientos presentes alrededor de la zona de estudio; se basó este modelo en el mapa geológico

de Portovelo y Zaruma realizado en el proyecto RETAZOS del año 2003 por la empresa IAMGOLD ECUADOR S.A. (véase Figura 3.3).

4.2.1.1.1 Digitalización de litologías

En el primer paso se utilizó el programa ArcMap en donde se digitalizó cada una de las litologías como polígono en formato shapefile (véase Figura 4.9).

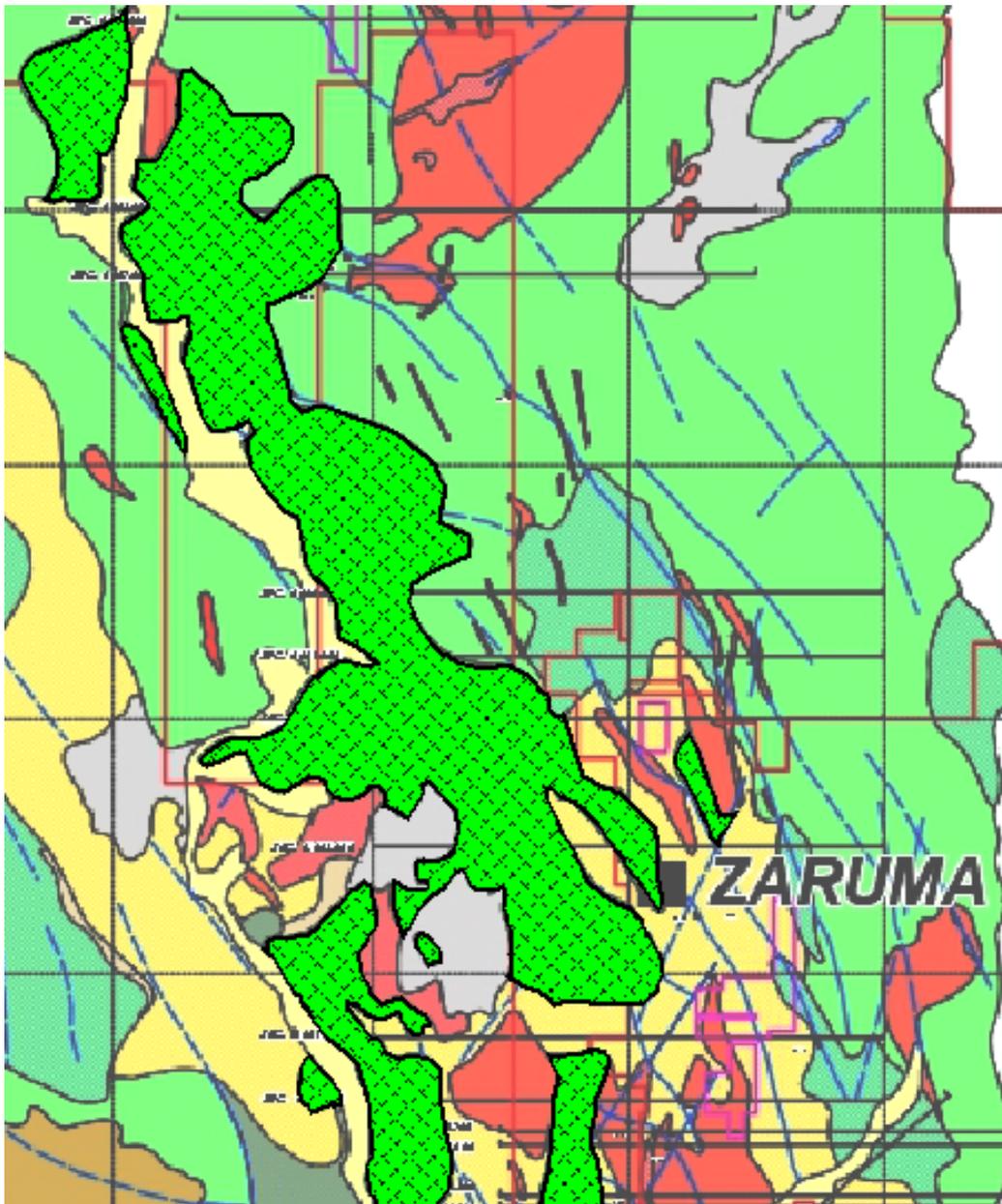


Figura 4.9 Digitalización de litología de pórfidos andesíticos.

4.2.1.1.2 Creación de DEM

A partir de las curvas de nivel (Figura 4.4) se procedió primero a la creación de una superficie o Red de Triangulación Irregular (TIN, acrónimo en inglés), con la herramienta *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Data Management-TIN-Create TIN* de ArcMap (véase Figura 4.10), en la cual se debe especificar el sistema de Coordenadas (PSAD 56) y el atributo asociado a los valores de altitud (elevation). A continuación, se hace uso de la herramienta *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Conversion-From TIN-TIN to Ráster* (véase Figura 4.11), donde, a partir del TIN, se crea una nueva superficie en formato Ráster dejando los parámetros por defecto y cambiando únicamente el tamaño de celda (50).

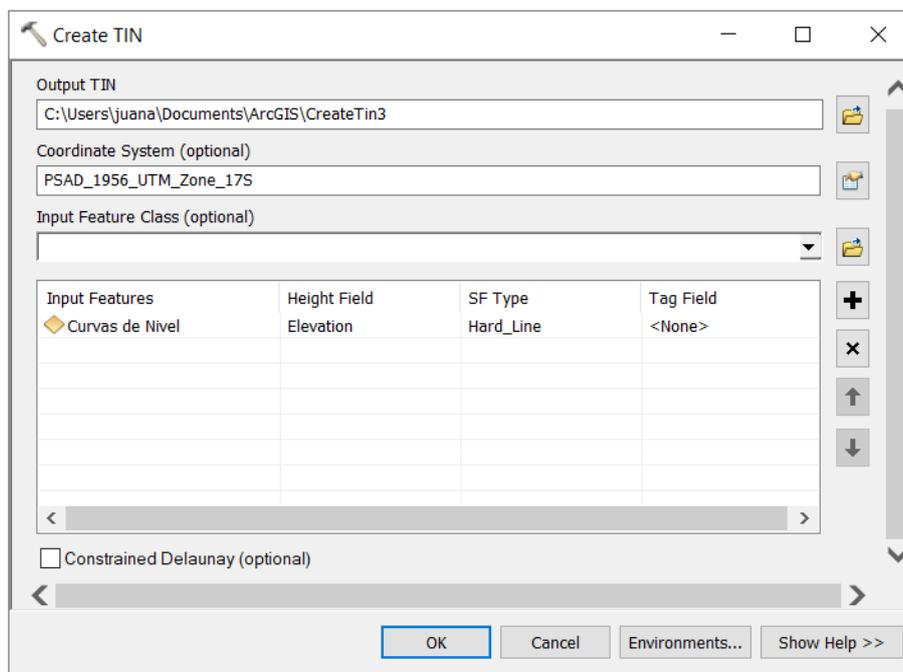


Figura 4.10 Herramienta Create TIN de ArcMap.

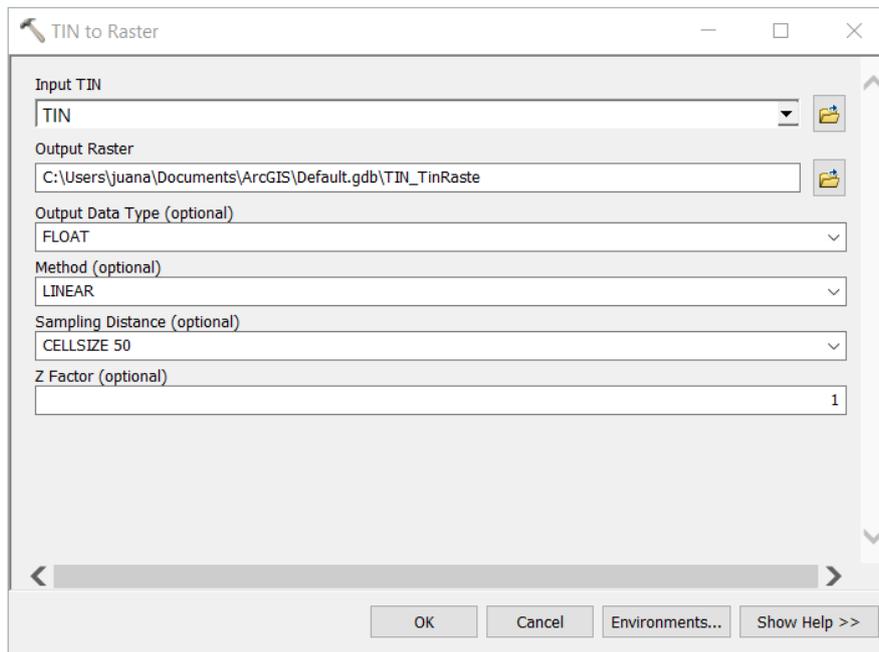


Figura 4.11 Herramienta TIN to Ráster de ArcMap.

4.2.1.1.3 Interpolación de Superficie

En esta sección se utilizó la herramienta *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Functional Surface-Interpolate Shape* de ArcMap (véase Figura 4.12), en la cual a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM), se procedió a convertir cada una de las litologías en superficies tridimensionales (véase Figura 4.13).

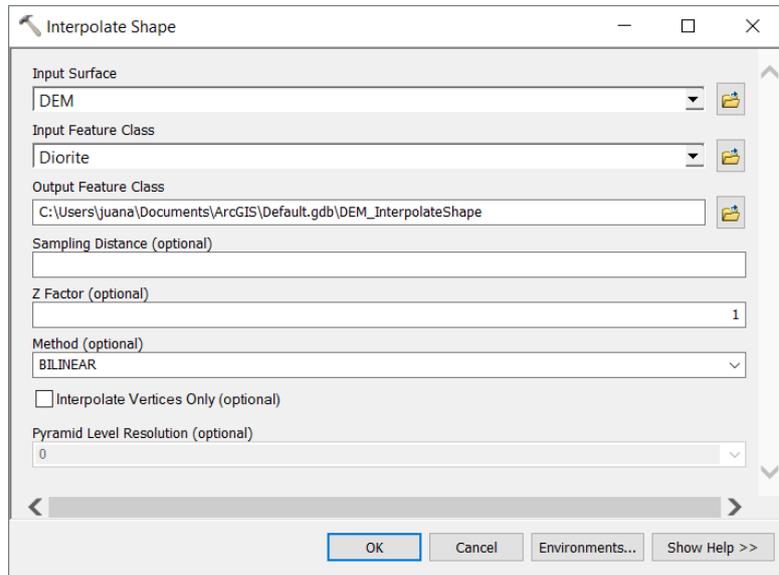


Figura 4.12 Herramienta Interpolate Shape de ArcMap.

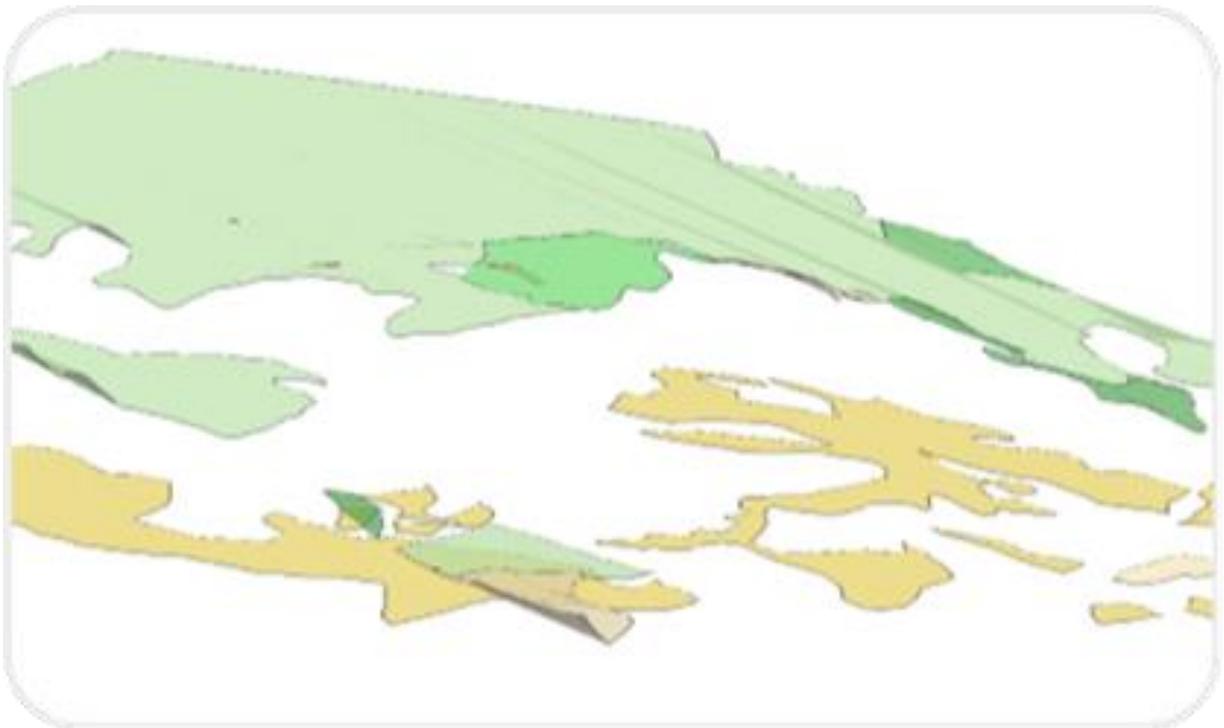


Figura 4.13 Interpolación de superficie pumita y pórfido andesítico.

4.2.1.2 Modelo Litológico Subterráneo

Para su representación se hizo uso de las secciones geológicas hechas en el proyecto RETAZOS de IAMGOLD ECUADOR S.A. (Figura 4.6) y de los programas de Autocad y RecMin.

4.2.1.2.1 Digitalización cortes geológicos

Como primer paso se procedió a graficar (calcar) en AutoCAD cada una de las secciones geológicas, tomando en consideración las litologías de forma individual (véase Figura 4.14)

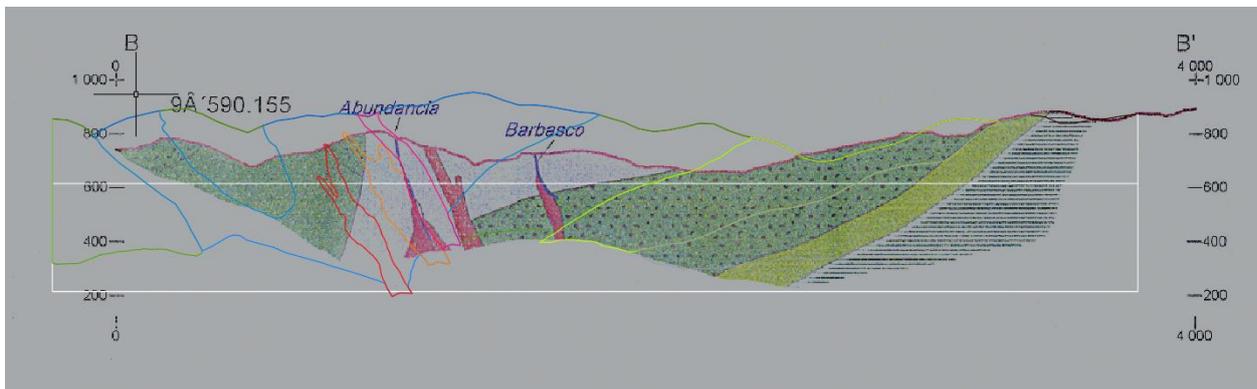


Figura 4.14 Digitalización del perfil B-B'.

4.2.1.2.2 Creación de Perfiles en RecMin

Se proceden a agrupar y exportar de AutoCAD cada una de las litologías extraídas de las secciones geológicas en formato DXF. A continuación, se importan los datos al programa minero RecMin el cual solo admite y convierte los archivos DXF a un nuevo formato (.Lin) para posteriormente ser visualizados en el módulo de dibujo (véase Figura 4.15).

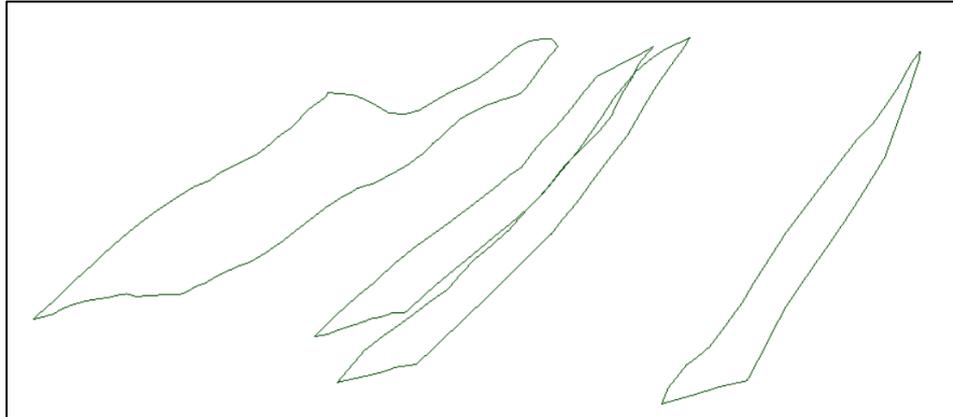


Figura 4.15 Perfil litológico de Tobas Dacíticas

4.2.1.2.3 Superficies T3

Para la representación tridimensional de cada litología se procedió a unir los perfiles entre si a través de superficies T3 (véase Figura 4.16), que tienen la particularidad de ser observables cuando se aplica el visor tridimensional del software RecMin.

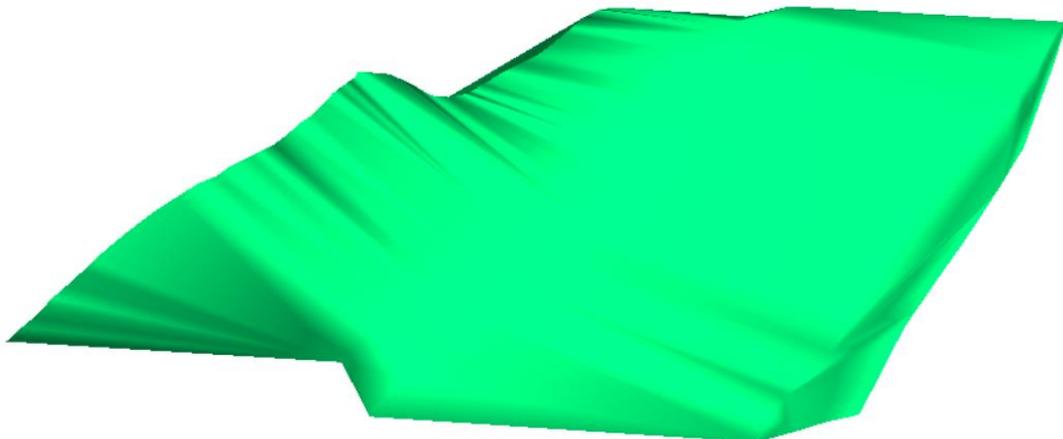


Figura 4.16 Representación tridimensional de Tobas dacíticas

4.2.2 Modelo Estructural

Se basó en las estructuras mapeadas (Figura 4.7) del proyecto RETAZOS de IAMGOLD ECUADOR S.A.; y del uso de los softwares ArcMap y RecMin.

4.2.2.1 Digitalización e interpolación de estructuras

Como primer paso, se digitalizó cada estructura con un formato de polilínea (shapefile) para posteriormente ser interpoladas a través del modelo de elevación digital (DEM) (véase Figura 4.17) con el uso de la herramienta *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Functional Surface-Interpolate Shape* de *ArcMap* (véase Figura 4.12).

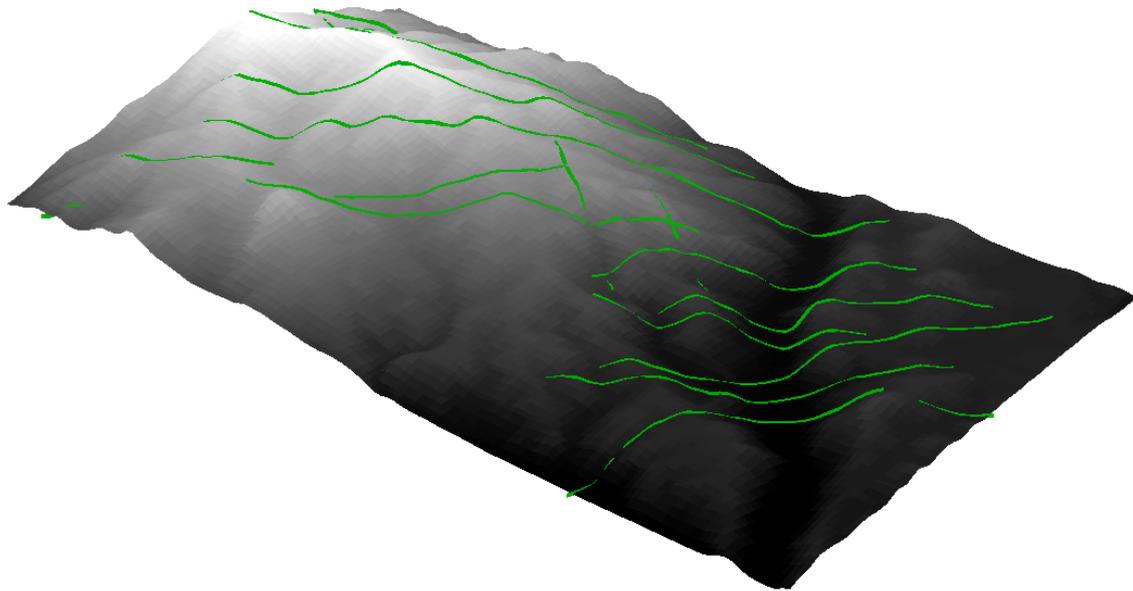


Figura 4.17 Estructuras mapeadas (verde) interpoladas a través del DEM.

4.2.2.2 Estructuras con superficie T3

Las polilíneas se los exporta en formato DXF para ser importados al software RecMin en formato tipo (.Lin); a continuación, en el módulo de dibujo se procese a abrir de forma individual las estructuras que poseen datos de rumbo y buzamiento (4) y rellenarlas con superficie T3 (véase Figura 4.18)

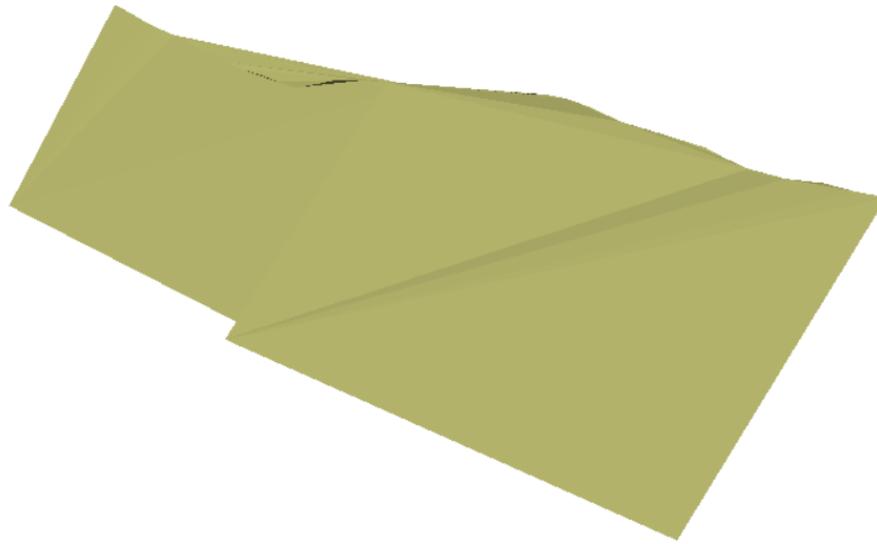


Figura 4.18 Estructura mapeada con rumbo de 240° y buzamiento 38°.

4.2.3 Modelo de Leyes

Se lo realiza a partir de las hojas de Cálculo en Excel de los puntos de muestreo de las vetas Agua Dulce, Soroche y Cantabria (véase Figura 4.19).

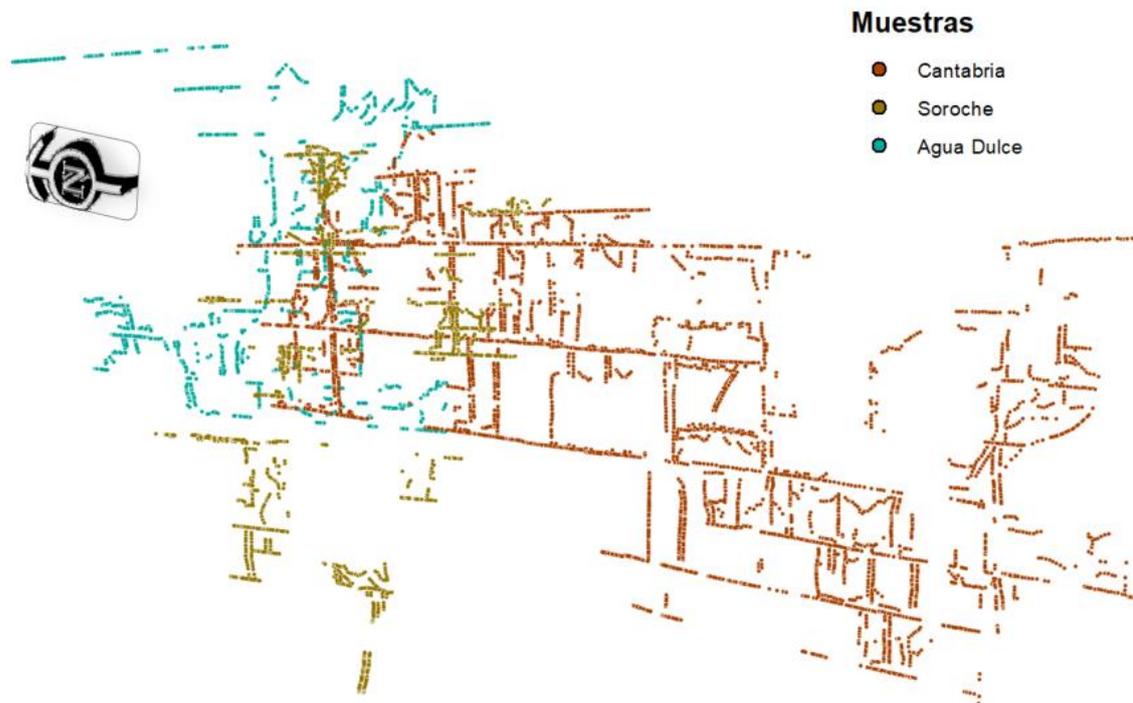


Figura 4.19 Visualización de los puntos de Muestreo en el programa ArcScene.

4.2.3.1 Importar los datos de Muestreo

Las características asociadas a cada uno de los puntos de muestreo de las vetas fueron separadas en hojas de Cálculo de Excel (4), para posteriormente ser importados como sondajes en formato CSV en el programa RecMin; cada hoja de cálculo presentaba las siguientes características de los muestreos:

- **Datos de Collar:** Representa la posición en X, Y y Z (véase Tabla 4.1).
- **Datos de Desviación:** Representa la dirección que tomara el sondaje (véase Tabla 4.2).
- **Datos de Litología:** Representa las zonas mineralizadas, así como su espesor (véase Tabla 4.3).
- **Datos de Muestreo:** Representa la ley (g/T) de cada sondaje (véase Tabla 4.4).

Tabla 4.1 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Collar.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre de Sondeo	Posición X	Posición Y	Posición Z
MCD1	654102.7906	9590618.209	793.68
MCD2	653997.7906	9590289.209	795.10

Tabla 4.2 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Desviación.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre de Sondeo	Distancia	Dirección	Desviación
MCD1	3	0	-90
MCD2	3.6	0	-90

Tabla 4.3 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Litología.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre de Sondeo	Desde	Hasta	Litología
MCD1	0	1	Estéril
MCD1	1	2	Mineral
MCD1	2	3	Estéril
MCD2	0	1	Estéril
MCD2	1	2.6	Mineral
MCD2	2.6	3.6	Estéril

Tabla 4.4 Ejemplo de formato para la importación de Datos de Muestreo.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre de Sondeo	Desde	Hasta	Ley= g/T
MC1	1	2	604.34
MC2	1	2.6	516.32

4.2.3.2 Categorización de las Leyes de Mineral

Los sondajes (muestras) son cargados en el módulo de dibujo de RecMin (véase Figura 4.20); a continuación, se procede a clasificar los valores de leyes en 4 grupos (véase Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Distribución de las Leyes para las 3 vetas.

Fuente: Elaboración propia.

Ley	Rango (g/T)	Color
Nula	< 1	Verde
Baja	1-5	Amarillo
Media	5-15	Azul
Alta	> 15	Rojo

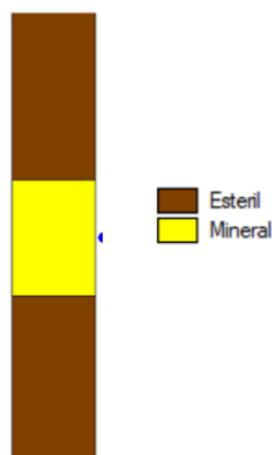


Figura 4.20 Punto de muestreo representado como sondaje en RecMin.

4.2.3.3 Creación de Polígonos

Se procede a unir con líneas tanto el techo como la base de los sondajes de igual rango; correlacionando primero los sondajes más próximos entre sí para posteriormente, de ser posible, correlacionar los sondajes más distantes (véase Figura 4.21).

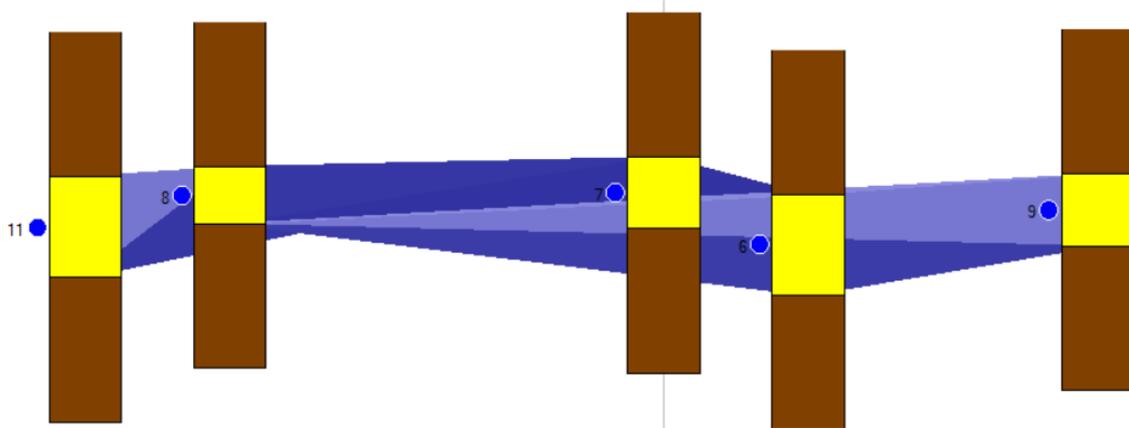


Figura 4.21 Polígono asociado a sondajes con una ley media para la veta Cantabria

4.3 Fase III: Creación de Modelo Geológico Final

Para la construcción del modelo geológico final se combinó las características de cada uno de los modelos litológico, estructural y leyes, así mismo se procedió a realizar la estimación de recursos mineros; para ello se calculó primero el área total por rangos de las zonas mineralizadas. RecMin posee una opción en la cual nos realizada el proceso de forma directa (véase Figura 4.22) y calcula el área total del T3 asociada a cada rango de leyes (zonas). Finalmente, para el cálculo de volumen se procedió a multiplicar el área total por diferentes espesores dependiendo del tipo de recurso (véase Tabla 4.6).

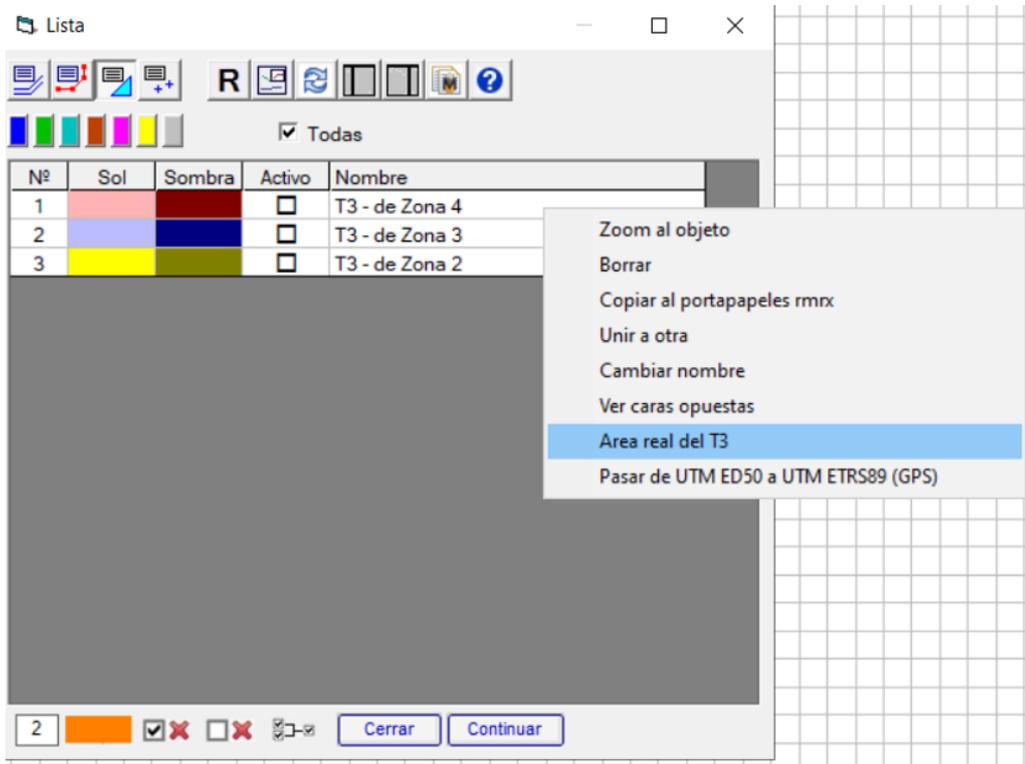


Figura 4.22 Herramienta para el Cálculo de área total de T3.

Tabla 4.6 Valores de Espesores para el cálculo de Recursos.

Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Recurso	Espesor (m)
Medido	10
Indicado	20
Inferido	40

CAPÍTULO 4

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Modelo litológico

El modelo litológico se basó en observaciones de campo e indica el tipo de roca asociado a las zonas de mineralización. Hay que tener en cuenta que se realizó dos modelos litológicos: uno superficial y otro subterráneo, para de esta forma tener una mejor comprensión de las zonas mineralizadas tanto bidimensional y tridimensionalmente.

Previo a la obtención de los dos modelos mencionados, se procede a la creación de un Red de Triangulación Irregular (TIN) y Modelo de Elevación Digital (DEM). La superficie tipo TIN muestra con una gama de colores los diferentes relieves y geoformas de la zona de estudio; tomando por ejemplo las zonas con elevaciones bajas (Río Amarillo) de color azul y zonas con elevaciones altas (montañas) de color rojo, café y naranja (véase Figura 5.1). Este tipo de superficie es utilizada en nuestro estudio únicamente para disminuir los errores o picos que se pueden llegar a presentar al momento de la interpolación y construcción del modelo de elevación digital a partir de las curvas de nivel.

Por otro lado, el DEM representa las superficies del terreno en formato tipo ráster (véase Figura 5.2) que, a diferencia del formato anterior, es posible utilizarlo en las herramientas que ofrece el ArcToolbox.

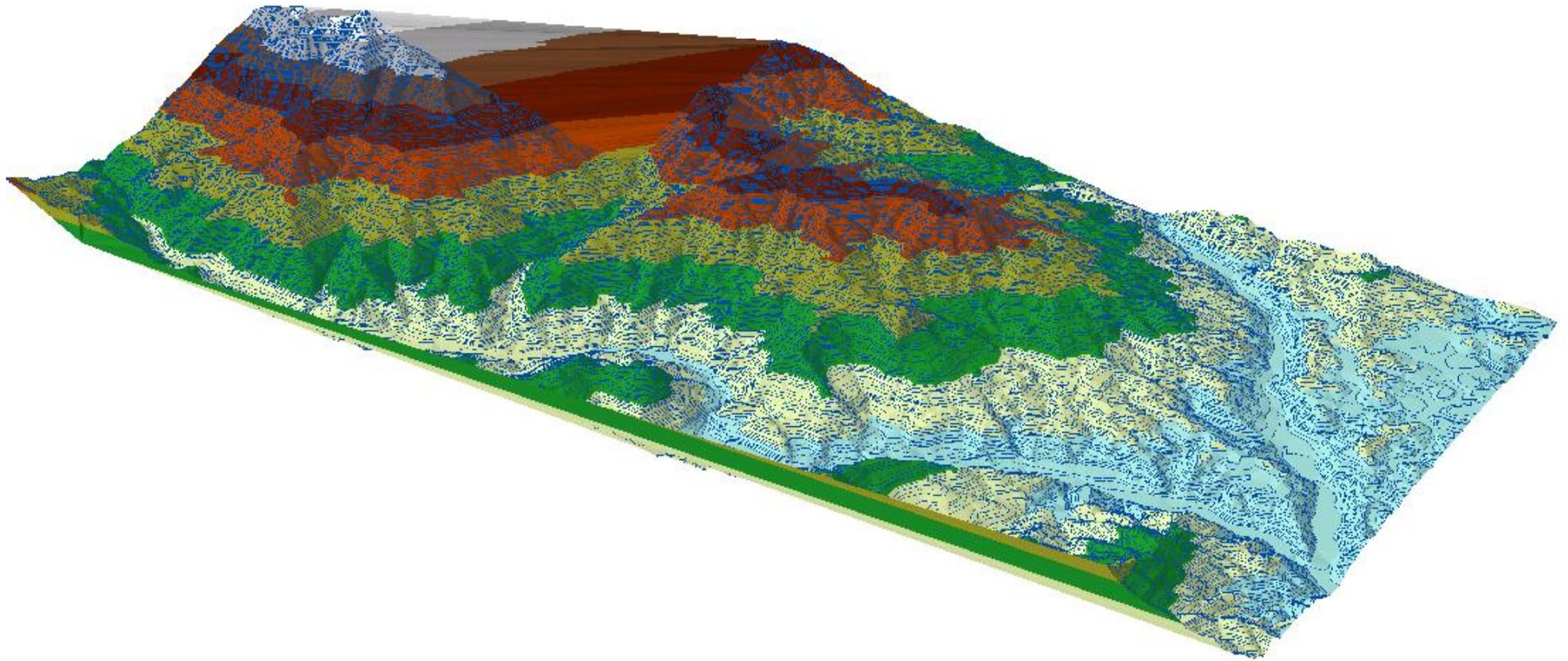


Figura 5.1 Superficie tipo TIN.

Fuente: Elaboración propia.

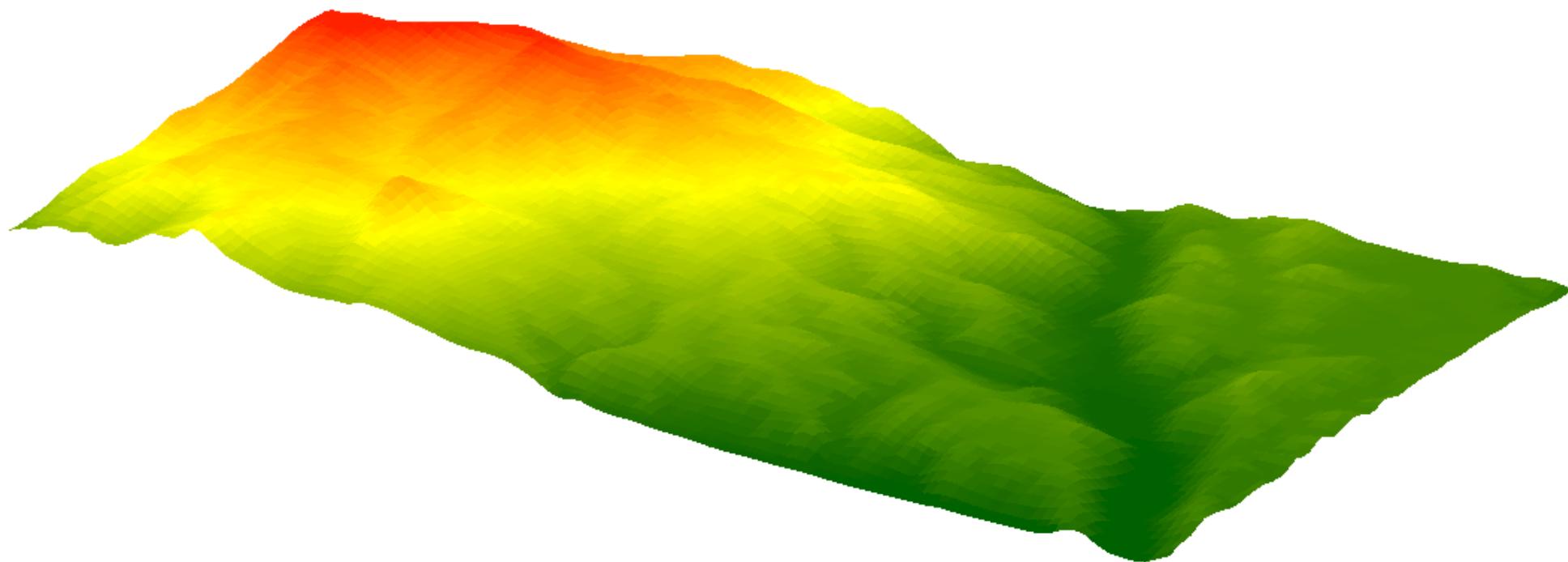


Figura 5.2 Modelo de Elevación Digital (DEM).

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Modelo Litológico Superficial

En este modelo se pudo observar que, en las zonas más bajas correspondiente al sector del Río Amarillo se tienen depósitos cuaternarios (color amarillo), en las zonas de pendientes intermedias tenemos que sobresalen los pórfidos andesíticos (color verde) y los intrusivos dioríticos (color naranja); y en las zonas más elevadas abundan las tobas de lapilli (color mostaza). La elevación se incrementa de Sur a Norte, lo cual coincide con la aparición de intrusiones y de las zonas de mineralización más importantes (véase Figura 5.3).

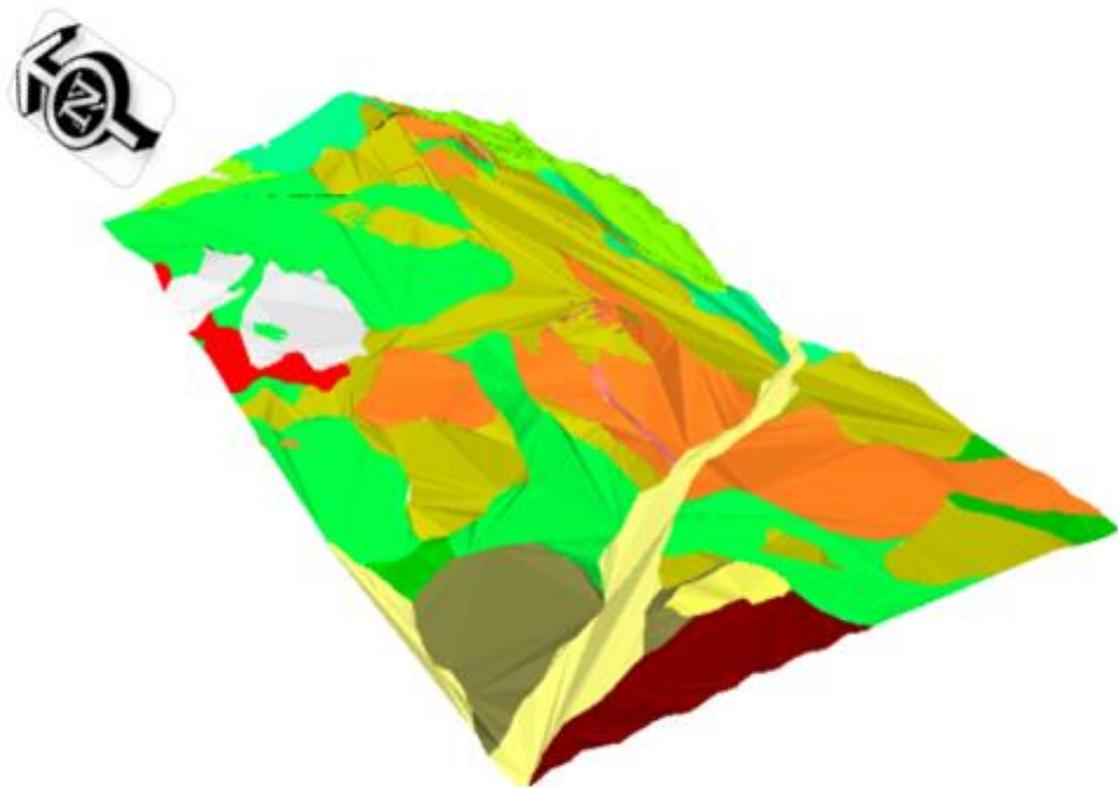


Figura 5.3 Modelo litológico Superficial.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Modelo Litológico Subterráneo

Se determinaron 5 litologías principales presentes en el subsuelo; las tobas de lapilli (amarillo) es el tipo de roca que más abundan en la zona de estudio, así mismo se sobreponer a las tobas dacíticas (verde) y estas se sobreponen a su vez a los flujos de escombros (celeste). Se tiene presente dos tipos de rocas ígneas: los stocks cuarzo-

dioríticos (rosado) y las dioritas (anaranjado); el primero intruye al segundo y este a su vez intruye a las tobas de Lapilli (véase Figura 5.4).

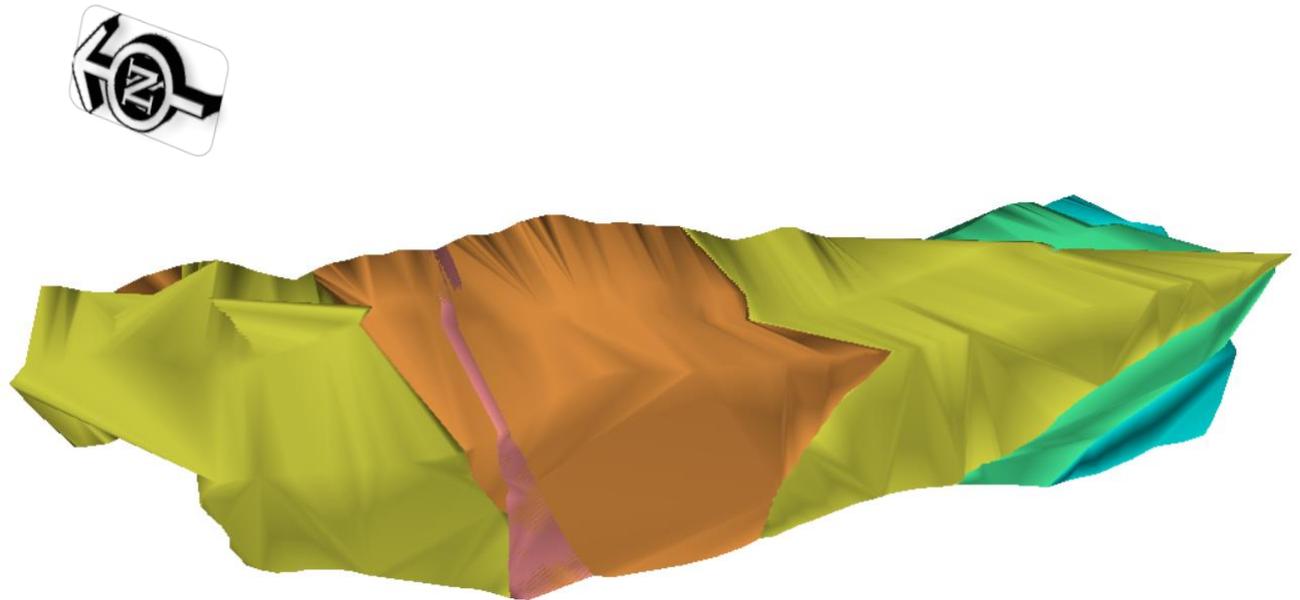


Figura 5.4 Modelo Litológico Subterráneo.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Modelo Estructural

De las estructuras mapeadas en el estudio realizado por IAMGOLD ECUADOR S.A., solo 5 (rojo) poseían datos de rumbo y buzamiento que permitió graficarlas en 3 dimensiones. No se especifica el tipo de estructura (falla, pliegue) en la lectura del proyecto RETAZOS. Por lo tanto, en nuestro modelo se las representó como planos que atraviesan el subsuelo; las estructuras presentan direcciones de rumbo y buzamiento (Este-Sureste) similares al de las Fallas Piñas-Portovelo (P-P) algo esperado debido a que dicho sistema junto con el sistema de Fallas Puente de Buza-Palestina (P-B-P) controlan todo el sistema estructural de la zona aurífera (véase Figura 5.5).

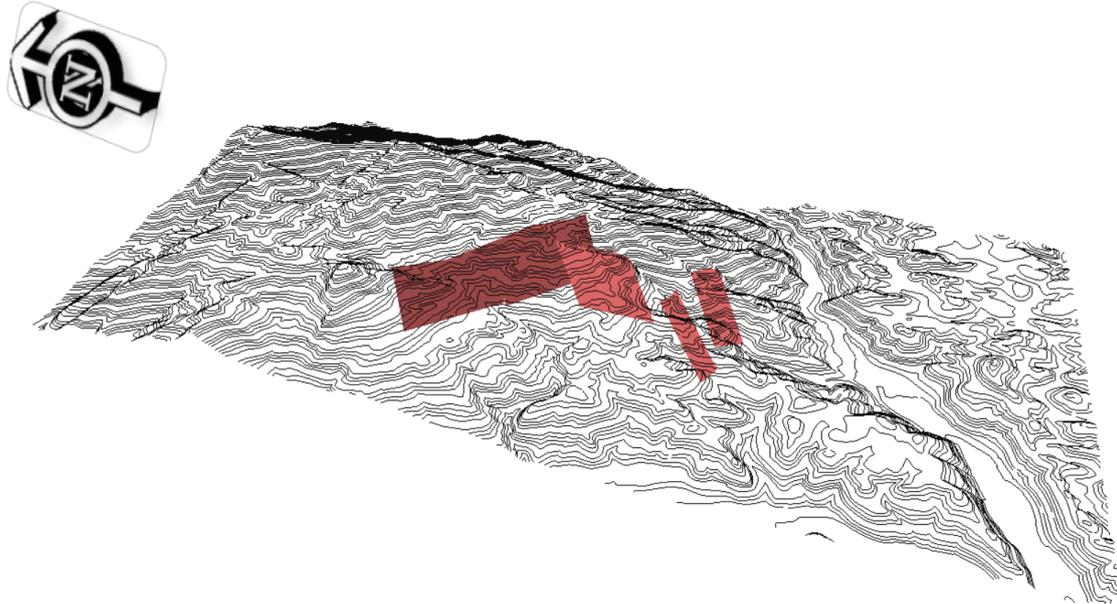


Figura 5.5 Estructuras Mapeadas en el proyecto RETAZOS.

5.3 Modelo de Leyes

El modelo de leyes se obtuvo a partir de muestreos realizados durante 50 años de trabajo. En este sentido, se presentaron dos importantes limitaciones con respecto al modelado de leyes, relacionadas con el número de muestras, su ley y la distribución espacial de los mismos.

- **Primera Limitación:** los puntos de muestreo de las vetas Agua Dulce (véase Figura 5.6) y Soroche (véase Figura 5.7), se encuentran distribuidos de forma irregular, es decir, se tienen zonas donde existen una gran concentración de datos y otras en las que no hay valores; otro inconveniente adicional que no permitió el modelado de las vetas es que se tiene una variación muy grande de las leyes (g/T) de forma local, es decir por ejemplo podemos encontrar un punto donde la ley es de 2 g/T y a distancias centimétricas valores de 10- 15 g/T. Sumado a estos inconvenientes se presenta una poca cantidad de datos de las vetas lo que no permitió aplicar la metodología de la sección 3.2.3, debido a que de hacerlo se tendría una gran sobreestimación de los recurso y generaría errores importantes al momento de realizar los planes de explotación y exploración.



Figura 5.6 Puntos de muestreo Veta Agua Dulce.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.7 Puntos de muestreo Veta Soroche.

Fuente: Elaboración propia.

- **Segunda Limitación:** los puntos de muestreo de la veta Cantabria (véase Figura 5.8) fueron, debido a su cantidad (4560), los únicos que se pudo aplicar la metodología de la sección 3.2.3. Sin embargo, se debe tener en cuenta otra problemática. Primero se recalca que en el presente estudio se trabajó inicialmente con los métodos geoestadísticos para el modelado de leyes que facilitará la interpolación de las zonas mineralizadas, no obstante, no se obtuvo resultados favorables.



Figura 5.8 Puntos de Muestreo Veta Cantabria.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.1 Métodos de estimación de datos de leyes

Existen varios métodos geoestadísticos que permiten analizar los datos de leyes de un depósito mineral en cuestión. Sin embargo, hay que tener en cuenta que guarden congruencia con los valores de los datos ingresados. Es así como, para el presente proyecto se aplicó el método de Kriging Ordinario y el de IDW para analizar la factibilidad de emplear o no estos métodos.

Método de Kriging: es un método ampliamente utilizado para la estimación de datos de depósitos o leyes (g/T); en el presente proyecto se utilizó específicamente el Kriging Ordinario. Para la interpolación se utilizó la opción de *Geostatistical Wizard* de la herramienta *Geostatistical Analyst* en ArcMap (véase Figura 5.9). Como resultado se

obtuvo una elevada sobreestimación de los valores entre 5 a 15 g/T (azul); a su vez no se presenta ninguna tendencia o relación de los valores (véase Figura 5.10).

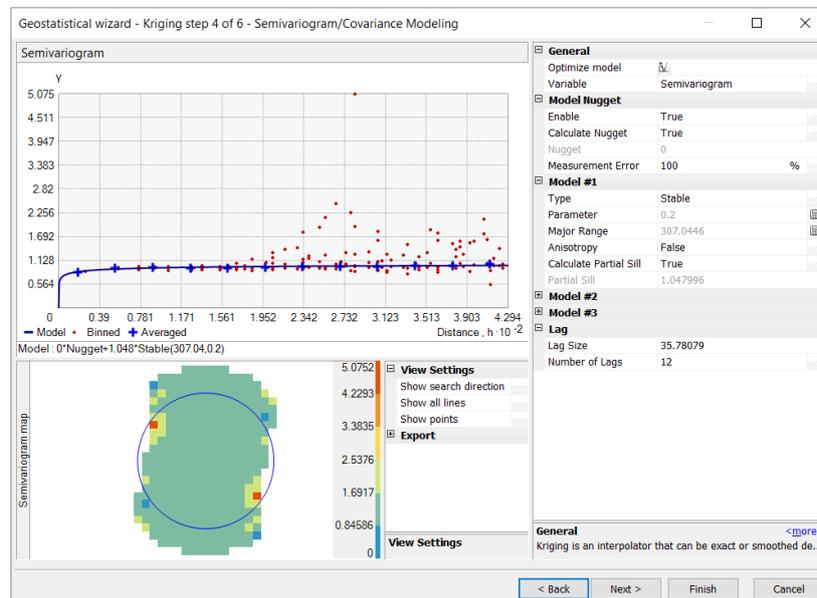


Figura 5.9 Geostatistical Wizard de ArcMap.



Figura 5.10 Modelado utilizando el método de Interpolación de Kriging Ordinario.

Método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW): es un método geoestadístico que interpola los valores desconocidos a partir de datos conocidos a una distancia previamente definida. Para dicho proceso se hizo uso de la herramienta *ArcToolbox-Geostatistical Analyst Tools-Interpolation-IDW* de ArcMap (véase Figura 5.11); donde se especificó el parámetro a interpolar (ley) y el tamaño de celda (0.001); este último valor se tomó el mínimo posible debido a que existen variaciones muy grandes en distancias centimétricas. El resultado del proceso generó un modelo con una sobreestimación

incluso mayor que en el método de Kriging con los valores de 1-5 y 5-15 g/T; así mismo no se observa ninguna correlación de las zonas mineralizadas.

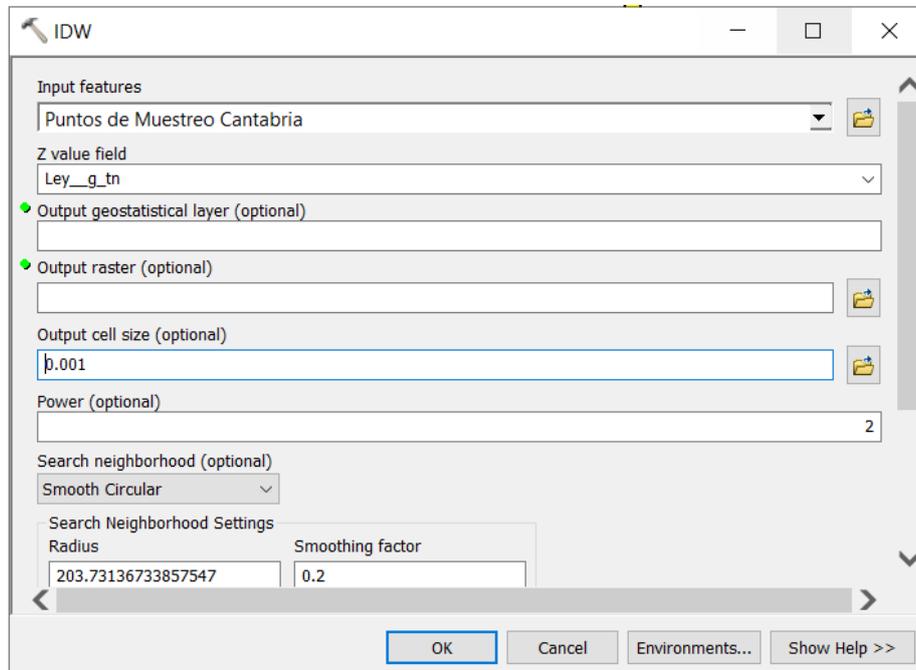


Figura 5.11 Herramienta IDW de ArcMap.

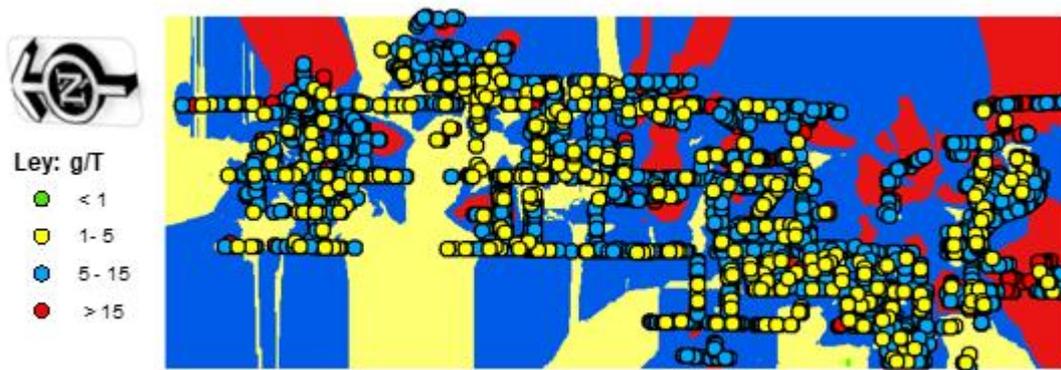


Figura 5.12 Modelado utilizando el método de Interpolación de IDW.

5.3.2 Análisis Final de los Métodos Geoestadísticos

A pesar de existir una amplia variedad de métodos geoestadísticos, debido a que se está trabajando con datos de más de 3 variables (X, Y, Z, ley) o datos hiperespaciales, los únicos métodos que podrían ser aplicables para la interpolación de datos en el presente estudio son el Kriging Ordinario e IDW. Sin embargo, en la sección anterior se mostró

que estos métodos no se obtuvo los resultados esperados. Es por esto, que para comprobar de una forma más rigurosa que dichos métodos no son aplicables con los datos de muestreo en la veta Cantabria se analizó 2 condiciones necesarias para realizar una interpolación: distribución y estacionalidad de los datos.

Distribución de los Datos: se verificó que los datos tengan una distribución normal, es decir que la mediana y la media sean lo más semejante posible; para ello se puede utilizar diferentes herramientas estadísticas como el histograma, diagrama de caja y bigotes o el normal QQ Plot. Para verificar el tipo de distribución de los datos de muestreo en la veta Cantabria se utilizó el histograma con la herramienta *Geostatistical Analyst- Explore Data- Histogram* de ArcMap (véase Figura 5.13). Esta condición es necesaria pero no suficiente para utilizar métodos geoestadísticos debido a que se pueden aplicar transformaciones (logarítmica, box-cox) que permitan “normalizar” los datos. En el presente estudio se utilizó una transformada tipo box-cox con un parámetro de 0.0293 que permitió a los datos obtener una distribución normal (campana de Gauss) dando como resultado una mediana y media igual a 1.877 (véase Figura 5.14). El hecho de que inicialmente no se haya tenido una distribución normal implica que los datos de muestreo no siguen una tendencia o no están espaciados de manera uniforme, algo predecible o esperado para fenómenos naturales como la distribución de las leyes minerales en el subsuelo.

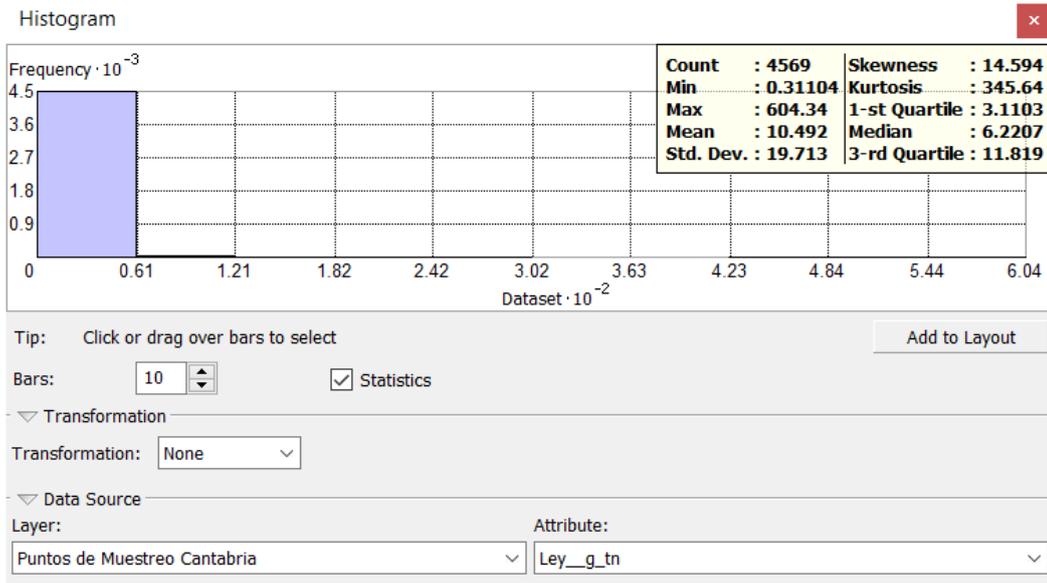


Figura 5.13 Herramienta Histogram de ArcMap.

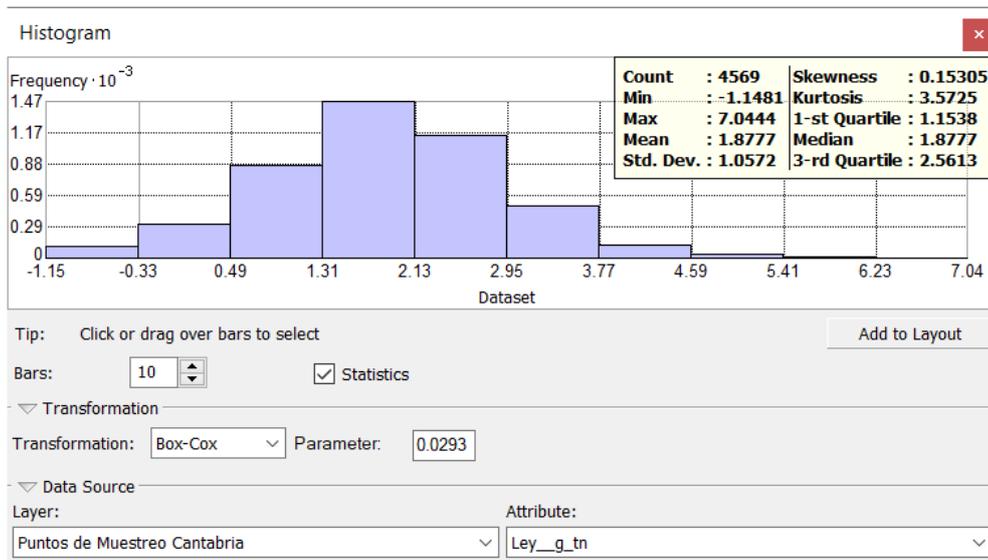


Figura 5.14 Transformada de Box-Cox.

Estacionalidad de los Datos: este criterio es el más relevante para la aplicación de métodos geostatísticos, ya que está relacionado a la variabilidad del peso de los datos (leyes). Para verificar esto, se utilizó un mapa de Voronoi con el uso de la herramienta *Geostatistical Analyst- Explore Data- Voronoi Map* de ArcMap (véase Figura 5.15); de manera sencilla en este mapa cada punto de muestreo se convirtió en el centro de una figura geométrica (región de Voronoi) cuyo tamaño y color depende del peso (ley) del

punto. Realizando un análisis más profundo se puede observar una gran cantidad de regiones de diferentes tamaños muy próximos entre si lo que indica que se tienen grandes variaciones de los pesos de las muestras en distancias mínimas por lo tanto los datos no poseen una estacionalidad (variación mínima) para aplicar métodos geoestadísticos.

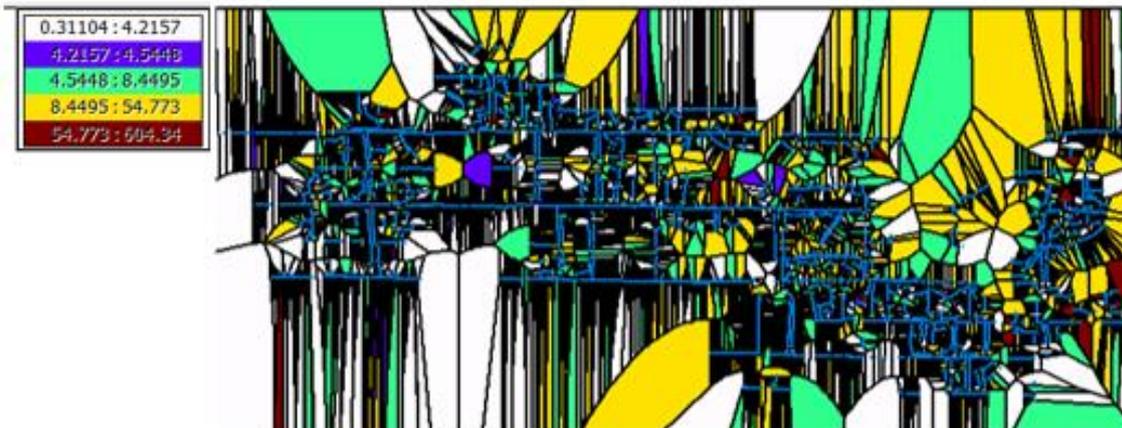


Figura 5.15 Mapa de Voronoi.

5.3.3 Modelo de Leyes Resultante

Debido a las limitaciones vistas en la sección anterior se obtuvo únicamente un modelo de leyes auríferas relacionado a los puntos de muestreo de la veta Cantabria (véase Figura 5.8); se graficó un total de 669 polígonos (véase Figura 5.16) distribuidos en las 4 diferentes zonas minerales (véase Tabla 5.1). En el modelo se puede observar que las zonas con leyes de 1-5 g/T (bajas) ocupan una mayor extensión en la veta. En contraste, las leyes menores a 1 g/T (nula) tienen la menor extensión casi imperceptibles. Las leyes de 5- 15 g/T (media) presentan de sur a norte una tendencia inicial de desplazarse hacia la superficie para luego cambiar de dirección y dirigirse a zonas más profundas (véase Figura 5.17); el comportamiento irregular de las zonas de mineralización se debe a que está controlado por un complejo sistema de fallas (Piñas-Portovelo).

Nº	Sol	Sombra	Activo	Nombre
653	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
654	Light Red	Dark Red	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 4
655	Light Red	Dark Red	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 4
656	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2
657	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
658	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
659	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2
660	Light Red	Dark Red	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 4
661	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
662	Light Red	Dark Red	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 4
663	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
664	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2
665	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
666	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2
667	Light Blue	Dark Blue	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 3
668	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2
669	Yellow	Dark Green	<input checked="" type="checkbox"/>	T3 - de Zona 2

Figura 5.16 Número total de polígonos.

Tabla 5.1 Número de polígonos para cada zona.

Fuente: Elaboración propia.

Zona	Rango (g/T)	Color	# de Polígonos
1	< 1	Verde	22
2	1-5	Amarillo	235
3	5-15	Azul	268
4	> 15	Rojo	144

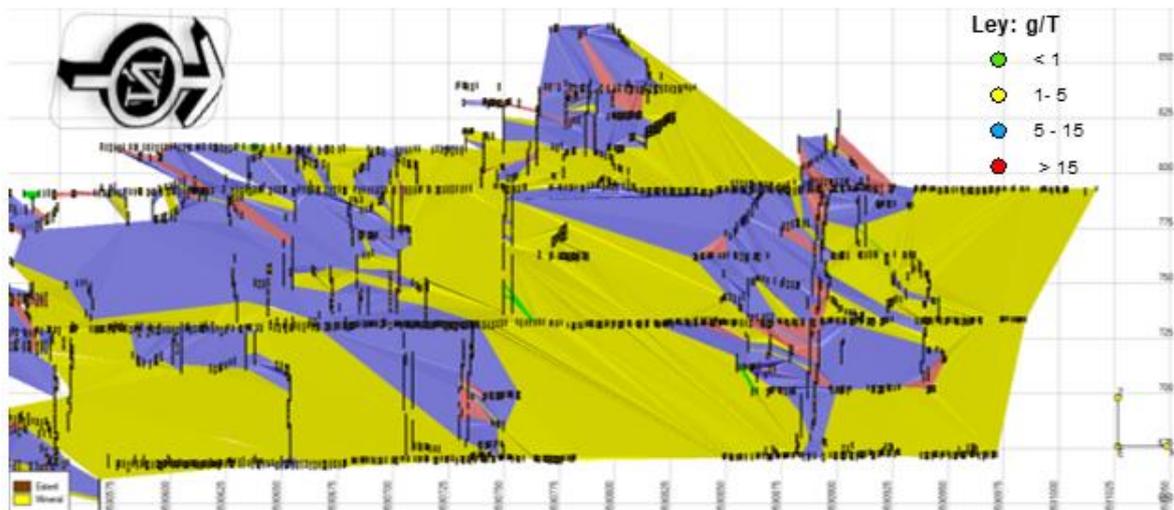


Figura 5.17 Modelo de Leyes para veta Cantabria.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Modelo Geológico

El resultado del presente estudio es un modelo conformado por los modelos litológicos, estructural y de leyes (véase Figura 5.18), es una representación tridimensional de las características geológicas de la zona de estudio que conforma una parte del subdistrito minero Portovelo-Zaruma. Con el modelo litológico y de leyes (véase Figura 5.19) se determinó una relación directa entre las zonas de mineralización (veta Cantabria) y el intrusivo diorítico (rosado); con los modelos estructural y de leyes (véase Figura 5.20) se obtuvo que la estructura graficada (verde) coincide con la veta Cantabria y controla las leyes de 5-15 g/T (azul) haciendo que se dirijan hacia la superficie. Los resultados coinciden con lo menciona en el libro Evaluación de Distrito Minero del Ecuador (PRODEMINCA, 2000) que indica que las zonas auríferas del subdistrito están controladas por el sistema de Fallas Piñas-Portovelo y emplazadas en rocas intrusivas de composición dacítica a cuarzo-dacítica. Finalmente, se obtuvo un catálogo dividida en 9 grupos con los recursos medidos, indicados e inferidos de la veta Cantabria (véase Tabla 5.2); para dicha clasificación no se tomó en consideración las leyes menores a 1g/T debido a que no suelen ser económicamente rentables. Los valores de espesor (10,20,40 m) que se utilizó en el cálculo de volumen fueron tomados en función al espesor promedio de las galerías de la mina (30 m).

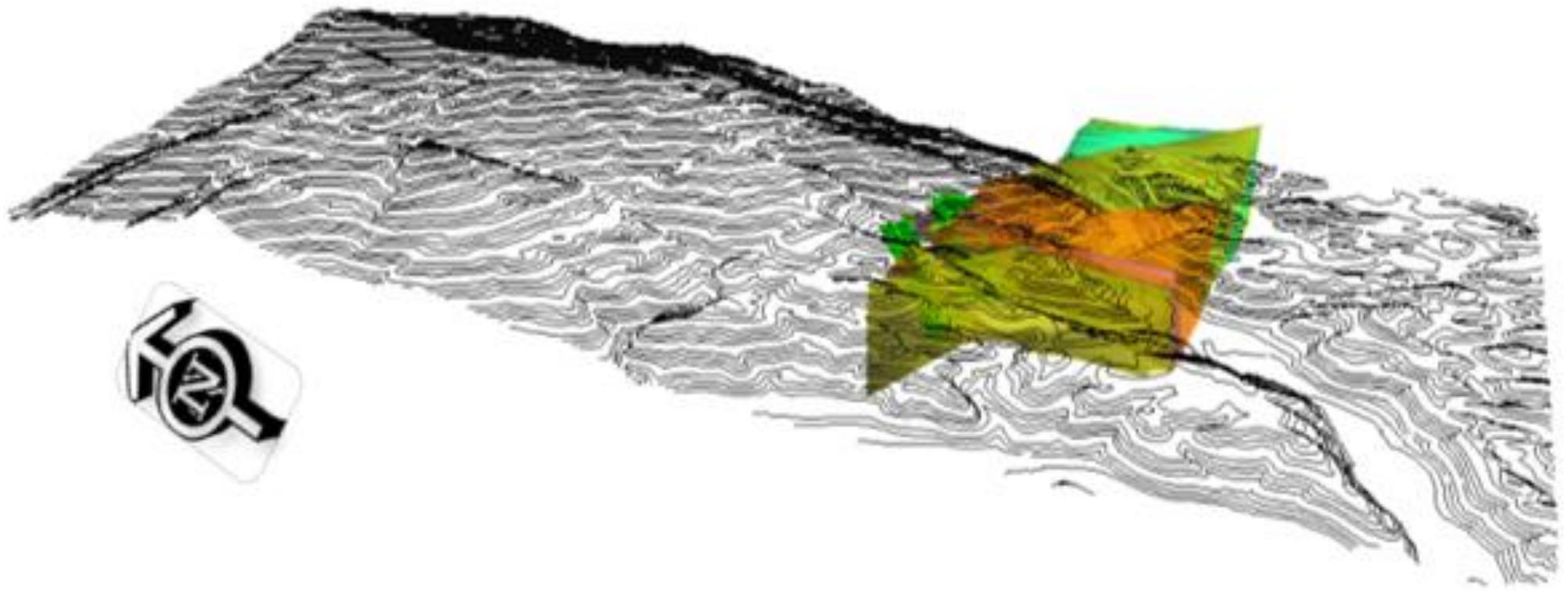


Figura 5.18 Vista Panorámica del modelo geológico final.

Fuente: Elaboración propia.

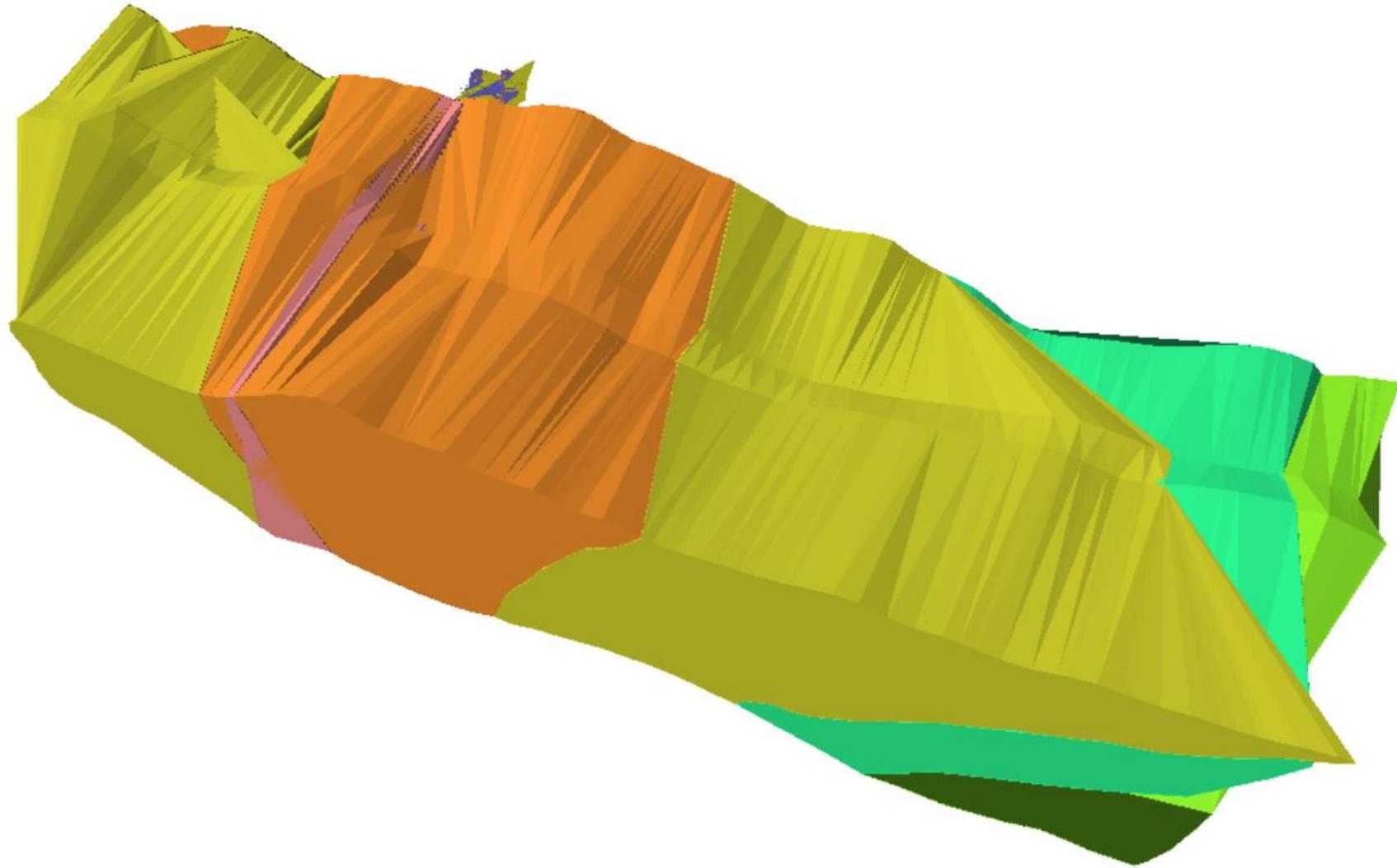


Figura 5.19 Modelo litológico y de Leyes.

Fuente: Elaboración propia.

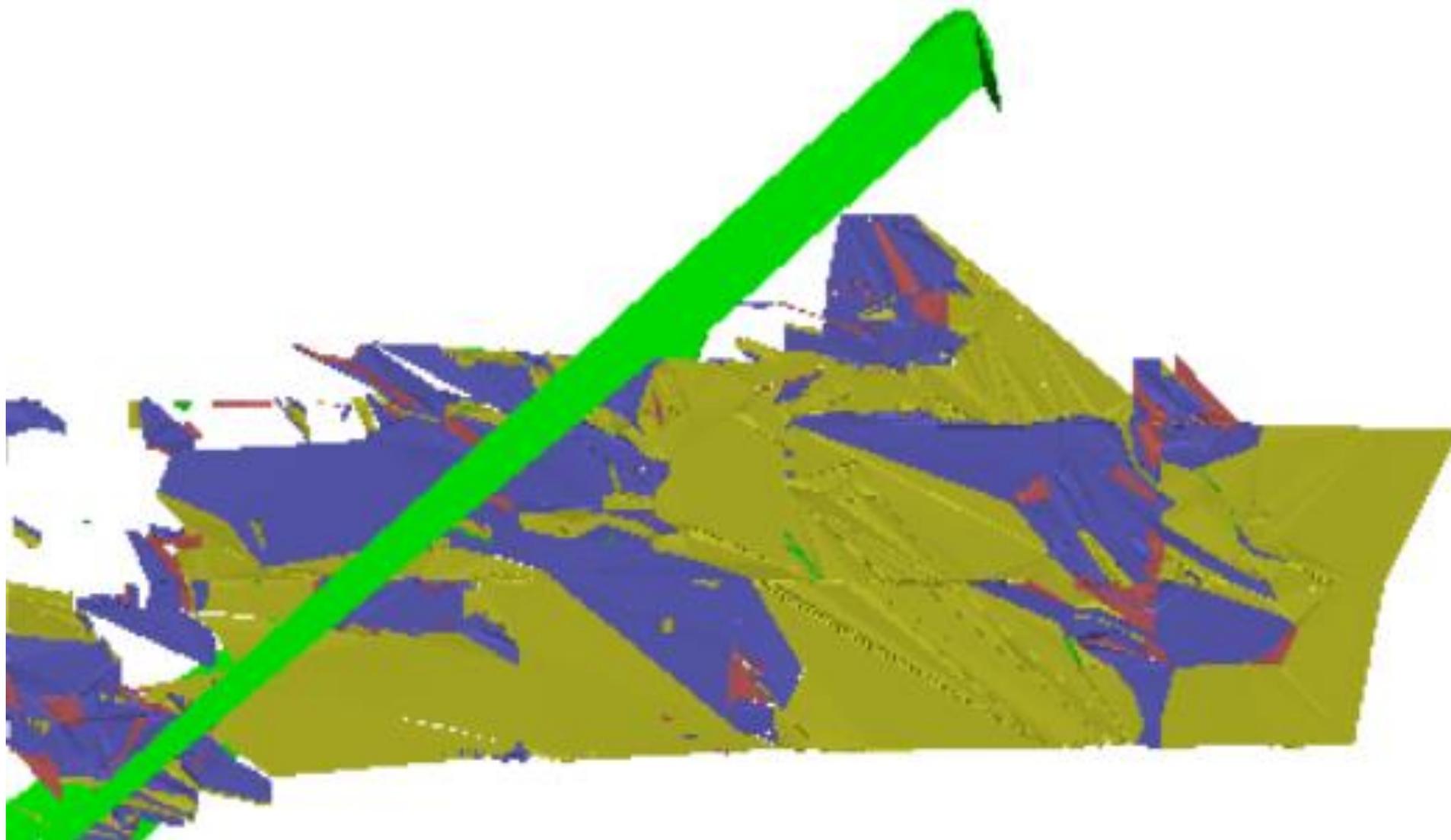


Figura 5.20 Modelo estructural y de Leyes.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 Catálogo de los Recursos de la veta Cantabria.

Fuente: Elaboración propia.

Recurso	Volumen (m^3)	Ley de Oro (g/T)
Medido	454.844	1-5
Indicado	909.688	1-5
Inferido	1'819.376	1-5
Medido	319.280	5-15
Indicado	638.560	5-15
Inferido	1'277120	5-15
Medido	49.619	>15
Indicado	99.238	>15
Inferido	198.476	>15

CAPÍTULO 5

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La información detallada referente a litología y estructuras de la zona de estudio se obtuvieron de observaciones y estudios recopilados en el proyecto RETAZOS a cargo de la compañía extranjera IAMGOLD ECUADOR S.A.; en cambio los datos de muestreo de las vetas Agua Dulce, Cantabria y Soroche se los extrajo de planos en zonas que fueron explotadas por las compañías SADCO y CIMA durante aproximadamente 50 años que en la actualidad aun sirven como referencias para los trabajos actuales de exploración y explotación.

Se tiene un total de 7520 muestras distribuidas en las 3 vetas principales de la siguiente forma: Agua Dulce (1450), Soroche (1510) y Cantabria (4560); cada punto de muestreo posee coordenadas (X, Y), profundidad (Z), potencia de la veta (m) y ley (g/T). Estos datos se los agrupó en 4 hojas de cálculo de Excel como datos de: collar, desviación (inclinación= -90° , desviación= 0°), litología y muestreo.

Se obtuvieron 5 litologías principales en el subsuelo de la zona de estudio: tobas de Lapilli, tobas dacíticas, flujo de escombros andesíticos y los intrusivos dioríticos y cuarzo-dioríticos que contrastan con las litologías en la superficie (depósitos cuaternarios, pórfidos andesíticos y depósitos volcano-sedimentarios). Las estructuras mapeadas tienen orientaciones similares (Este-Sureste) a los sistemas de Fallas Piñas-Portovelo (P-P) y Puente de Busa-Palestina (P-B-P). Las zonas de mineralización en la veta Cantabria se relacionan directamente con el intrusivo diorítico y con una estructura mapeada que tiene rumbo de 214° y buzamiento 34° .

Se generó un catálogo compuesto por 9 grupos de los recursos medidos, indicados e inferidos de la veta Cantabria con el uso del software minero RecMin; las leyes bajas (1-5 g/T) poseen los volúmenes con valores más altos: 454.844, 909.688 y 1'819.376. Existen zonas con leyes lo suficientemente altas (5-15) para trazar planes de exploración y explotación que sean económicamente rentables para los pequeños mineros.

No se obtuvo resultados favorables al modelado de leyes con los puntos de muestreo de la veta Cantabria utilizando los métodos geoestadísticos (Kriging, IDW) integradas en el programa ArcMap debido a que no cumplían con los criterios de distribución normal y estacionalidad de los datos causando una sobreestimación de las leyes. Para los puntos de muestreo de las vetas Agua Dulce y Soroche no poseían la cantidad de datos suficientes para aplicar alguna metodología para el modelado de leyes.

6.2 Recomendaciones

- Complementar el presente estudio con información tomada de campo como muestras de mano de la mina, datos estructurales (rumbo y buzamiento) de fallas, vetas y planos para realizar modelos de alteraciones y mineralización.
- Realizar un modelo económico a partir del modelo geológico para obtener las reservas presentes en la mina y verificar si se tiene un volumen lo suficientemente alto para verificar si es económicamente factible la explotación en las zonas con leyes bajas (1-5 g/T).
- Crear planes de exploración y explotación en zonas con leyes mayores a 5 g/T que permitan tener un mejor manejo de la producción de la mina y a su vez reducir los costos de este.
- Tomar datos de muestreo en las vetas de Agua Dulce y Soroche que permitan realizar el modelado de leyes y obtener un catálogo de los recursos.
- Utilizar programas geoestadísticos más sofisticados y determinar si existe alguna tendencia en los datos de muestreo.
- Realizar estudios similares en las minas del subdistrito minero Zaruma-Portovelo y reducir pérdidas económicas para los mineros artesanales y pequeños mineros.

BIBLIOGRAFÍA

- Albuja, J. (2017). *CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y CÁLCULO DE RESERVAS DE LA VETA JANE, EN LA MINA "GOLDEN COMUNITARIA" DE LA PARROQUIA HUERTAS, CANTÓN ZARUMA*. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
- Alfaro, M. (2007). Estimación de Recursos Mineros. *Doctor*.
- Asad, M. W. A. (2007). Optimum cut-off grade policy for open pit mining operations through net present value algorithm considering metal price and cost escalation. *Engineering Computations*, 24(7), 723–736. <https://doi.org/10.1108/02644400710817961>
- Billingsley, P. (1926). Geology of the Zaruma Gold district of Ecuador. *American Institute of Mining and Metallurgical Engineering*, 74, 255–275.
- Bonilla, W. R. (2009). *Metalogenia del distrito minero Zaruma-Portovelo, República del Ecuador*. 219.
- Bustillo, M., & López, C. (1997). *Manual de (Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras* (p. 36).
- Desarrollo, P. D. E., & Territorial, Y. O. (2019). *Gobierno autonomo descentralizado municipal de Portovelo*.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. In *Editorial Pearson Education, Madrid*.
- Hentschel, T., Priester, M., & Hruschka, F. (2002). Global Report on Artisanal & Small-Scale Mining. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 70, 67.
- I.T.G.E. (1988). Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión. In *Instituto Tecnológico GeoMinero de España*.
- IAMOGOLD. (2003). *Proyecto Retazos*.
- Kaufmann, O., & Martin, T. (2008). 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. *Computers and Geosciences*, 34(3), 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.005>
- Machuca, D. (2004). *Uso de Tecnicas de modelado tridimensional y geoestadística en Cia Minera Atacocha*.
- Mallet, J. L. (2002). *Geomodeling (Applied Geostatistics Series)*. Oxford University Press.
- McKelvey, V. E. (1972). Mineral Resource Estimates and Public Policy: Better methods for estimating the magnitude of potential mineral resources are needed to provide the knowledge that should guide the design of many key public policies. *American Scientist*, 60, 32–40.
- McKelvey, V. E. (1986). *Subsea Mineral Resources* (p. 106). U.S.GEOLOGICALSURVEY BULLETIN 1689- A DEPARS.
- Ministerio de Minería del Ecuador. (2016). *Plan nacional de desarrollo del sector minero*. 1–308.
- Moraes, V. M. V. de, Rodrigues, R., Sandoval, L., Hernández, J., Hernández, Nelson,

- Diaz, & Moreno, J. O. (2009). Modelamiento geológico digital aplicado a una minería de hierro a cielo abierto. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, 9(2), 5–8.
- ORTIZ, J. M., & EMERY, X. (2004). Categorización de recursos y reservas mineras. *1 St International Conference on Mining Innovation MININ, January 2004*, 198–208.
- Oscullo, I. (2019). *Proyecto Minero Mina Agua Dulce y Cascada*.
- PRODEMINCA. (2000). *Depósitos porfídicos y epi-mesotermales relacionados con intrusiones de las Cordilleras Occidental y Real: Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador*. UCP PRODEMINCA.
- Ruiz Yhonny. (2011). *Aplicacion De Software Libre Para La Estimacion De Recursos Y Para La Evaluacion Tecnica*. 1–110.
- Sandoval, F. (2001). La pequeña minería en el Ecuador. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 75. <https://doi.org/10.1039/b203596k>
- SNGR, U. / P. /. (2012). *Perfil Territorial De Zaruma*. 11.
- Sophia, F. (2003). *THE SOCIO-ECONOMIC IMPACTS OF ARTISANAL AND SMALL-SCALE MINING IN DEVELOPING* (GAVIN M.HILSON (ed.)). A.A.BALKEMA PUBLISHERS/LISSE/ABINGDON/EXTON.
- Spencer, R. M., Montenegro, J. L., Gaibor, A., Perez, E. P., Mantilla, G., Viera, F., & Spencer, C. E. (2002). The Portovelo-Zaruma mining camp, southwest Ecuador; porphyry and epithermal environments. *SEG Newsletter*, 49(1), 8–14.
- U.S. Bureau of Mines, & U.S. Geological Survey. (1980). *Principles of a Resource/Reserve Classification For Minerals. Geological Survey Circular 831 (revision of the classification systems published as U.S. Geological Survey Bulletin 1450–A)*. 12.
- Van Thournout, F., Salemink, J., Valenzuela, G., Merlyn, M., Boven, A., & Muchez, P. (1996). Portovelo: A volcanic-hosted epithermal vein-system in Ecuador, South America. *Mineralium Deposita*, 31(4), 269–276. <https://doi.org/10.1007/BF02280791>
- Wang, G., & Huang, L. (2012). 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China. *Geoscience Frontiers*, 3(4), 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.12.012>

APÉNDICES

Índice de apéndices

Apéndice A: Trabajos actuales en la mina Agua Dulce

Figura 1: Cajón con material mineralizado

Figura 2: Muestra de pirita

Figura 3: Frente de trabajo

Figura 4: Barrenación en el macizo rocoso

Apéndice B: Planos

Plano 1: Galerías en el nivel principal (H) de la mina Agua Dulce.

Plano 2: Principales vetas mapeadas en el área de estudio.

Plano 3: Perfil de Veta Soroche

Plano 4: Perfil de Veta Cantabria

1. APÉNDICE A: Trabajos actuales en la mina Agua Dulce

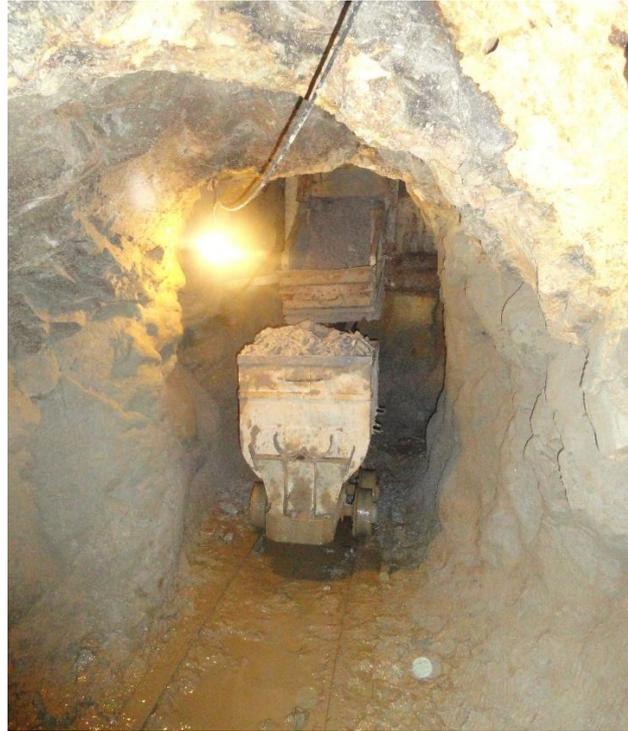


Figura 1: Cajón con material mineralizado



Figura 3: Muestra de pirita



Figura 3: Frente de trabajo

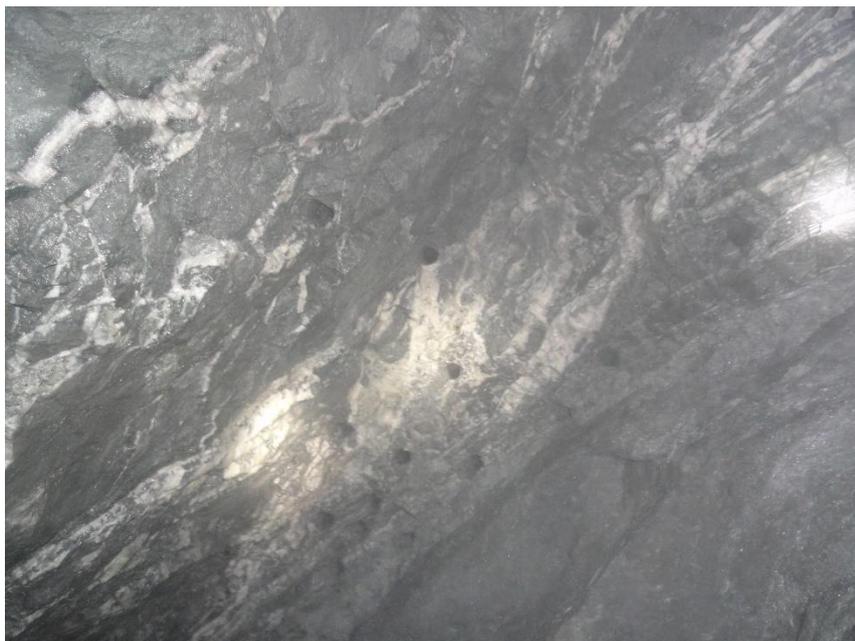
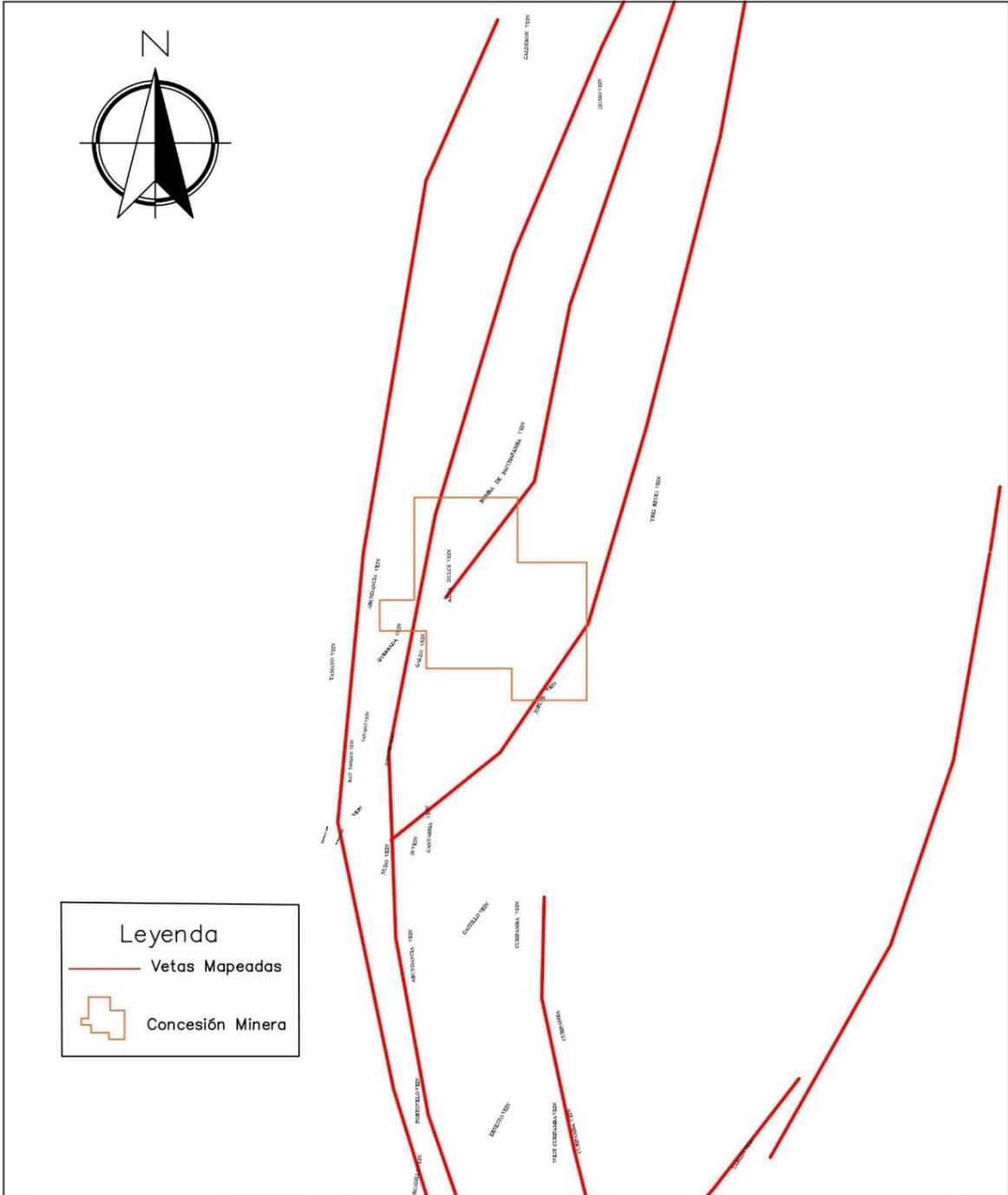
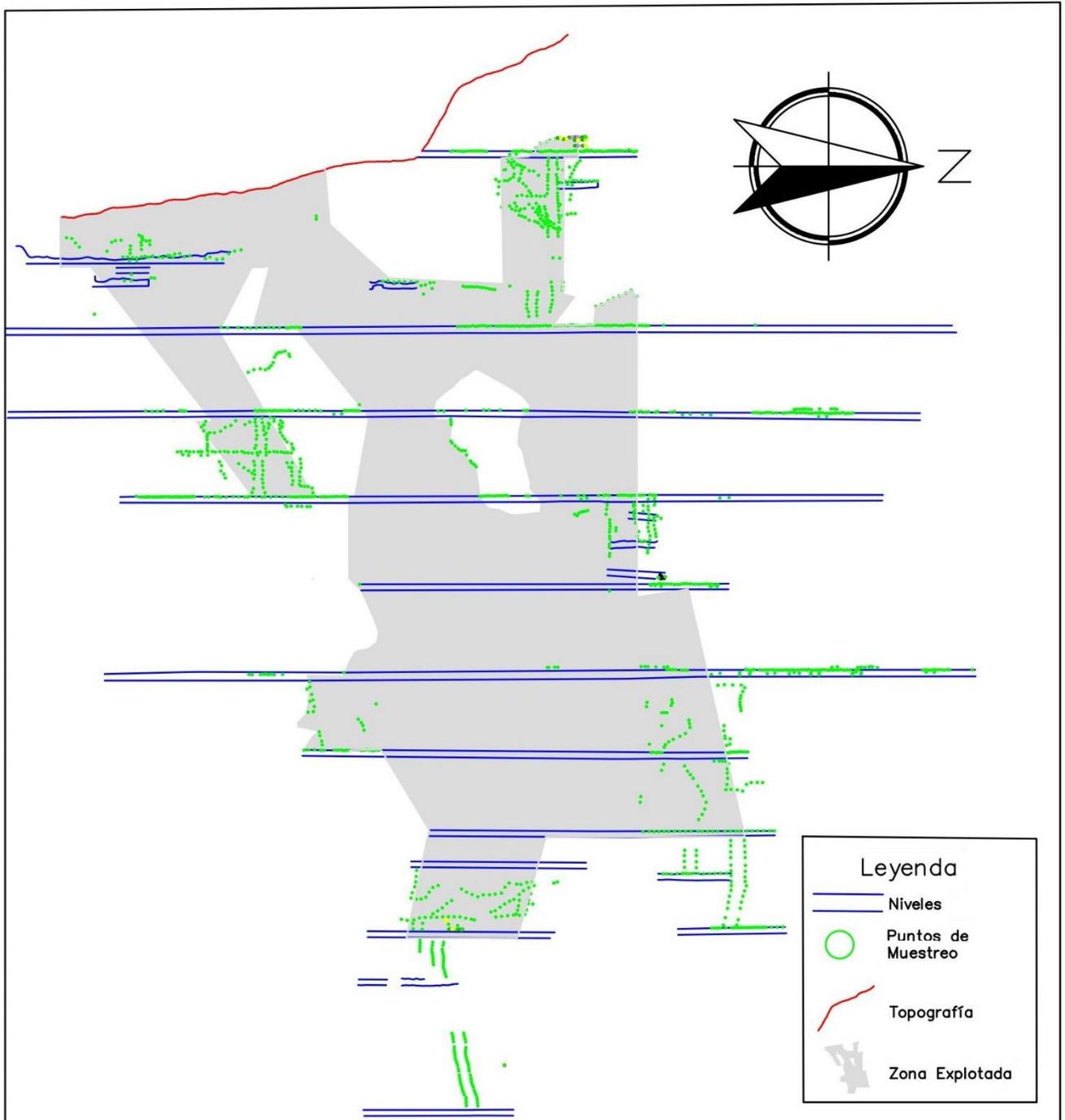


Figura 4: Barrenación en el macizo rocoso



	plano N°	plano:	proyecto:		
	2	Vetas Mapeadas	Trabajo de Titulación		
		Autor:	escala:	acotaciones	fecha:
		Juan Pacheco P.	1:10000	mts.	28/09/2020

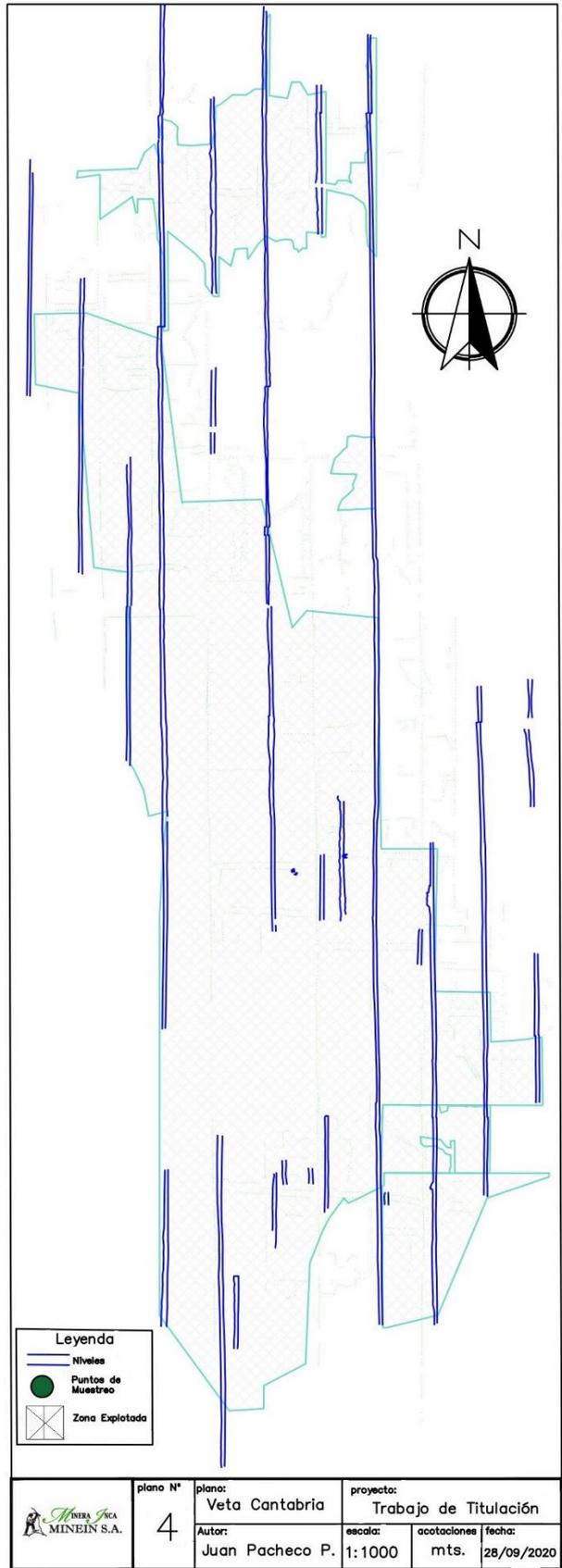
Plano 2: Principales vetas mapeadas en el área de estudio



Leyenda	
	Niveles
	Puntos de Muestreo
	Topografía
	Zona Explotada

	plano N°	plano:	proyecto:		
	3	Veta Soroche	Trabajo de Titulación		
		Autor:	escala:	acotaciones	fecha:
		Juan Pacheco P.	1:1000	mts.	28/09/2020

Plano 3: Perfil de Veta Soroche



Plano 4: Perfil de Veta Cantabria