



Universidad de Costa Rica
Facultad de Ciencias
Escuela Centroamericana de Geología

Optimización del proceso de explotación de
recursos para canteras de calizas y agregados,
en clientes de la empresa Explotec.

Práctica dirigida para optar por el grado de Licenciatura en Geología

Gerardo Calero Valverde

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Julio 2018

Práctica Dirigida aceptada por el tribunal examinador como requisito para optar por el grado académico de licenciatura en geología.



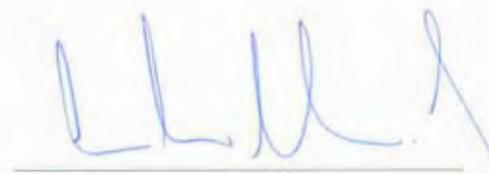
Dr. Oscar Lücke Castro
Director



Dr. Germán Vidaurre Fallas
Presidente del Tribunal



Dr. Maximiliano Garnier Villareal
Lector



Lic. Carlos Alarcón Álvarez
Lector



M.Sc Mario Arias Salguero
Miembro del Tribunal



Gerardo Antonio Calero Valverde
Ponente

Derechos de Propiedad Intelectual

Yo Gerardo Antonio Calero Valverde, cédula 1-1559-0437, conocedor de las sanciones legales con las que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

Declaro bajo la fe de juramento lo siguiente: soy estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, y como requisito debo defender públicamente mi práctica dirigida para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología la cual versa sobre el tema: Optimización del proceso de explotación de recursos para canteras de calizas y agregados, en clientes de la empresa Explotec. Por lo que manifiesto que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad de Costa Rica.

Además, declaro solemnemente que dicha práctica dirigida es fruto de mi trabajo, esfuerzo e investigación en su totalidad, que en ellas no han participado personas ajenas a mi Director, Co-Director y Lector, instituciones ni organizaciones extrañas y que los documentos utilizados están respectivamente citados. ES TODO



Geol. Gerardo Calero Valverde

Julio 2018

San Pedro, Montes de Oca, San José, Costa Rica

A mi mamá,

la que ha sido mi apoyo y mi motivación en los momentos más exigentes.

Agradecimientos

Agradecer principalmente a Dios, mi madre, mi novia y mi familia, quienes han sido el apoyo y soporte principal a lo largo de este proceso académico y especialmente durante mi vida.

Agradecer a mi comité asesor por toda la ayuda, tiempo y dedicación brindados a lo largo de este proceso, en especial al Profesor Oscar Lücke Castro y al Lic. Carlos Alarcón Álvarez, quienes dieron incluso tiempo personal para acompañar y apoyar, giras y mediciones de campo.

A todo el personal de la empresa Explotec S.A., especialmente a su gerente general, el Sr. Daniel Cruz Porras y al mismo Lic. Carlos Alarcón Álvarez, gerente técnico de la empresa, por brindarme la oportunidad, apoyo y facilidades para realizar este proyecto, así como de permitirme enriquecer mis conocimientos al lado de personas con un gran conocimiento profesional y técnico.

De igual manera agradecer a las administraciones de los dos casos de estudios por facilitar el trabajo en sus áreas de concesión.

A todos mis compañeros, colegas y amigos que me ayudaron en giras de campo y que de una u otra manera estuvieron apoyando este proyecto desde el inicio.

A todos, mis más sincero agradecimiento y gratitud.

Contenido

Introducción	2
Antecedentes	3
Marco Teórico.....	4
Casos de Estudio	9
1. Estudios Geológicos	11
1.1 Tajo Las Cóncavas.....	11
Geología Regional	11
Geología local.....	12
Asociaciones Mineralógicas.....	15
Geología Estructural	17
Geomorfología.....	18
1.2 Tajo San Buena.....	20
Geología Regional	20
Geología local.....	20
Geoquímica del Macizo	22
Geología Estructural	22
Geomorfología.....	25
2. Estudio Geoquímico	26
Metodología	26
Resultados.....	28
3. Estudios Geofísicos: Sísmica de Refracción y Tomografía Sísmica de Refracción.	32
Metodología	32
3.1 Tajo Las Cóncavas.....	36
Consideraciones Técnicas	36
Resultados	38
3.2 Tajo San Buena.....	46
Consideraciones Técnicas	46
Resultados	48
4. Integración y discusión de resultados por caso	55
4.1 Tajo Las Cóncavas.....	55
4.2 Tajo San Buena.....	64

5. .Estudios de Diseño de Cantera y Cálculo de Reservas	71
5.1 Tajo Las Cóncavas.....	72
Diseño de Cantera.....	72
Cálculo de reservas	75
5.2 Tajo San Buena.....	80
Diseño de Cantera.....	80
Cálculo de reservas	84
5. Consideraciones para la explotación y extracción óptima	89
Metodología de extracción por explosivos	89
6.1 Tajo Las Cóncavas.....	93
Elementos a considerar para la Extracción.....	94
6.2 Tajo San Buena.....	97
Elementos a considerar para la Extracción.....	98
Delimitación de bermas y frentes de explotación.....	99
6. Consideraciones y Conclusiones Finales	100
7. Apéndices.....	105
Apéndice 1: Análisis Petrográfico Semi-Cuantitativo.....	105
Apéndice 2: Gráficos Tiempo-Distancia Tajo Cóncavas.....	113
Apéndice 3: Gráficos Tiempo-Distancia Tajo San Buena	117
Referencias Bibliográficas	120

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama sobre la resolución del problema inverso, en la geofísica. Modificado de Wathelet, (2005)	4
Figura.2 Diagrama de flujo, del procedimiento básico para un método de inversión. Tomado y modificado de Lo & Inderwiesen (1994)	5
Figura.3 Mapa de ubicación del Tajo las Cónavas, primer caso de estudio	9
Figura.4 Mapa de ubicación del Tajo San Buena, segundo caso de estudio.	10

Apartado 1

Figura 1.1.1 Muestras los tipos predominantes de roca, encontrados en el frente de explotación, la imagen de la izquierda corresponde con una muestra del flujo inferior y la imagen de la derecha corresponde con una muestra del flujo superior.	12
Figura 1.1.2 Afloramiento tipo del flujo superior	13
Figura 1.1.3 En la foto se observa el diaclasamiento que genera columnas en la roca, y corresponde con los afloramientos típicos del flujo inferior	14
Figura 1.1.4 Muestra encerrado en una línea punteada roja, la zona de alteración hidrotermal en donde la roca muestra un color gris claro a verdoso y una textura granular, sobre esta zona se observa roca andesita sin alterar dispuesta de manera columnar.	14
Figura 1.1.5 Se observa la paragénesis de minerales de zeolita y calcita, presente en las rocas del macizo	15
Figura 1.1.6 Muestra adherencias de calcosina en una roca del macizo, además de algunos sulfuros	16
Figura 1.1.7 Se observan las muestras de malaquita adheridas a las rocas del tajo, junto con calcita	16
Figura 1.1.8 Muestra la diferencia entre una roca sana y una alterada	16
Figura 1.1. 9 Muestra las estrías de falla en el plano, mostrando un movimiento relativo dextral	17
Figura 1.1.10 Muestra los rumbos preferenciales en donde se orientan las familias principales identificadas a lo largo del tajo. Se grafican 13 planos.	18
Figura 1.1.11 Muestra el mapa de pendientes para la zona de concesión y las zonas aledañas al a misma. Se evidencia una topografía suave y regular en las zonas aledañas	19
Figura 1.2.1 Muestra en azul las zonas identificadas como caliza y en rojo, las zonas con materiales sedimentarios, según (Flores, Denyer, & Aguilar, 2003), las líneas negras marcan las zonas donde identifican fallas inversas en la zona.	20
Figura 1.2.2 Muestra sistemas de cavernas y agrietamiento en el macizo	21
Figura 1.2.3 Sistemas de cavernas encontrados en el macizo	22
Figura 1.2.4 Red estereográfica, donde se muestran las orientaciones principales del macizo. Se grafican 12 datos.	23
Figura 1.2.5 Muestra uno de los principales planos de falla encontrados en el macizo, el mismo presenta evidencias de componentes inversos y de desplazamiento de rumbo con movimiento relativo sinestral.	24
Figura 1.2.6 Mapa de pendientes del área de concesión, donde se evidencia las diferencias de topografía en las zonas aledañas al cerro.	25

Apartado 2

Figura 2.1 Muestra la perforación de un hoyo utilizando una perforadora TH, Top Hammer o martillo de cabeza.	26
Figura 2.2 Muestra la ubicación de las muestras recogidas en una parte del cerro en estudio.	27

Figura 2.3 Mapa de concentración de óxido de calcio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras _____	29
Figura 2.4 Mapa de concentración de óxido de silicio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras _____	29
Figura 2.5 Mapa de concentración de óxido de hierro (II), en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras _____	30
Figura 2.6 Mapa de concentración de óxido de aluminio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras _____	30
Figura 2.7 Mapa de concentración de óxido de potasio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras. _____	31
Figura 2.8 Mapa de concentración de óxido de sodio, en las muestras que registraron concentraciones de sodio. _____	31

Apartado 3

Figura 3.1 Se observa la preparación en campo para la aplicación de las metodologías sísmicas. _____	32
Figura 3.2 Muestra el proceso de perforación realizado para el uso de explosivos como fuente generadora. _	33
Figura 3.3 Muestra el proceso de identificación de los arribos de onda P a los geófonos (<i>picking</i>) _____	34
Figura 3.4 Muestra el modelo teórico creado, con sus respectivas dromocronas en la parte superior y de color negro, contrapuestas con la información recogida en el campo, la cual se muestra en color. _____	35
Figura 3.5 Muestra las zonas donde se realizaron tendidos sísmicos, dentro del área de concesión _____	36
Figura 3.6 Muestra la cara de la berma que fue prospectada como verificación de lo observado en los resultados de la sísmica además de identificar las velocidades promedio para cada material. _____	37
Figura 3.7 Muestra el arreglo utilizado en la mayoría de los tendidos sísmicos realizados en este estudio. _	38
Figura 3.8 Muestra el perfil de velocidades resultantes de aplicar la metodología RFS _____	38
Figura 3.9 Muestra el modelo sintético utilizado en la metodología de SRT, para el tendido 2. _____	39
Figura 3.10 Muestra el modelo resultante de velocidades, aplicando la metodología SRT, para el tendido 2. _____	40
Figura 3.11 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de aplicar la metodología de refracción sísmica. _____	41
Figura 3.12 Muestra el modelo teórico a utilizar en la metodología de SRT, basado en el resultado de la metodología de RFS _____	41
Figura 3.13 Muestra el perfil resultante luego de la metodología SRT, para el tendido 3 _____	42
Figura 3.14 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de aplicar la metodología SRF, para el tendido 4. _____	42
Figura 3.15 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 4. _____	43
Figura 3.16 Muestra el proceso de la resolución del problema directo, mediante el software técnico Zondst2D, para el tendido 1. _____	44
Figura 3.17 Muestra el modelo sintético resultante para el tendido 4. _____	45
Figura 3.18 Muestra el perfil resultante luego de aplicar la metodología SRT, para el tendido 1. _____	45
Figura 3.19 Muestra las zonas donde se realizaron tendidos sísmicos, dentro del área de concesión. _____	47
Figura 3.20 Muestra el arreglo utilizado en la mayoría de los tendidos sísmicos realizados en este estudio. _	48
Figura 3.21 Se muestra el perfil resultante de la aplicación de SRF, para el tendido 1 _____	49
Figura 3.22 Muestra el proceso de resolución del problema directo, para la confección del perfil sintético, el cual será usado en la metodología SRT. _____	49
Figura 3.23 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 1. _____	50
Figura 3.24 Muestra el perfil de velocidades luego de la aplicación de la metodología SRF. _____	51
Figura 3.25 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 3. _____	51
Figura 3.26 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de la aplicación de la metodología SRF, para el tendido 2. _____	52

Figura 3.27 Muestra el proceso de resolución del problema directo, para la generación de un set sintético, el cual será utilizado en la metodología SRT. _____	53
Figura 3.28 Muestra el modelo sintético que se utilizará en la metodología SRT, basado en la resolución del problema directo. _____	54
Figura 3.29 Muestra el perfil resultante de la metodología SRT, para el tendido 2. _____	54

Apartado 4

Figura 4.1 Muestra la falla dextral y las zonas con alteración hidrotermal cercanas a la misma. _____	56
Figura 4.2 Muestra el mapa geológico elaborado para la Cantera Las Cóncavas _____	57
Figura 4.3 Muestra la ubicación de los tendidos sísmicos en el área de concesión de la cantera Las Cóncavas. _____	58
Figura 4.4 Muestra la relación entre los valores obtenidos en el perfil de velocidades y la roca aflorante, para el tendido 3. _____	59
Figura 4.5 Muestra la interpretación litológica para el tendido 1. _____	60
Figura 4.6 Muestra el perfil litológico interpretado para la sección del tendido 2. _____	61
Figura 4.7 Muestra fotos del área en donde se realizó el tendido 2, evidenciando el contraste que se observaba en el perfil litológico interpretado. _____	62
Figura 4.8 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 3. _____	62
Figura 4.9 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 4. _____	63
Figura 4.10 Presenta el mapa geológico propuesto para el cerro en estudio. _____	64
Figura 4.11 Muestra la comparación entre los mapas de concentración de sílice y calcio _____	65
Figura 4.12 Muestra el mapa de zonificación de los frentes de explotación propuesto, según las concentraciones máximas de SiO ₂ y CaO. _____	66
Figura 4.13 Muestra el mapa de ubicación para los tendidos sísmicos realizados en el Tajo San Buena _____	67
Figura 4.14 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 1. _____	68
Figura 4.15 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 2. _____	69
Figura 4.16 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 3. _____	70

Apartado 5

Figura 5.1 Diseño final del Tajo Las Cóncavas, tomando en cuenta sus elementos intrínsecos y extrínsecos. _____	74
Figura 5.2 Muestra varias vistas del diseño final de la cantera, superpuesto por la topografía actual de la cantera. _____	75
Figura 5.3 Muestra los perfiles (líneas verticales blancas, orientadas N-S) que se realizaron para el cálculo de reservas mediante el método de los perfiles. La imagen muestra en una vista de planta la superficie tope y base del Tajo Las Cóncavas. _____	76
Figura 5.4 Muestra las secciones utilizadas por el programa, para el cálculo de las reservas por medio de la metodología de los perfiles transversales. La línea blanca corresponde con la superficie tope y la línea amarilla corresponde con la superficie base. _____	76
Figura 5.5 Muestra el modelo de bloques para el área de concesión del tajo las cóncavas, en total engloba 11 484 bloques de 2 metros de arista. _____	77
Figura 5.6 Muestra el diseño final de cálculo de reservas con sus respectivos materiales identificados y zonificados. _____	78
Figura 5.7 Muestra el modelo de bloques, con la información ingresada y diferenciada por colores. _____	78
Figura 5.8 Muestra los bloques correspondientes con la zona en donde el modelo ubica áreas potenciales de alteración química. _____	79

Figura 5.9 Muestra el macizo restante y el cual se considera material aprovechable. En esta imagen se eliminó, las zonas de alteración, el suelo y las zonas de patio y taludes finales. _____	79
Figura 5.10 Muestra el diseño de cantera propuesto, en la imagen superior se tiene el diseño con las curvas de nivel, mientras que en la imagen inferior se observa como un sólido. _____	83
Figura 5.11 Muestra los perfiles (líneas verticales blancas, orientadas N-S) utilizados para la realización del cálculo de reservas. _____	84
Figura 5.12 Muestra las secciones utilizadas por el programa, para el caculo de las reservas por medio de la metodología de los perfiles trasversales. _____	85
Figura 5.13 Muestra un reporte de los resultados matemáticos realizados por el programa para realizar el cálculo de las reservas mediante la metodología de los perfiles. _____	85
Figura 5.14 Muestra el modelo de bloques calculado para el Tajo San Buena _____	86
Figura 5.15 Muestra diferentes vistas para el diseño de cantera propuesto para el Tajo San Buena _____	88

Apartado 6

Figura 6.1 Saco de ANFO _____	90
Figura 6.2 Presentación del explosivo tipo gel o emulsión. _____	90
Figura 6.3 Detonador Dual-Delay, de 25 milisegundos (ms) en superficie y 500 ms en profundidad. _____	91
Figura 6.4 Detonador In Hole Delay. _____	91
Figura 6.5 Detonador Quick Delay. _____	92
Figura 6.6 Detonador eléctrico. _____	92
Figura 6.7 Muestra la aplicación de la metodología “Decks” _____	93
Figura 6.8 Muestra el modelo presentado, sobre el cual se propone realiza la extracción mediante explosivos _____	92
Figura 6.9 Muestra un ejemplo de cuadrante donde se modela roca competente para la producción de agregados. _____	94
Figura 6.10 Muestra las cotas a las que se plantea la conformación de las bermas de producción. _____	96
Figura 6.11 Muestra el diseño de cantera propuesto para el cerro a explotar en el Tajo San Buena. _____	97
Figura 6.12 Muestra las cotas a las que se propone conformar las bermas de producción en el cerro a explotar dentro del Tajo San Buena. _____	99

Resumen

Se implementaron metodologías necesarias para solucionar problemas operacionales en los procesos de extracción en dos casos de estudio, la Cantera Don Luis y el Tajo San Buena. El primero de estos extrae roca andesita y presentan una variación litología en el macizo, presentando “diferentes tipos” de roca, dispuestas irregularmente a lo largo del macizo, generando problemas a la hora de la extracción, y a la hora de la realización de procesos de voladura; por otro lado, el Tajo San Buena, extrae roca caliza y desean extraer material de un cerro, el cual no ha sido intervenido, por lo que no tiene datos base para realizar una adecuada extracción y planificación minera. Para abordar estos problemas y generar los datos necesarios para buscar una solución, además de proponer recomendaciones técnicas con el fin de optimizar los procesos de explotación, se plantearon realizar los siguientes estudios: análisis geológico, el cual busca recopilar información base sobre aspectos litológicos, estructurales, mineralógicos y morfológicos, que ayuden a conformar un modelo geológico base; también se realizaron análisis geofísicos, aplicando las metodologías de sísmica de refracción, y tomografía sísmica de refracción, cuya aplicación busca modelar y zonificar anomalías geológicas identificadas inicialmente en el modelo geológico propuesto, tratando de comprobar o corregir dicho modelo. Se utilizaron explosivos como fuente generadora de ondas. Adicionalmente, se realizó un estudio geoquímico en las calizas extraídas en el Tajo San Buena, con el fin de delimitar las zonas con las mayores concentraciones químicas. Una vez integrada y analizada la información generada, se realizó un diseño de explotación de cantera, para cada caso de estudio. Con el diseño de explotación establecido se procede a realizar un cálculo diferenciado de las reservas, en donde se discretiza los tipos y porcentajes de material presente en el macizo, generando un modelo de bloques, en donde se observe la ubicación y disposición de las zonas de mayor interés. Teniendo un modelo de bloques conformado, se realizan recomendaciones para la implementación de la metodología de extracción por medio del uso de explosivos, donde se describe brevemente el proceso y los elementos a considerar, se recomiendan mallas de perforación, los diferentes explosivos industriales necesarios, para finalmente exponer e identificar las variables que se deben de cumplir para asegurar la optimización de los procesos de extracción en ambos casos. Para el caso del Tajo Las Cóncavas, se concluye que la formación geológica presenta alteraciones químicas, lo que genera roca poco competente y esto genera problemas operacionales. Dicho material corresponde con el 18% del material aprovechable en el tajo, mientras que el 55% es material cumple las características para ser procesado. Mediante el modelo de bloques se zonifica estas áreas mineralizadas y se recomienda utilizar mallas de perforación de 2,8 m de espaciamiento 2,8 m de burden en zonas competentes, para optimizar la extracción de recursos. El Tajo San Buena presenta zonas altamente fracturadas y posible formación de cavernas, químicamente se identifican las zonas de mayor concentración de CaO, se delimitan 3 frentes de explotación en un área del 30% del cerro y se concluye que la optimización en la extracción se logra con mallas de perforación de 4 m de espaciamiento por 3,5 m de burden.

Objetivo Principal

- Realizar un cálculo aproximado de las reservas de material aprovechable presente en parte de las áreas concesionadas de una cantera, integrando los métodos de sísmica de refracción, tomografía sísmica de refracción y fluorescencia de rayos x.

Objetivos Específicos

- Determinar los porcentajes aproximados, de tipos y calidades del material presente en las canteras.
- Comparar los resultados de la aplicación de los métodos geofísicos de sísmica de refracción y tomografía sísmica de refracción (SRT), con el fin de determinar la metodología más adecuada para continuar aplicando en cada zona a estudiar.
- Incorporar el análisis geoquímico de los elementos mayores: Ca, Si, K, Na, Al y Fe, por medio de la metodología de fluorescencia de rayos x, con el fin de determinar la calidad química de la roca, para usos industriales, en el caso de rocas calcáreas.
- Generar una propuesta para el diseño de explotación en la cantera, en función del tipo y calidad de la roca, donde se incluya posibles mallas de perforación y estimación de los productos (explosivos, tubos de choque, mechas, detonadores y equipo de perforación) a utilizar con el fin de optimizar la obtención del material deseado.

Introducción

Los procesos que se realizan en una actividad minera responsable, son complejos y diversos y abarcan gran cantidad de áreas del conocimiento académico. Dentro de dichos procesos existen algunos, como los de acarreo, como los procesos de producción, procesos de comercialización y despacho, procesos administrativos y en este trabajo se pretende abordar específicamente los procesos de extracción en un proyecto minero, estos últimos abarcando consideraciones técnicas y de capacidad instalada esencialmente.

El presente trabajo final de graduación tiene como principal objetivo realizar un cálculo de las reservas de material aprovechable, que se encuentran presentes en parte de las áreas concesionadas de una cantera, integrando datos de los materiales presentes en las concesiones, generando un modelo geológico con porcentajes y zonificación de tipos de materiales, que faciliten y optimicen los procesos de explotación de los mismos; para esto se implementarán e incorporarán resultados de los métodos de sísmica de refracción, tomografía sísmica de refracción y fluorescencia de rayos x. La aplicación de estas metodologías ayudará a optimizar el proceso de explotación por el cual los desarrolladores obtienen dichos recursos, precisándoles las zonas de mayor aprovechamiento o de mayor pureza química, en función de los productos que ofrezcan al mercado. Con la aplicación de la metodología de Refracción Sísmica y Tomografía de Refracción Sísmica (SRT), se pretende modelar la distribución, calidad y geometría de los materiales en el subsuelo de las canteras, mientras que los análisis geoquímicos vienen a caracterizar la química de los materiales calcáreos con el fin de determinar sus posibles usos en la industria.

El proyecto se desarrolló en 2 casos de estudio, los cuales presentan diferentes características geológicas. El tajo Cónovas, ubicado en Dulce Nombre de Cartago, corresponde con un tajo donde se extrae roca ígnea para la elaboración de agregados para la construcción; el segundo caso de estudio es el Tajo San Buena, ubicado en Colorado de Abangares, donde se explota un macizo de roca caliza, produciendo agregados para construcciones civiles, además de vender materia prima para diferentes industrias, como la cementera, la vidriera, la industria de pigmentos y pinturas, además de la industria agrícola, de ahí la importancia de conocer las características químicas de la roca.

Con el cumplimiento de los objetivos del proyecto, se espera obtener un estudio base para realizar los procesos de explotación minera de manera más precisa, óptima y ordenada, ahorrando tiempo y dinero, así como también generando un escenario propicio para la certera planificación del proceso de voladura.

Se espera que con la implementación de los anteriores objetivos se sienta un precedente en el uso e integración del método de tomografía sísmica de refracción, estudios químicos y diseño de canteras, aplicado a la minería no metálica y metálica en Costa Rica. El alcance que puede llegar a tener dentro del medio minero sería importante, generando concientización de la aplicación de metodologías más técnicas y precisas, realizadas por un profesional en geología.

Antecedentes

La extracción minera en el país ha ido creciendo de la mano del desarrollo económico, acompañando y dotando de insumos básicos al creciente desarrollo de obras civiles en los últimos años. A medida que los proyectos constructivos aumentan, es normal que la necesidad de recursos aumente también, y con esto la exigencia de mejores y más accesibles productos para saciar dicha demanda. Esto plantea un reto para todos los involucrados en la actividad minera del país, tanto instituciones del estado como desarrolladores, en donde la optimización de los recursos, la fiscalización y el desarrollo sostenible de la actividad, será vital para cumplir con las posibles exigencias que se avecinan. Bajo esta visión, todos los involucrados deben de generar cambio en las líneas de acción que les compete, sea fiscalización, mejoramiento y revisión de marcos legales, facilidad de trámites, entre otros, y en el caso de los desarrolladores y de los profesionales detrás del manejo de concesiones, mayor preocupación por un adecuado manejo, gestión y fiscalización de los recursos que se les han otorgado bajo su cargo. Bajo este último punto, es que el presente trabajo final de graduación nace, buscando una manera de generar propuestas para integrar una serie de estudios básicos, necesarios para un adecuado manejo de la actividad minera, que finalmente desembocaran en un mejor y más responsable uso de recursos, beneficiando no solo al desarrollador, sino a la industria en general.

Entre estos estudios se incluye la metodología de refracción sísmica la cual ha sido una de las metodologías utilizadas ampliamente en la minería a nivel internacional, como un estudio base para prospectar y zonificar materiales económicamente explotables, y que se encuentran a profundidades inaccesibles sin metodologías de perforación, por lo que se ha vuelto una herramienta indispensable para la planificación y desarrollo de las empresas mineras. En Costa Rica la refracción sísmica ha sido utilizada por empresas privadas para la prospección del subsuelo somero, principalmente para obras civiles. La investigación también ha utilizado esta metodología, para la prospección del subsuelo, en combinación con otras metodologías geofísicas.

Por otro lado, la tomografía sísmica de refracción ha sido ampliamente utilizada en algunos países como una herramienta indispensable para la caracterización somera precisa del subsuelo como en Azwin, Saad , & Nordiana (2013) y Bery (2013), en ámbitos como la ingeniería ejemplificado en Pérez, Mateo, & Maciá (2013), minería subterránea en Singer, Link , & Iverson (2009) y en la detección de cavernas para ambientes kársticos realizado por Sheehan , Doll, Watson, & Mandell, (2005). En el país no existe registro de la utilización de la tomografía de refracción sísmica, en ningún campo de la investigación minera ni geotécnica, por lo que se sentaría un precedente en la utilización de esta metodología aplicada para la exploración minera.

Finalmente, el uso y diseño de canteras es una práctica habitual y obligatoria en países con amplia tradición minera, siendo los planos de desarrollo de un tajo, y plasman el camino a seguir en un adecuado desarrollo minero. En el presente trabajo se trata este tema como uno de los más importantes ya que ordena los trabajos para el futuro y además brinda la base para realizar un adecuado cálculo de reservas.

Marco Teórico

La base del presente estudio se fundamenta en la prospección geofísica como insumo principal, para modelar las condiciones físicas del subsuelo, las cuales se pretenden correlacionar con materiales establecidos que serán calculados en volumen y competencia física, con el fin de establecer y zonificar los diferentes materiales presentes en el área de extracción de una concesión. Los métodos geofísicos utilizados en el presente estudio responden a un proceso básico en el análisis geofísico, y es la resolución del problema inverso, el cual es resuelto por medio de fenómenos observables, para la generación de soluciones que cumplan con las condiciones del medio en donde se están observando dichos fenómenos. Como lo muestra la figura 1, las variables físicas observadas en el campo, deben de ser resueltas con algoritmos que asemejen una realidad en donde los fenómenos observados se cumplan, a diferencia del problema directo en el cual se genera un escenario dado o modelo y se realizan pruebas y análisis para observar los resultados y generar conclusiones a partir de ellos.

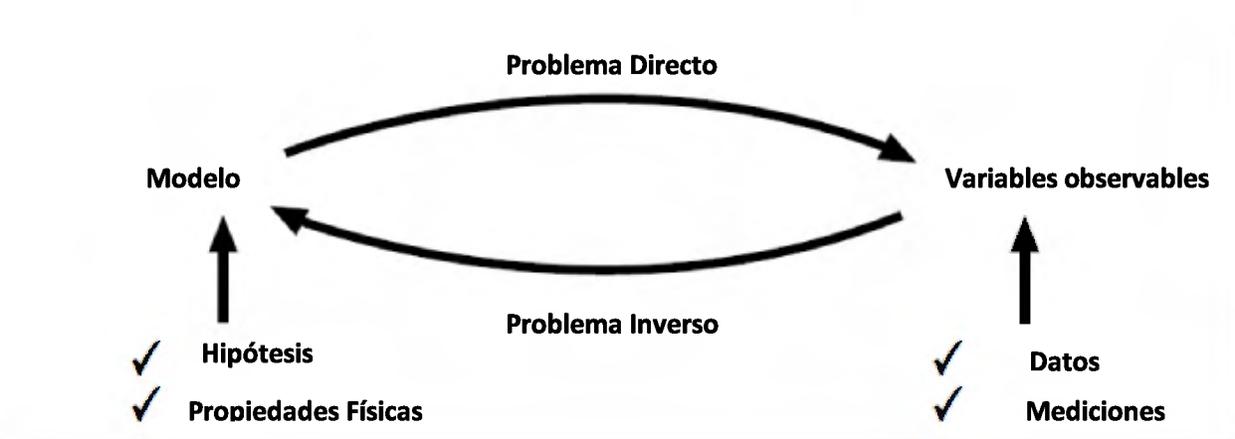


Figura 1. Diagrama sobre la resolución del problema inverso, en la geofísica. Modificado de Wathelet, (2005)

Para este proyecto se utiliza como uno de los insumos para el modelamiento geológico, el método geofísico de Tomografía sísmica de refracción (SRT). El método es conocido también como gradiente de velocidad o como tomografía de la velocidad de la onda subterránea. El método primero generaliza el subsuelo en un medio continuo donde los tiempos de llegada de las ondas no están necesariamente relacionados con un medio específico o con estructuras de altos contrastes de velocidad, en cambio se muestra el gradiente de velocidad con respecto a la profundidad del subsuelo de la zona. La SRT utiliza el método de iteración de simulación generalizada (*generalized simulated annealing*), el cual utiliza un algoritmo que realiza modelos repetitivamente, en donde los nuevos modelos están condicionalmente aceptados o rechazados basados en criterios de probabilidad. Este criterio permite al algoritmo no utilizar y manejar un único modelo, sino que realiza repetidos modelos, con el fin de alcanzar el mínimo error. El algoritmo no asume la orientación del gradiente de las velocidades del subsuelo, por lo que el método puede revelar estructuras verticales y de fuertes contrastes laterales (Azwin, Saad , & Nordiana, 2013). El método se fundamenta básicamente en una inversión matemática iterativa, en donde se utilizan los tiempos

de arribo de la onda P (compresional) para calcular los modelos del subsuelo. Para esto, se deben de tener dos sets de datos, un set teórico el cual es generado dependiendo de la geometría del arreglo de medición y de las condiciones esperadas o inferidas del subsuelo, he aquí la importancia en la implementación de este tipo de métodos por geólogos, en donde dicho profesional haya realizado estudios previos. El segundo set de datos son los datos reales, los cuales son generados en el campo con la preparación y equipo indicado Becerra Bayona (2008). En resumen, el proceso básico para un método de tomografía sísmica se muestra en la figura 2.

Los algoritmos de inversión, para generar un modelo aproximado que cumpla con los resultados observados, son bastos y su análisis implica ahondar en cálculos lineales y diferenciales, los cuales no son el objetivo de este estudio. En Becerra Bayona (2008) se realiza un estudio detallado de algunos de los algoritmos utilizados para la resolución del problema inverso en la tomografía de refracción sísmica.

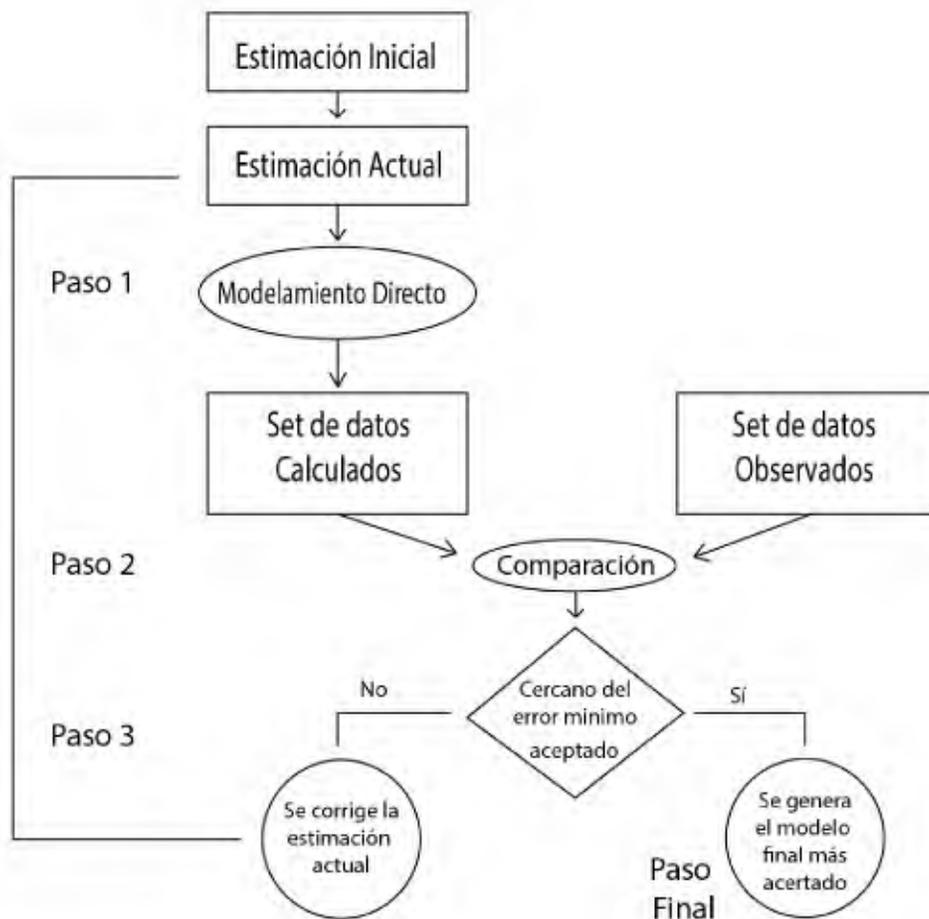


Figura.2 Diagrama de flujo, del procedimiento básico para un método de inversión. Tomado y modificado de Lo & Inderwiesen (1994)

El porcentaje de error o *misfit* de las inversiones tomográficas son consideradas por Palmer (2011), en donde identifica varias fuentes de generación de error para dichos procesos geofísicos.

Generalmente el error más grande es causado por la generación de un modelo teórico inicial erróneo, sobre el cual se compara el set de datos medidos en el campo. Otro factor que influye en el error, es la cantidad de iteraciones que se realicen entre los dos sets de modelos.

Para la generación de datos en el campo se debe de utilizar la metodología convencional de la toma de datos por refracción sísmica, la cual se especifica en la norma ASTM D5777 (ASTM, 2011) y que se explicará en el apartado de metodología. La refracción sísmica tiene como fundamento la refracción de los rayos, la cual está expresada en la ley de Snell, en donde se tienen superficies refractoras por donde los rayos se refractan y llegarán a un receptor dado, el tiempo que tarda en recorrer el medio, es registrado entre el geófono y la fuente generadora de ondas, ya que son accionadas al mismo tiempo.

Los estudios químicos de este estudio tienen como finalidad determinar la composición química de las rocas presentes en las canteras de caliza e intentar establecer un modelo en las distribuciones de su composición. El método a utilizar en este estudio para la determinación de la composición química de las rocas es la fluorescencia de rayos x o la Fluorescencia de rayos-X por dispersión en longitud de onda (WDFRX), dicho método consiste en la detección y la determinación de elementos químicos, por medio de la excitación y posterior radiación natural de cada elemento. La metodología consiste en irradiar un sistema en equilibrio, con un haz de luz o fuente que le aporte energía al átomo, esto provocará el escape de electrones a niveles superiores de energía, concluida esta primera etapa conocida como *Excitación*, el átomo trata de retomar su estado en equilibrio, por lo que los electrones vuelven a moverse, pero esta vez a niveles inferiores, con tal de rellenar los vacíos en las capas de valencia inferiores, este movimiento produce un desprendimiento de energía en forma de rayos x, a esta segunda etapa se le llama *Emisión*. Estos rayos x poseen una longitud de onda específica para cada elemento, por lo que dichas ondas son medidas e identificadas, con el fin de determinar la concentración de cada átomo en la muestra estudiada. (Beckhoff, Kanngieber, Langhoff, Wedell, & Wolff, 2007)

Con la modelación base de la competencia del macizo rocoso y sus materiales, además de su composición química, en el caso de cantera de caliza, se puede realizar una estimación de las reservas para un frente de extracción específico, incluyendo los aspectos generados en los estudios previos, como por ejemplo espesor de suelo, espesor de roca fracturada y profundidad, a la que se estima, se encuentra la roca sana. El cálculo de las reservas utilizables para una cantera se define como el cálculo aproximado de la parte económicamente explotable de un recurso mineral o de un material indicado, esto incluye la dilución o expansión de los materiales calculados cuando se extraiga el material (Ruiz Dioses, 2015). Definir el interés del material a calcular, estará en función de las necesidades y realidades del desarrollador. En el caso de la minería de agregados, en muchas ocasiones todo el yacimiento es utilizable, por lo que el cálculo se basa únicamente en consideraciones geométricas y en un diseño de cantera responsable.

Para realizar un adecuado cálculo de reservas, se debe de tener un diseño de explotación de la cantera, la cual incluye estudios de estabilidad de taludes, diseño de mina a futuro y especificación de factores como localizar escombreras y zonas de ordenamiento en la mina, tamaño de rampas y accesos, bermas de seguridad entre otros. Para la realización de los diseños de cantera se utilizarán las directrices técnicas y de seguridad dispuestas en el Reglamento General de Normas Básicas de

Seguridad Minera (RGNBSM) del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España (Ministerio de Energía, 1985) y el Reglamento de Seguridad Minera, Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería de Chile. (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2002)

En Ruiz Dioses (2015) se describen algunas de las metodologías utilizadas para realizar cálculo de reservas, estas se dividen en dos tipos: los geométricos y los geoestadísticos; entre los geométricos encontramos:

- Método de los perfiles
- Método de la triangulación
- Método de los polígonos
- Método de las matrices de bloques
- Método del inverso de la distancia
- Método de los contornos
- Método del reticulado

Mientras que en los métodos geoestadísticos se encuentran:

- Variable regionalizada
- Semivariograma
- Kriging

La utilización de alguna de las citadas metodologías, estará en función del arreglo geológico y geomorfológico de la zona, así como de la disposición del yacimiento a explotar. Para la minería metálica la precisión en la estimación del yacimiento y la calidad del mismo, para efectos económicos, es sumamente importante, por lo que métodos geoestadísticos, acompañados de gran recaudación de datos, son utilizados para este tipo de minería. Para la minería no metálica, la precisión del cálculo no es tan crítica, y normalmente se realiza con métodos geométricos, debido a que, en la mayoría de los casos, la totalidad del afloramiento es aprovechable y es algunos casos presenta una única litología.

El método de los perfiles, el cual es ampliamente utilizado, se usa cuando se tienen cuerpos mineralizados regulares y que han sido estudiados mediante sondeos distribuidos regularmente, de forma que permiten establecer cortes o perfiles en los que se basa el cálculo, en el caso de las canteras de agregado se toma todo el perfil como material aprovechable. El área de la sección del cuerpo mineralizado interceptada por cada perfil se puede calcular por varios métodos (planímetro, regla de Simpson, etc.). El volumen del bloque comprendido entre perfiles se puede obtener:

-Multiplicando el área de cada sección ($A\#$) por la mitad de la distancia al perfil contiguo a cada lado (cada perfil genera un bloque):

$$V = \left(A1 \frac{d1}{2} \right) + \left(A2 \frac{d2}{2} \right)$$

-Hallando el área media de dos perfiles consecutivos, y multiplicando esta por la distancia entre dichos perfiles. En este caso, los volúmenes de los extremos se calculan:

$$V = \left(\frac{A2 d1}{2} \right)$$

- O aplicando la Fórmula prismoidal: donde se toman tres secciones para calcular el volumen comprendido entre los dos extremos, dándole mayor peso al del centro

$$V = (A1 + 4A2 + A3) \left(\frac{d1+d2}{2} \right).$$

Este proceso se repetiría para A4, A5 y A6 y así sucesivamente, siendo necesaria una corrección para los extremos como en el caso anterior.

Una vez calculados los volúmenes de cada bloque, utilizando cualquiera de las metodologías anteriores, se hallan las densidades aparentes medias y las leyes medias (considerando todos los valores obtenidos en los sondeos de cada bloque) para poder calcular el tonelaje de mineralización de cada bloque, siendo el tonelaje total de metal en el yacimiento, la suma de los tonelajes parciales (Gocht, Zantop, & Eggert , 1988), esto en el caso de minería metálica, en el caso de la minería no metálica, se puede trabajar con la cantidad de metros cúbicos que genera los cálculos.

Finalmente, se les agregan a los tonelajes de material calculado los porcentajes de tipo y calidades de roca, obtenido en los estudios previos, para finalmente generar un producto completo que incluya el diseño final de la cantera y la cantidad de material aprovechable de la misma.

Otra de las técnicas a utilizar, es la metodología de los bloques, la cual es utilizada más ampliamente en la minería metálica, donde se utiliza para modelar las leyes encontradas en la cantera. Esta metodología realiza una malla regular de bloques de tamaño definido, y rellena el sólido comprendido entre la topografía existente y el diseño de cantera que se tenga, generando un sólido de bloques, con volumen conocido. A cada uno de estos bloques es posible introducirle un valor, con el cual luego se pueden calcular porcentajes de materiales o del valor que se desee, con respecto al volumen total que se tenga.

Una vez elaborado dicho modelo de bloques, con todos los valores de interés incluidos, se pueden generar recomendaciones para la extracción del material por medio del uso de explosivos. Los procesos de voladura toman en cuenta variables propias de cada cantera o proyecto, pero existen consideraciones teóricas que se pueden recomendar, basados en el tipo y calidad de roca presente, tamaños mínimos requeridos por el quebrador (de tener línea de procesamiento), además del equipo móvil presente en la cantera (excavadoras, cargadores frontales, etc.). Para esto se tomaron como referencia las metodologías de cálculo de López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina (1987).

Casos de Estudio

Las canteras en donde se desarrollaron los objetivos, son el Tajo Cóncavas y el Tajo San Buena.

- Tajo Cóncavas: Se encuentra en la provincia de Cartago, en el cantón del mismo nombre, específicamente en el distrito de Dulce Nombre. El frente de explotación actual se encuentra dentro la hoja topográfica Istarú 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), sin embargo, parte del área de concesión se encuentra en la hoja topográfica Tapantí 1:50 000 del IGN. En dicha cantera se explotan rocas volcánicas asociadas a productos del volcán Irazú, especialmente andesitas y andesitas-basálticas, descritas por diferentes trabajos geológicos en la zona de los alrededores de Paraíso de Cartago.

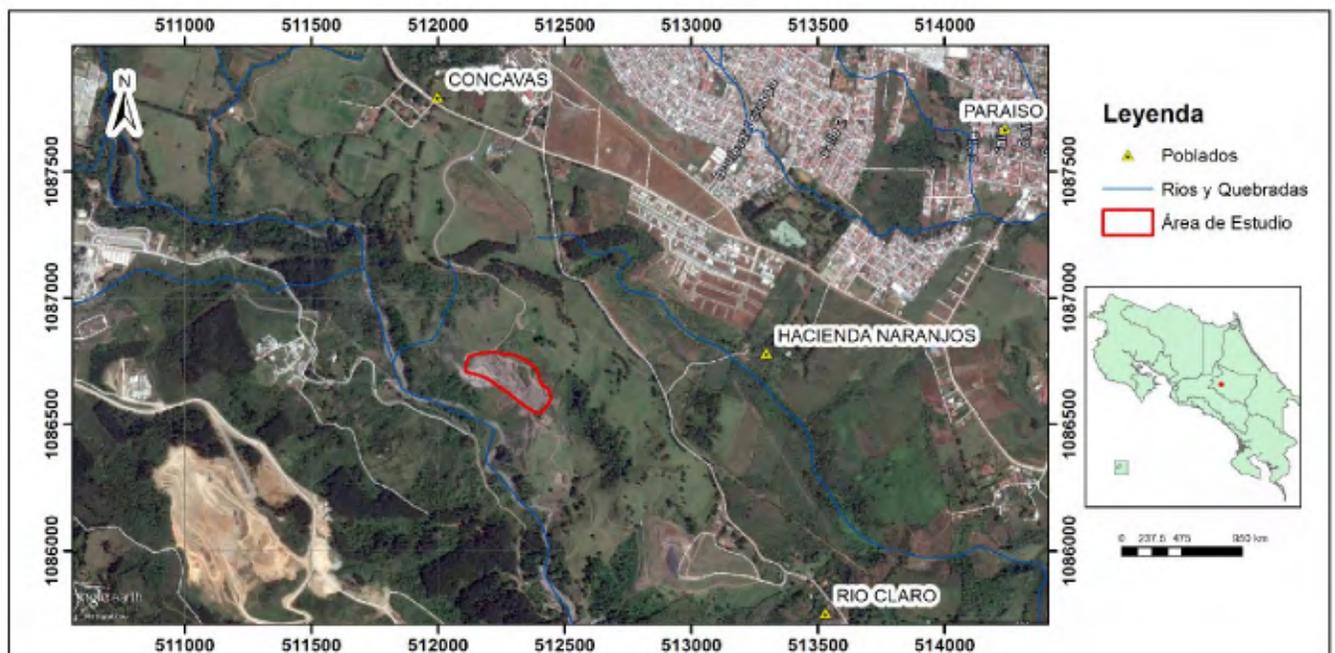


Figura.3 Mapa de ubicación del Tajo las Cóncavas, primer caso de estudio

- Tajo San Buena: El Tajo San Buena se ubica en el Cantón de Abangares de la provincia de Guanacaste, específicamente en el distrito de Colorado. El frente de explotación actual se encuentra dentro la hoja topográfica Abangares 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). En este tajo se explota la formación Barra Honda, por lo que los macizos se encuentran formados en su mayoría por calizas.

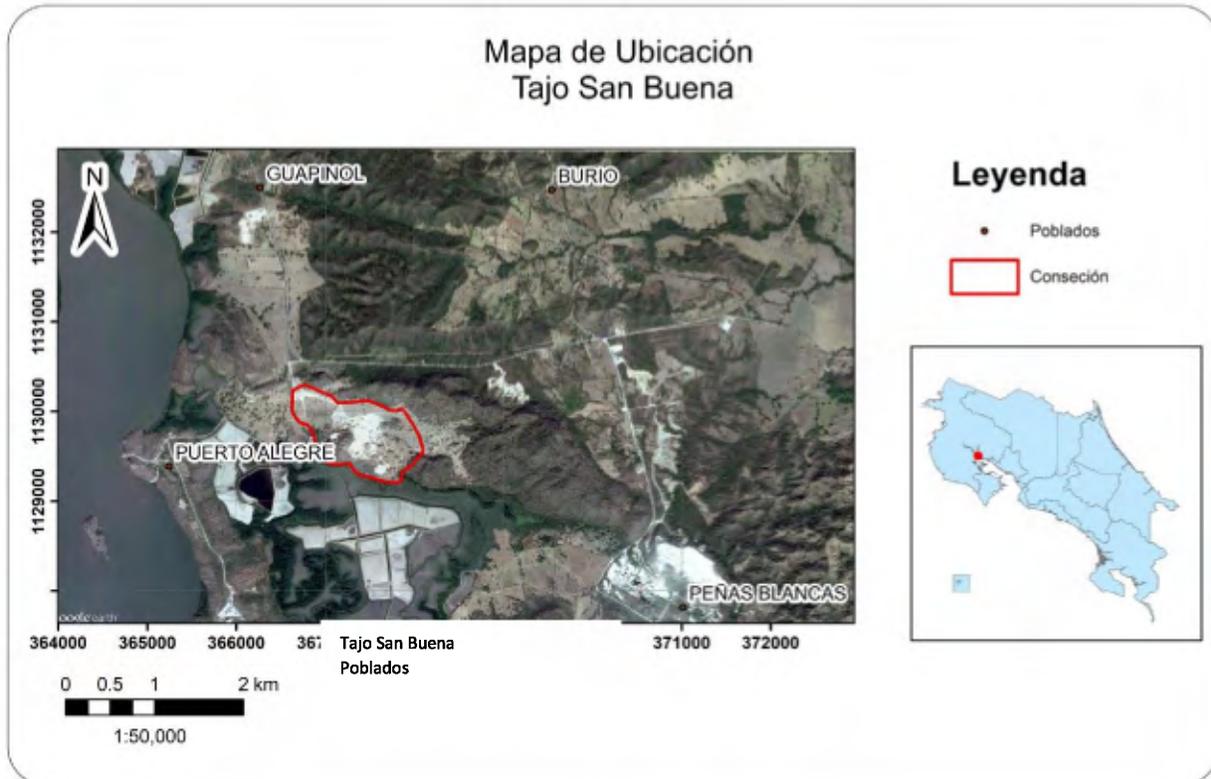


Figura.4 Mapa de ubicación del Tajo San Buena, segundo caso de estudio.

1. Estudios Geológicos

El presente apartado contiene los estudios geológicos realizados en los dos casos de estudios, los cuales incluyeron consideraciones geológicas de carácter litológico y estructural principalmente, además aspectos geomorfológicos, petrográficos, y geoquímicos.

Cada caso de estudio tiene sus propiedades específicas, y consideraciones propias a la hora de planificar una optimización en la extracción de recursos, por lo que el estudio a detalle de sus condiciones geológicas es insumo indispensable para todo planeamiento minero.

La metodología utilizada para la realización de los estudios geológicos, fue el trabajo de campo, toma de muestras litológicas en campo, toma de buzamientos y direcciones de orientación de discontinuidades, revisión bibliográfica de la información existente, análisis de curvas de nivel y utilización de programas informáticos para la elaboración de modelos de elevación digital y mapas.

1.1 Tajo Las Cóncavas

La problemática planteada por la administración del tajo y de la cual se inicia este estudio en esta locación, es debido a la presencia de inconsistencias litológicas con el tipo de material que existe en un mismo frente de extracción, en donde presentan zonas donde el material no es apto para la trituración, obteniendo un tipo de “arena”, que les genera problemas en el proceso de voladura y les sobre estima la cantidad de material real que pueden utilizar para la comercialización de agregados rocosos. Para abordar esta situación se propone el desarrollo de los siguientes estudios: Descripción y modelamiento de la geología local, mediante la visita y toma de datos en campo, la prospección del subsuelo mediante las metodologías de sísmica de refracción y tomografía sísmica de refracción, para identificar y zonificar las diferentes litologías, diseño final de la cantera para el posterior cálculo de reservas, todo esto con el fin de ordenar la extracción y poder identificar sus zonas aprovechables, incluyendo los porcentajes de materiales presentes, y finalmente recomendaciones finales técnicas para optimizar el proceso de extracción en la cantera, conociendo las características geológicas a fondo.

Geología Regional

La geología presente en la zona de Paraíso y sus alrededores corresponde a: materiales volcánicos provenientes del Volcán Irazú, específicamente los contenidos por la Formación Reventado definida y descrita por Krushensky (1972), además de rocas sedimentarias al sur del área de estudio, en donde afloran las formaciones San Miguel, descrita por Carballo (1978) y Coris, descritas por Castillo (1969). La zona también presenta elementos estructurales importantes, como el sistema de falla Agua Caliente, el cual define en gran parte las expresiones estructurales y geomorfológicas de la zona, además de fallas transtensivas generadas por el Volcán Irazú, ambos sistemas descritos en Montero , Rojas, & Linkimer (2013).

Estratigráficamente los materiales volcánicos presentes en la Formación Reventado y sus miembros sobreyacen el basamento sedimentario que aflora casi a nivel del cauce del río Aguacaliente.

Geología local

La geología de los frentes de extracción del tajo Las Cónovas comprende en su totalidad con flujos de rocas volcánicas de composición intermedia, de una matriz africa color gris claro en roca sana, y una variedad de tonalidades grisáceas según su grado de meteorización; a simple vista presenta fenocristales milimétricos, y un porcentaje muy bajo de cristales máficos u opacos. Se identifican 2 flujos principales en el frente de extracción, los cuales presentan diferencias texturales y de composición mineral, dicho flujo se describen continuación.

Flujo Superior: Se observa en las partes superiores del tajo, presenta mayor cantidad de feldespatoides, predominando principalmente las zeolitas y la nefelina, en una matriz gris clara a oscura, dentro de la cual también se encuentran cristales milimétricos de fantasmas de minerales y minerales máficos u opacos. Las rocas de esta unidad se clasifican microscópicamente como una andesita.

Flujo Inferior: Se observar un flujo andesítico más característico, con una matriz gris africa y con cristales milimétricos inmersos, donde se observan plagioclasas y cristales de piroxenos o/y opacos, las rocas de este flujo se clasifican microscópicamente como una andesita.

Los análisis microscópicos se pueden observar en el apéndice 1 del presente informe. La diferencia entre las rocas de estos dos flujos se observa en la figura 1.1.1.



Figura 1.1.1 Muestras los tipos predominantes de roca, encontrados en el frente de explotación, la imagen de la izquierda corresponde con una muestra del flujo inferior y la imagen de la derecha corresponde con una muestra del flujo superior.

En su mayoría los afloramientos en el tajo se disponen de forma columnar para las rocas del flujo inferior y de forma masiva para las rocas del flujo superior, como se observa en la figura 1.1.2 y 1.1.3.

El tajo se sitúa en el frente de una colada, la cual es delimitada por el río Agua Caliente. Muchas de las rocas presentan evidencia de una fuerte alteración química, en donde la roca original torna en una roca friable y granular de matrices grisáceas y violáceas. La disposición de estas áreas en donde la roca se encuentra alterada, se da en lentes horizontales u oblicuos de algunos metros de extensión, caracterizados por un color gris claro, generado por alta concentración de minerales de alteración como zeolitas, calcita, malaquita y sulfuros de cobre, como se observa en la figura 1.1.4.

Las rocas aflorantes en el tajo Las Cóncavas son correlacionales con las rocas descritas por Krushensky (1972), para la Formación Reventado, específicamente para el Miembro Paraíso.



Figura 1.1.2 Afloramiento tipo del flujo superior



Figura 1.1.3 En la foto se observa el diaclasamiento que genera columnas en la roca, y corresponde con los afloramientos típicos del flujo inferior

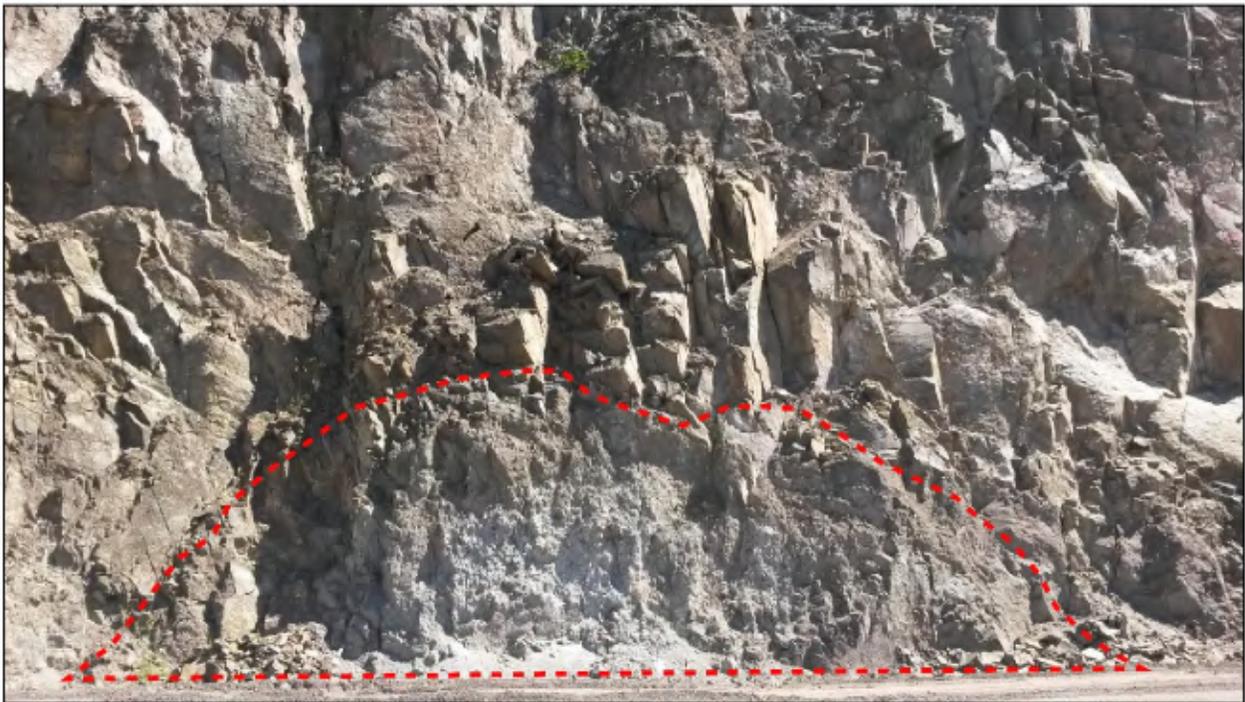


Figura 1.1.4 Muestra encerrado en una línea punteada roja, la zona de alteración hidrotermal en donde la roca muestra un color gris claro a verdoso y una textura granular, sobre esta zona se observa roca andesita sin alterar dispuesta de manera columnar.

Asociaciones Mineralógicas

Las rocas aflorantes en el Tajo Las Cóncavas, presentan una marcada variedad en texturas y consistencias, debido a la presencia de evidentes alteraciones químicas. A simple vista es posible determinar minerales como laumontita y mordenita (figura 1.1.5), del grupo de las zeolitas (Zeledón, 2004), epidota, calcita (figura 1.1.5) y minerales de cobre como calcosina (figura 1.1.6) y bornita. De igual manera la presencia de calcita es predominante, lo que genera que la interacción con los minerales de cobre del macizo, produzca carbonatos de cobre como malaquita (figura 1.1.7), la cual se dispone como adheridas a la roca y en algunos casos adherido a los cristales de calcita, lo que genera en apariencia cristales verdes. La asociación de los anteriores minerales, sugiere que las rocas del tajo presentan un posible tipo de alteración hidrotermal llamado zeolitización. De igual manera es posible que la zeolita tenga un origen magmático, y que con la meteorización química de aguas meteóricas se tenga las asociaciones mineralógicas presentes. Un estudio en esta línea de investigación sería muy adecuado para comprender las manifestaciones mineralógicas presentes en el tajo. La acumulación de estas asociaciones minerales se da en las zonas donde la competencia de la roca es baja, generando una desintegración de la misma. En la figura 1.1.8 se evidencia una muestra cercana a estas zonas mineralizadas, con una tonalidad café violácea, mientras que la otra muestra posee un color gris claro, y corresponde con una roca sana, normalmente ubicadas en sitios distantes a zonas mineralizadas.



Figura 1.1.5 Se observa la paragénesis de minerales de zeolita y calcita, presente en las rocas del macizo



Figura 1.1.6 Muestra adherencias de calcosina en una roca del macizo, además de algunos sulfuros



Figura 1.1.7 Se observan las muestras de malaquita adheridas a las rocas del tajo, junto con calcita



Figura 1.1.8 Muestra la diferencia entre una roca sana y una alterada

Geología Estructural

Estructuralmente el tajo se ve influenciado por el sistema de falla aguacaliente, es por esto que se encontraron evidencias de planos con estrías de falla de variadas dimensiones, que atraviesa el tajo con orientaciones NE-SW predominantemente con movimientos relativos de desplazamiento de rumbo en los planos que se tiene evidencia, como en la figura 1.1.9, donde se presenta un plano con movimiento relativo dextral según la orientación de las estrías de falla mineralizadas.

La tendencia en las principales familias de fracturas presentes en el frente de explotación, otorga diferente información, la cual puede ser un insumo muy importante en diferentes ámbitos de estudio. Para el objetivo del presente trabajo se pretende evidenciar las orientaciones principales con el fin de establecer zonas en donde las estructuras dentro del macizo permitan el paso de fluidos que contribuyan con la mineralización y alteración presente, misma que se desea identificar como anomalía geofísica. También puede ser utilizado para análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos, información que contribuiría con la elaboración de estudios de esta índole.



Figura 1.1. 9 Muestra las estrías de falla en el plano, mostrando un movimiento relativo dextral

Por esta razón, se realizaron mediciones en el campo, de la orientación de varios planos importantes y se agruparon en el programa Stereonet, esto con el fin de generar un diagrama de rosa, donde se evidencia las orientaciones principales (figura 1.1.10)

Dado que el macizo presenta fracturamiento columnar, existen muchas familias de discontinuidades, por lo que dicho diagrama, se incluyeron planos que se consideran propias de una expresión estructural y no las generadas por el enfriamiento y génesis del macizo. Esto se diferenció, buscando aquellas familias de fracturas que tuvieran una continuidad marcada y consistente de sus propiedades de dirección e inclinación a lo largo del macizo, comprobando que su génesis es la fracturas por movimientos tectónicos y no por enfriamiento de la roca.

Diagrama de Rosa

Pétalos de la rosa paralelos a la orientación de las diaclasas.

Valor Máximo = 22.22222% **entre 211 y 220 grados**

Vector medio = 236.9 grados \pm 25.6;

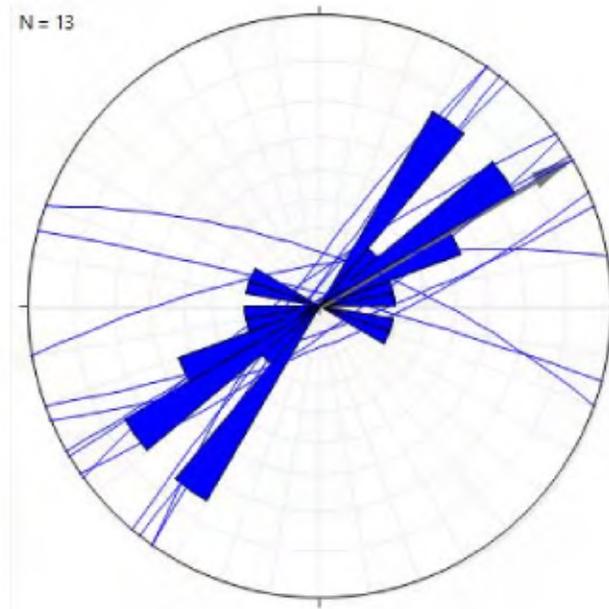


Figura 1.1.10 Muestra los rumbos preferenciales en donde se orientan las familias principales identificadas a lo largo del tajo. Se grafican 13 planos que corresponden con las familias principales de fracturas.

Geomorfología

La geomorfología de las zonas aledañas a la concesión corresponde con zonas de mediana a baja pendiente, las cuales limitan con el cañón del río Agua caliente. No presenta patrones de drenaje de gran magnitud que generen cárcavas o zanjas que moldeen drásticamente la topografía de la zona. Se identifica una unidad denudacional, la cual es la predominante en los alrededores del proyecto, zonas que son utilizadas para actividades ganaderas y de pastoreo.

Se elaboró un mapa de pendientes en donde se evidencian las pendientes relativas en los alrededores del proyecto, dicho mapa se observa en la figura 1.1.11.

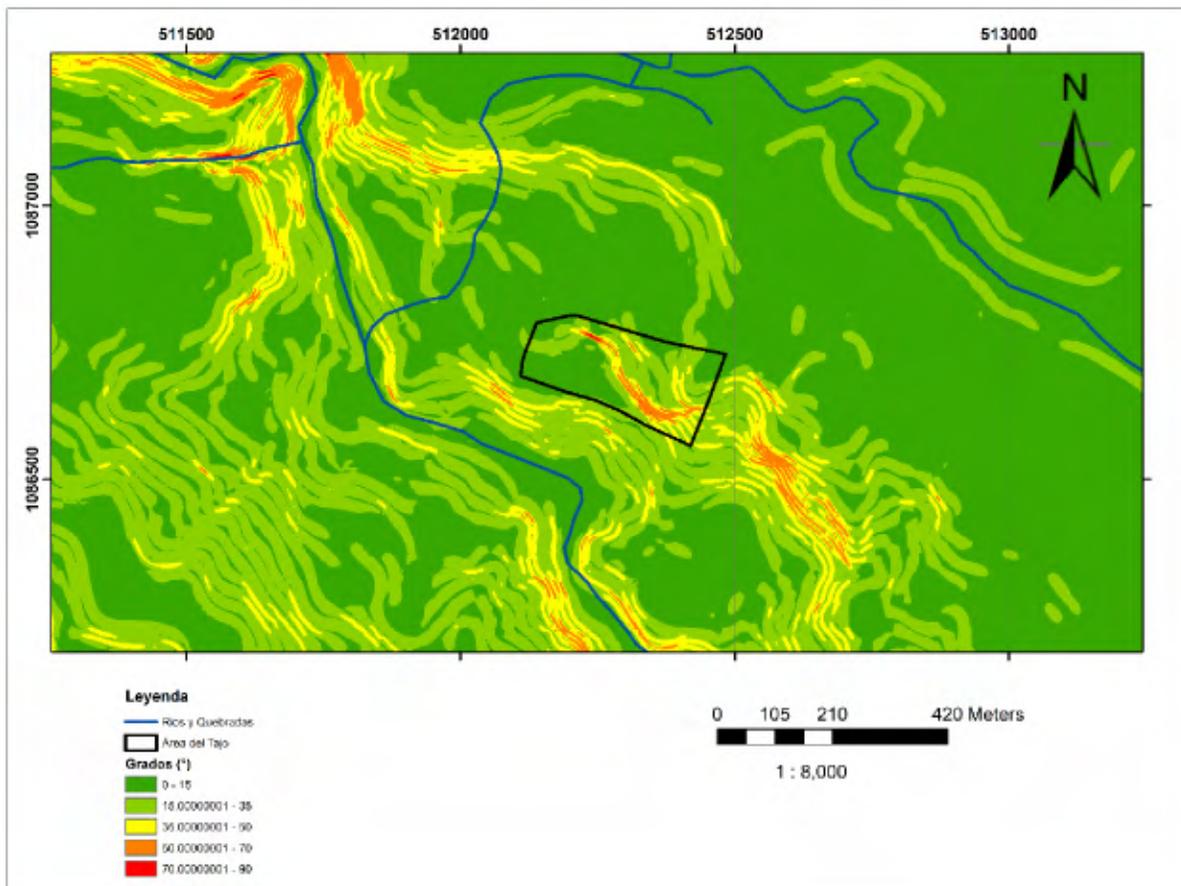


Figura 1.1.11 Muestra el mapa de pendientes para la zona de concesión y las zonas aledañas al a misma. Se evidencia una topografía suave y regular en las zonas aledañas

Como se observa en la figura anterior las pendientes más fuertes corresponden con los taludes generados por la extracción, mientras que las zonas aledañas presentan pendientes relativamente suaves.

Dentro del área de concesión se encuentran rellenos y alteración de la topografía, por el manejo de la concesión, por lo que no se pueden establecer unidades geomorfológicas dentro de la misma.

No existen evidencias de patrones de drenaje natural, esto debido a la pendiente regular que se observa en las zonas aledañas al proyecto, además del manejo de las aguas superficiales que se ha realizado en las fincas aledañas.

1.2 Tajo San Buena

La zona estudiada dentro de la concesión del Tajo San Buena corresponde con un cerro que no ha sido explotado ni alterado drásticamente, tiene algunos caminos de acceso, pero no se ha realizado extracción alguna, por lo que la zona carece de información base para desarrollar una explotación óptima. Se pretende obtener, caracterizar e identificar detalles en puntos como geología estructural, variaciones en litología, geoquímica de algunas partes del macizo, cálculo de reservas, diseños de explotación y consideraciones finales para la explotación por medio de la implementación de explosivos.

Geología Regional

La geología presente en la zona de Colorado de Abangares y sus alrededores corresponde con materiales sedimentarios correspondientes con lutitas, areniscas y material vulcaniclástico comprendidas por la formación Descartes definidas por Astorga (1987) y las calizas de la formación Barra Honda, descritas en Dengo (1962). La estratigrafía de la zona presenta rasgos importantes, principalmente el contacto por falla, entre las formaciones Descartes de edad Paleoceno - Eoceno, sobre la formación Barra Honda del Cretácico tardío. Flores, Denyer, & Aguilar (2003) describe una serie de fallas inversas con inclinación hacia el noreste. En la figura 1.2.1 se evidencian las formaciones presentes, según la topografía de la zona.

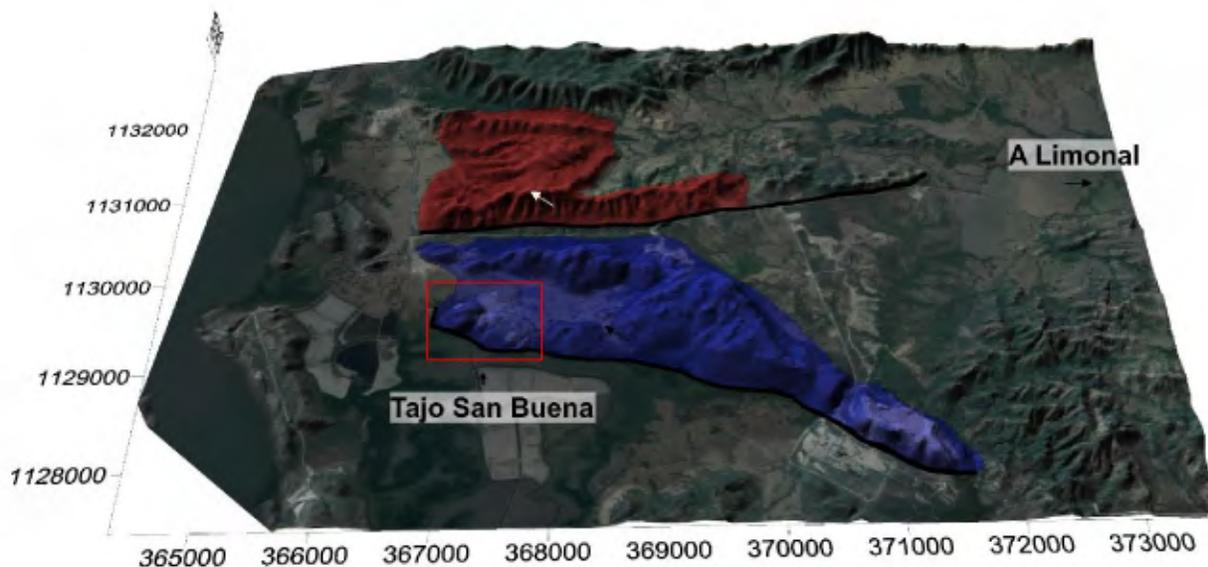


Figura 1.2.1 Muestra en azul las zonas identificadas como caliza y en rojo, las zonas con materiales sedimentarios, según Flores, Denyer, & Aguilar (2003), las líneas negras marcan las zonas donde identifican fallas inversas en la zona.

Geología local

La geología de los frentes de extracción del Tajo San Buena comprende en su totalidad con rocas sedimentarias químicas, específicamente roca caliza. A lo largo del yacimiento se encuentran

lentes de cuarzo de colores oscuros, además de zonas donde se presenta calcita cristalizada, las cuales aprovechan grietas y pequeñas cavernas para formar cristales de gran tamaño. Las unidades identificadas se describen a continuación:

Unidad Calizas: Conformada por calizas con intrusiones y lentes de calcita, de colores blancos a marrones, presenta patina de colores rojizos y cafés.

Subunidad Lentes de Cuarzo: Dentro de la unidad calizas, se encuentran zonas con altas contracciones de lentes de cuarzo negro, los cuales se disponen de manera irregular dentro del cerro.

Unidad Coluvios recientes: Debido a las altas pendientes del cerro en sus bordes, se generan ciertos desprendimientos en las laderas del cerro, donde se pueden observar desde bloques métricos hasta bloques centimétricos.

El frente extracción en estudio lo constituye un cerro de aproximadamente 100 m.s.n.m, el cual presenta evidencias de fallas geológicas de considerable tamaño, las cuales se orientan aproximadamente de este a oeste.

Dichas grietas dan pie a la generación de cavernas y zonas de mineralización en donde la calcita cristalizada forman zonas de debilidad que presentan un factor a considerar tanto para los procesos de perforación como para el proceso de fracturación de la roca. En la figura 1.2.2 y 1.2.3 se observan algunas de estas zonas de cavernas y agrietamiento.



Figura 1.2.2 Muestra sistemas de cavernas y agrietamiento en el macizo



Figura 1.2.3 Sistemas de cavernas encontrados en el macizo

Geoquímica del Macizo

Uno de los aspectos importantes a modelar, es la química que componen las calizas del frente de extracción, ya que este componente es indispensable para decidir el uso final que se le puede dar a la roca triturada. Según sean las concentraciones de hierro, aluminio, calcio, silicio, entre otros, se puede buscar diversos mercados para comercializar dicho producto. Más adelante en el presente trabajo, se realizará un apartado sobre la metodología y los estudios realizados para el modelado geoquímico.

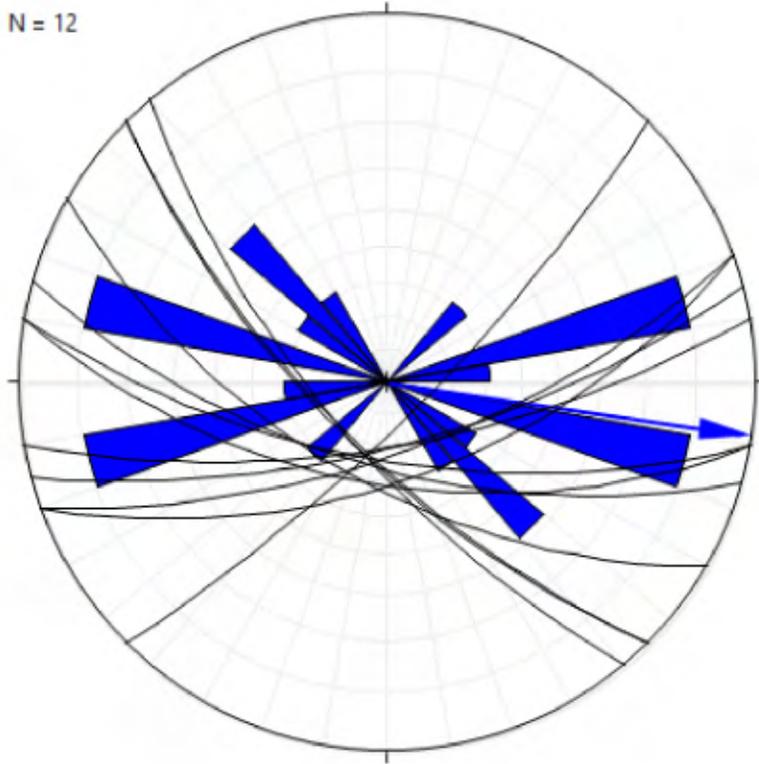
Geología Estructural

La geología estructural juega un papel importante a la hora de modelar la extracción y la calidad del macizo, ya que cercano a zonas de falla se presentan posibles zonas fracturadas, zonas de debilidad y por ende zonas donde la generación de cavernas es mucho más elevada, gracias a la disolución de calizas y transporte de minerales generados por la meteorización.

El macizo como tal no presenta fracturación primaria, debido a su génesis de plataforma (Flores, Denyer, & Aguilar, 2003), por lo que la fracturación que presenta es secundaria y generada debido al levantamiento de la zona y la posterior exhumación de la formación. Dicho levantamiento tomó lugar en un marco geotectónico distinto al actual. Esto califica dichos planos de falla como antiguas y sin posibilidad de generación de sismos.

Bajo esta consideración se realizó un levantamiento de los principales planos encontrados, con el fin de determinar las orientaciones principales dentro del cerro. Para esto se utilizó el programa Stereonet, con el cual se elaboró un diagrama de rosa, con la información de las orientaciones (figura 1.2.4)

N = 12



Datos de planos (pétalos paralelos a la dirección del rumbo): Tajo San Buena
Valor máximo = 25% entre 071° y 080°
Vector Medio = 098.4° ± 19.3

Figura 1.2.4 Red estereográfica, donde se muestran las orientaciones principales del macizo. Se grafican 12 datos que corresponden con las familias principales de fracturas.

Se observa como las orientaciones predominantes se encuentran entre 71 y 80 grados. Algunas de estas orientaciones corresponden con planos de fallas de considerable tamaño que evidencian movimientos relativos de desplazamiento de rumbo con cierta componente inversa (figura 1.2.5)

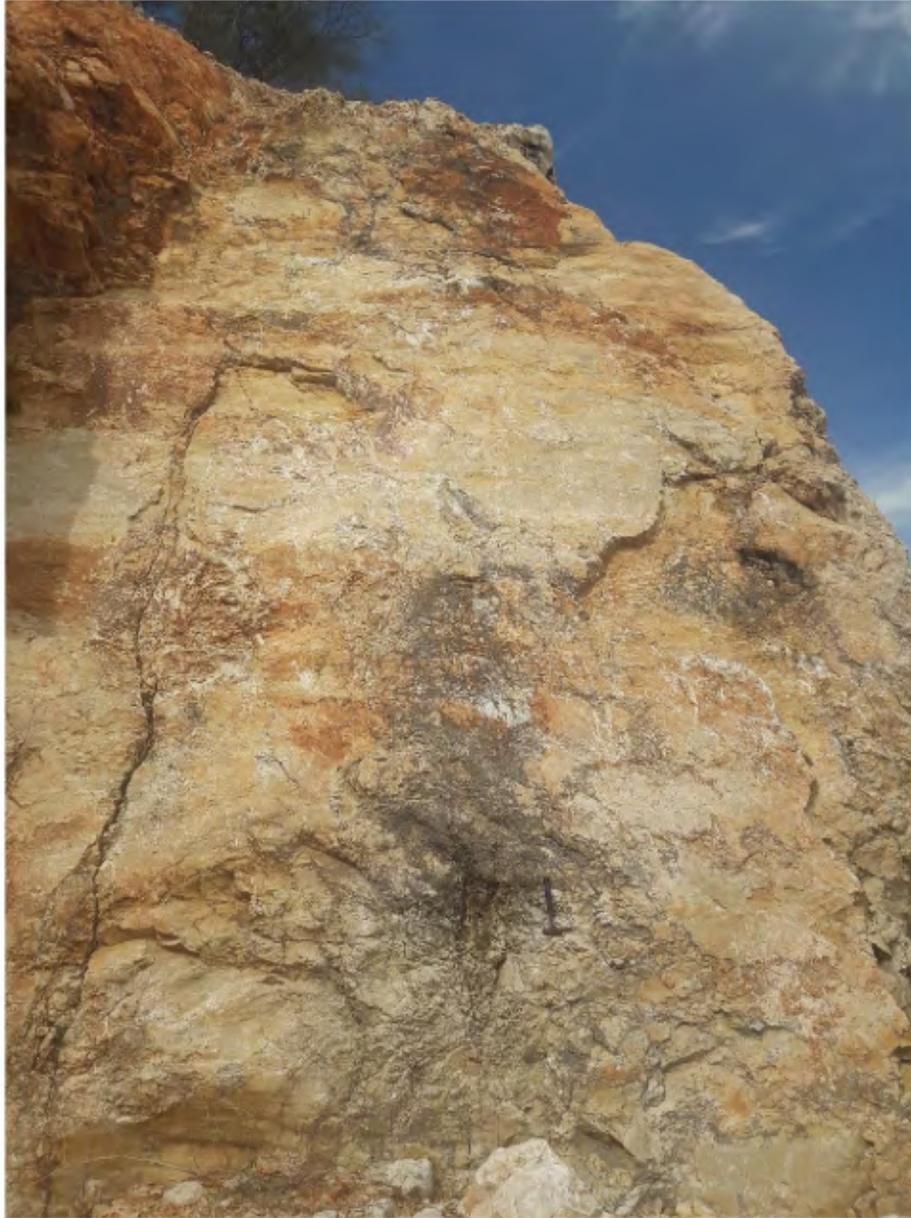


Figura 1.2.5 Muestra uno de los principales planos de falla encontrados en el macizo, el mismo presenta evidencias de componentes inversos y de desplazamiento de rumbo con movimiento relativo sinistral.

Geomorfología

La zona donde se desarrollan los trabajos de extracción corresponden con cerros relictos, definidos como unidades denudacionales, gracias a que la actividad tectónica que los elevó, no se encuentra activa. Como es típico en los cerros relictos de caliza posee laderas de altas pendientes y de gran tamaño

Como se muestra en el mapa de pendientes (figura 1.2.6), el cerro presenta pendientes de alto ángulo, rodeado de zonas planas, correlacionables con depósitos recientes.

Geomorfológicamente se identificaron unidades de depósitos recientes y de relleno, y la unidad denudacional en la que se clasifica el cerro estudiado.

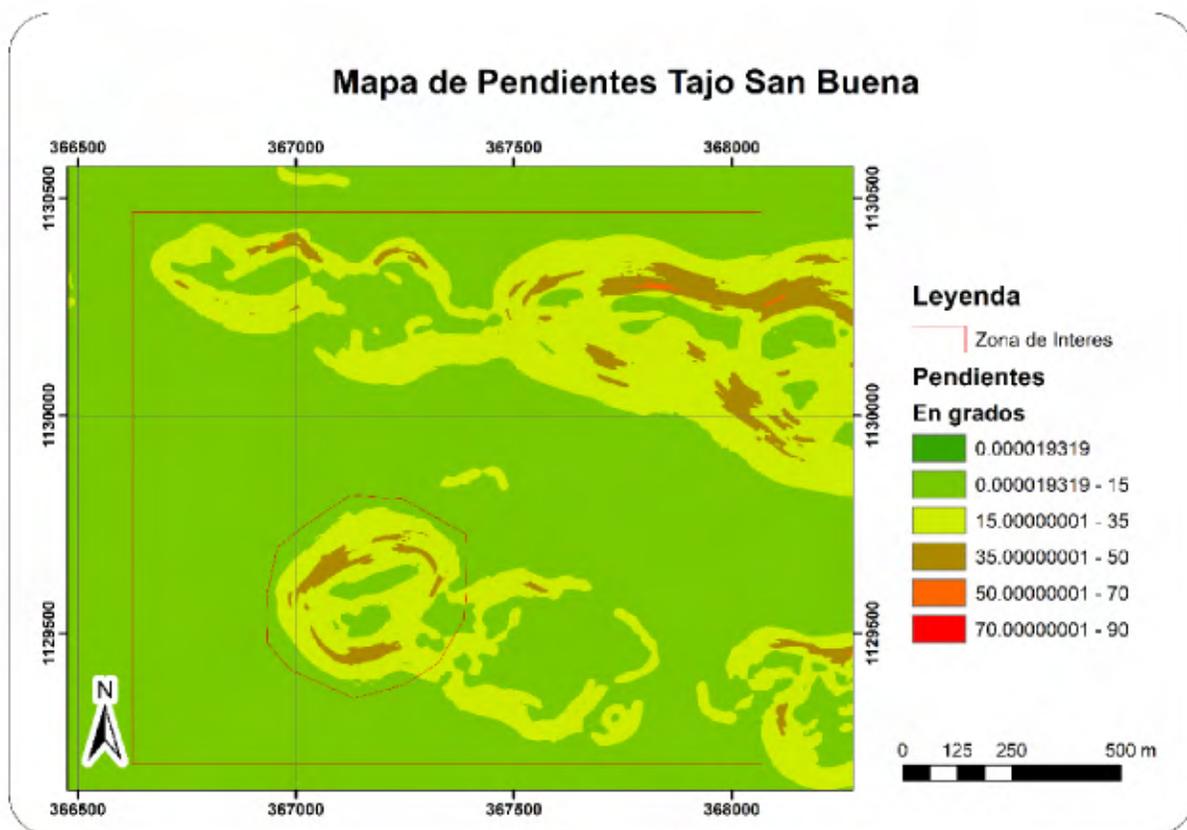


Figura 1.2.6 Mapa de pendientes del área de concesión, donde se evidencia las diferencias de topografía en las zonas aledañas al cerro.

2. Estudio Geoquímico

Al ser la caliza una roca sedimentaria química, el contenido y concentración de ciertos elementos, va a ser determinante para encontrar un uso adecuado de este tipo de roca, la cual actualmente posee variados usos industriales. Con este apartado se pretende modelar la geoquímica de algunos de los posibles frentes de explotación del tajo San Buena, esto con el fin de generar un insumo más, el cual será necesario en el diseño de explotación, ya que orientaría al desarrollador sobre las zonas con mayor interés de explotación, según sea la demanda de materiales con concentraciones concretas.

Metodología

Inicialmente y dependiendo del presupuesto destinado para realizar la prospección, se deben de escoger las zonas de mayor importancia, las cuales serían los posibles frentes de exportación del área de estudio. Para el presente estudio se tienen como zonas de interés, la parte norte del cerro, el cual sería de las primeras zonas en donde se llevaría a cabo la extracción.

Para la extracción de muestras, se planteó recolectar a diferentes profundidades utilizando la perforadora que se encuentra en el tajo, la cual realiza la perforación de hoyos para voladura (figura 2.1), sin embargo, la calidad del macizo impidió que la máquina al perforar tuviera recuperación de material, perdiéndose el detrito entre las diferentes zonas fracturadas o cavernas que presenta, por lo que esta metodología tuvo que ser descartada. Si más adelante se deseará realizar un muestreo químico del macizo se recomienda utilizar una perforadora con recuperación de núcleo o una perforadora con martillo de fondo (DTH Down The Hole), las cuales no pudieron ser utilizadas en este proyecto por limitaciones económicas.



Figura 2.1 Muestra la perforación de un hoyo utilizando una perforadora TH, Top Hammer o martillo de cabeza.

Debido a lo explicado anteriormente, el muestreo se limitó a un muestreo superficial en diferentes zonas estratégicas del cerro y de las zonas próximas a explotar. Los sitios donde se recogieron muestras, se ubican en el siguiente mapa:

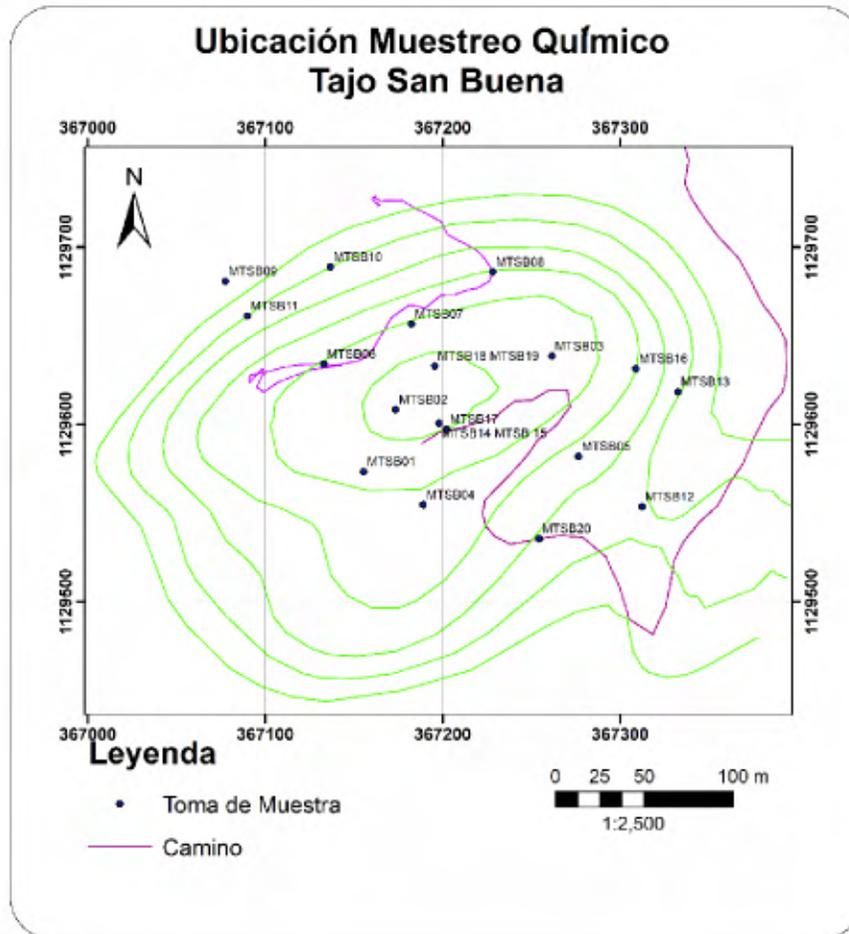


Figura 2.2 Muestra la ubicación de las muestras recogidas en una parte del cerro en estudio.

En total se recogieron 20 muestras, en un área de 35 mil metros cuadrados, por lo que en promedio se recogió una muestra por cada mil setecientos metros cuadrados, lo que representa una muestra por cada 5% de área escogida. Las muestras fueron recolectadas en envases plásticos y rotuladas con su respectivo código, posteriormente fueron ingresadas al laboratorio del Centro de Investigación de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), de la Universidad de Costa Rica, para analizar los porcentajes de concentración de los elementos Si, Al, Fe, K, Na y Ca en las muestras. Estos elementos fueron escogidos, ya que normalmente son utilizados en la industria, especialmente la industria cementera, para calcular parámetros de calidad de la roca.

En el laboratorio se realizará el análisis químico de las muestras mediante la metodología semi cuantitativa de fluorescencia por rayos x, la cual arroja los porcentajes de concentración de los elementos requeridos (de sus óxidos).

Con los resultados obtenidos se realizan mapas de concentración, con el fin de ubicar las zonas donde se tienen mayores o menores concentraciones del elemento estudiado. Dichos mapas se realizarán mediante la metodología de interpolación de datos kriging, metodología estadística que se basa en asignar un peso a los puntos vecinos según su valor, para definir varianzas regionalizadas mediante funciones estadísticas. Dichas funciones pueden deducirse analizando la correlación espacial entre los datos en función de la distancia entre ellos, midiendo la semivarianza entre datos separados por distancias diferentes (Webster & Oliver, 2007). Dicha metodología es utilizada cuando no se tienen una malla de datos regular, por lo que, en zonas con faltante de información, se pretende rellenar ese faltante, mediante la variabilidad estadística entre dos puntos con datos conocidos. Para la interpolación de datos se utilizaron variogramas lineales en los datos obtenidos.

Resultados

Los resultados de los análisis químicos de las muestras seleccionadas se presentan a continuación:

Tabla 1. Muestra los resultados de concentración de elemento en %, para cada muestra analizada. El prefijo ND, significa que no se registró concentración de ese elemento en la muestra.

x	y	Muestra	CaO	SiO ₂	NaO	KO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	% Total	% Restante
367155,53	1129573,31	MTSB01	98,7	0,5	ND	0,4	0,2	ND	99,8	0,2
367173,55	1129608,31	MTSB02	98,5	0,3	0,5	0,4	0,1	ND	99,8	0,2
367261,61	1129638,53	MTSB03	98,6	0,2	0,6	0,4	0,1	ND	99,9	0,1
367189,02	1129554,64	MTSB04	98,6	0,5	ND	0,4	0,3	ND	99,8	0,2
367276,65	1129581,93	MTSB05	84	7,5	ND	0,8	4,7	1,9	98,9	1,1
367133,11	1129634,04	MTSB06	85,6	5,6	ND	0,6	5,4	1,9	99,1	0,9
367182,46	1129656,62	MTSB07	97	1,2	ND	0,5	0,6	0,3	99,6	0,4
367228,27	1129686,00	MTSB08	92,4	2,9	ND	0,6	2,5	1	99,4	0,6
367077,55	1129680,77	MTSB09	98,1	0,8	ND	0,4	0,3	ND	99,6	0,4
367136,74	1129688,79	MTSB10	89,2	4,1	ND	0,9	3,3	1,8	99,3	0,7
367089,92	1129661,23	MTSB11	96,7	1,3	ND	0,5	0,8	0,3	99,6	0,4
367312,47	1129553,46	MTSB12	96,6	0,8	0,7	0,4	0,7	0,3	99,5	0,5
367332,66	1129618,35	MTSB13	93,3	2,3	0,9	1,1	0,7	0,8	99,1	0,9
367198,09	1129600,59	MTSB14	97,7	0,6	0,4	0,4	0,5	0,1	99,7	0,3
367198,00	1129601,00	MTSB15	98,5	0,2	0,5	0,4	0,1	ND	99,7	0,3
367308,94	1129631,49	MTSB16	98,9	0,3	ND	0,4	0,2	ND	99,8	0,2
367202,09	1129597,28	MTSB17	98,6	0,5	ND	0,4	0,3	ND	99,8	0,2
367195,62	1129632,93	MTSB18	98,2	0,6	ND	0,4	0,4	0,1	99,7	0,3
367195,62	1129634,00	MTSB19	97,8	0,8	ND	0,5	0,5	0,1	99,7	0,3
367254,38	1129535,56	MTSB20	98,2	0,6	0,4	0,4	0,1	ND	99,7	0,3

La información anterior se utilizó para realiza mapas de concentraciones, los cuales sirven como guía para ubicar las zonas de mayor o menor concentración. Dichos mapas deben de ser tomados como referencia para estudios más detallados, ya que la precisión se puede mejorar ampliando la cantidad de muestras tomadas.

A continuación, se presentan los mapas de concentración de los elementos analizados en los estudios químicos antes mencionados:

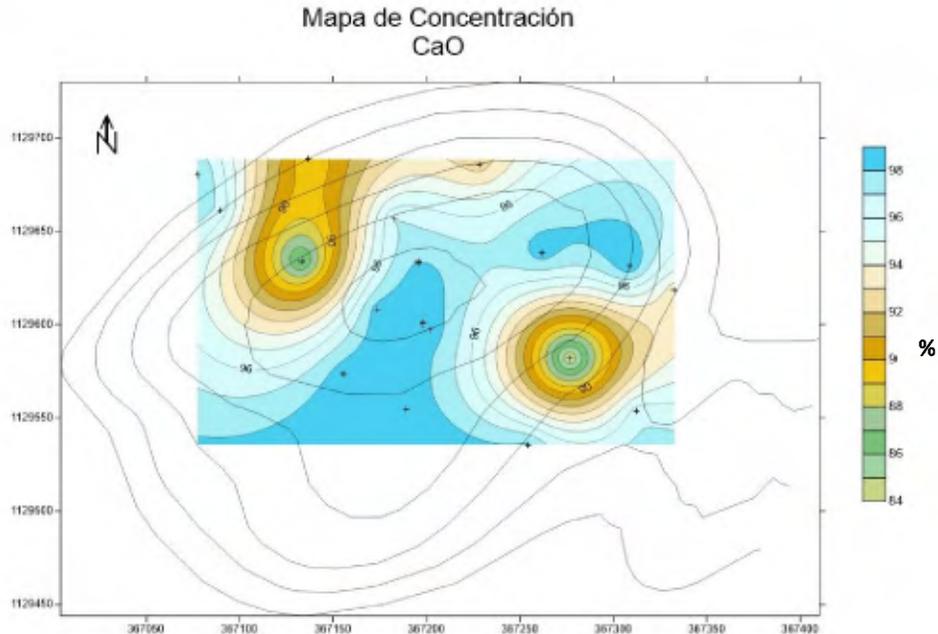


Figura 2.3 Mapa de concentración de óxido de calcio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras

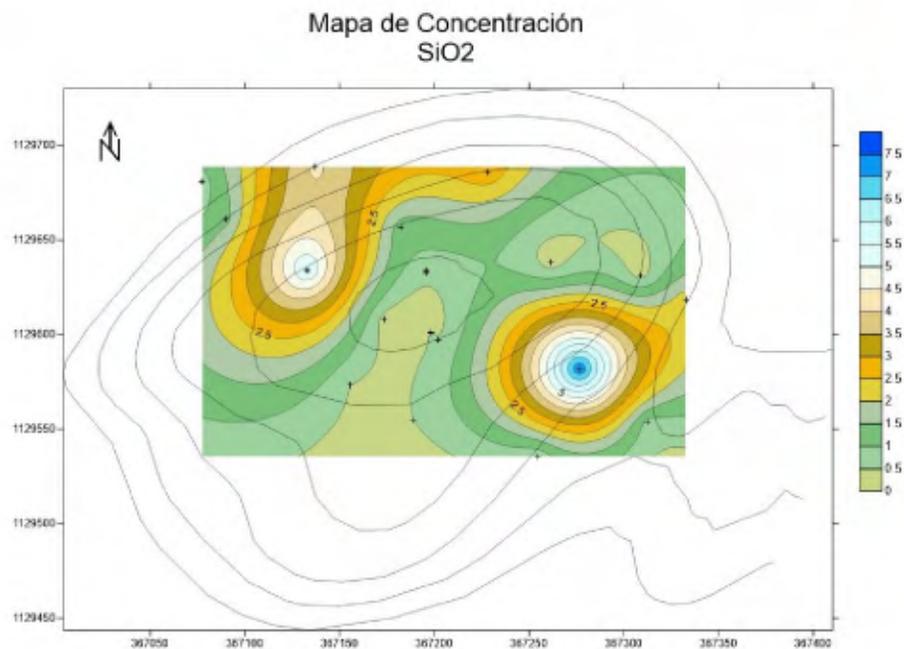


Figura 2.4 Mapa de concentración de óxido de silicio, en la zona de interés

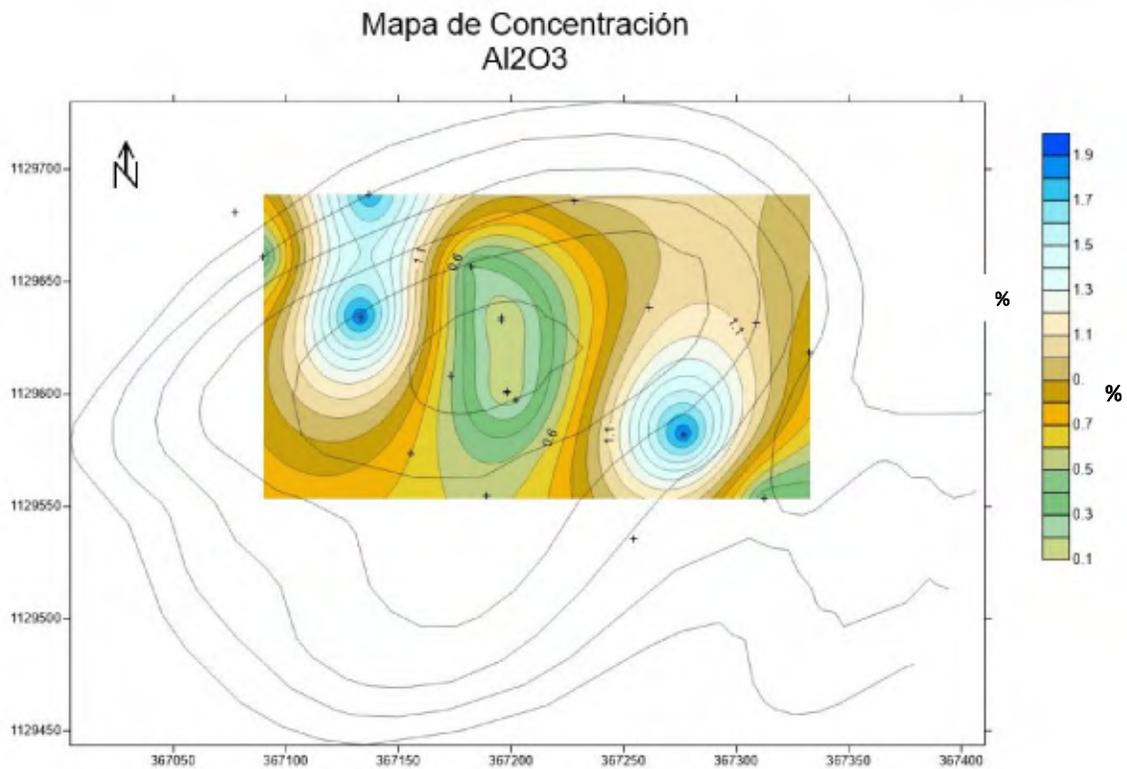


Figura 2.5 Mapa de concentración de óxido de hierro (II), en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras

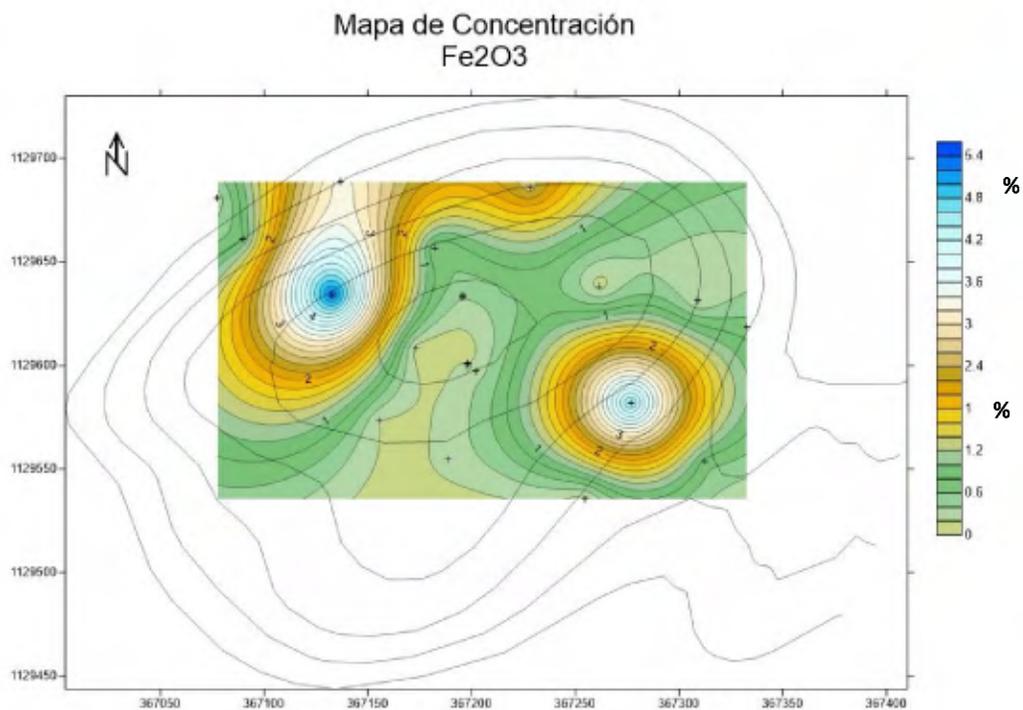


Figura 2.6 Mapa de concentración de óxido de aluminio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras

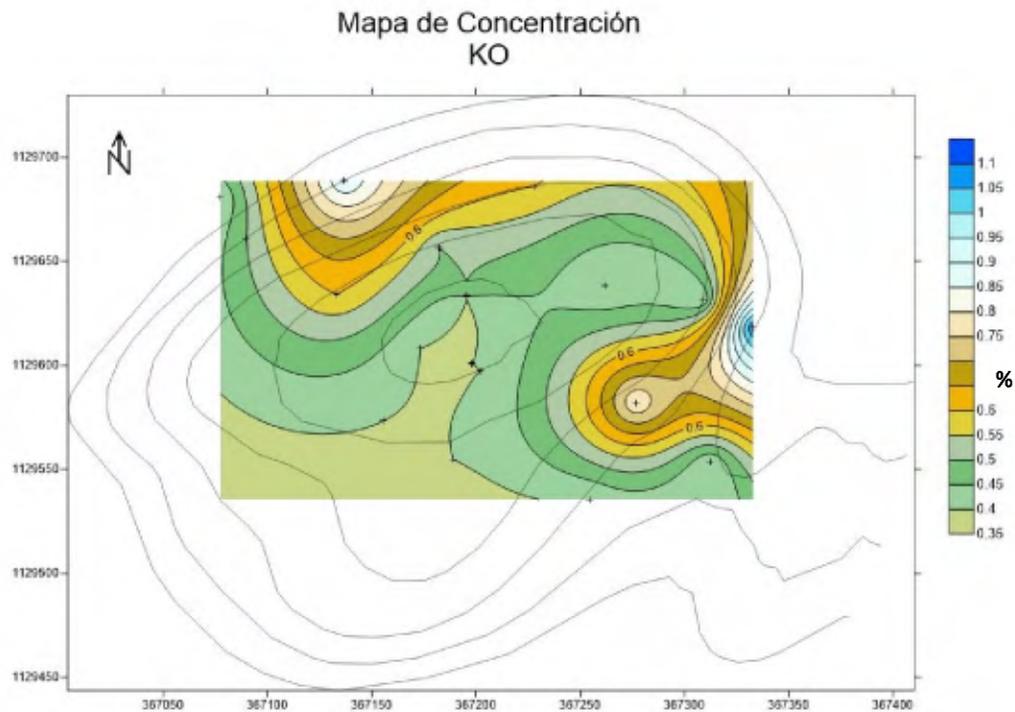


Figura 2.7 Mapa de concentración de óxido de potasio, en la zona donde se realizaron las recolecciones de muestras.

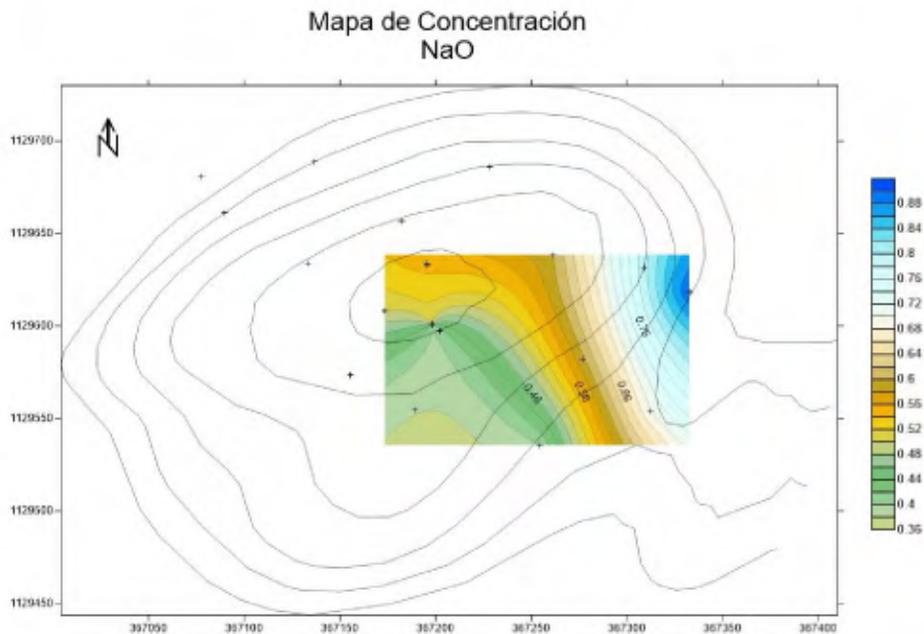


Figura 2.8 Mapa de concentración de óxido de sodio, en las muestras que registraron concentraciones de sodio.

Con la zonificación de las concentraciones bien establecidas es posible incluir esta información en las consideraciones técnicas para el cálculo de reservas y diseño de cantera.

3. Estudios Geofísicos: Sísmica de Refracción y Tomografía Sísmica de Refracción.

Con base en los estudios de geología realizado, fue posible encontrar contrastes y elementos en la litología y la geología estructural, que pueden ser condicionantes en las propiedades físicas del material. Estas diferencias de material, supone una variedad de manifestaciones físicas en la roca, lo que desemboca en un problema operacional para la administración de un tajo, ya que genera incertidumbre en el tipo y calidad de material que extraen del macizo.

Por esta razón se plantea aplicar la metodología de sísmica de refracción y la tomografía de sísmica de refracción, con el fin de identificar y modelar esos contrastes geofísicos, inferidos inicialmente en los estudios geológicos iniciales.

El quipo a utilizar es un equipo de sísmica de refracción Stratavisor NZ, de 24 canales, con geófonos uniaxiales de periodo corto. Se utilizará el programa informático SEISIMAGER y ZondST2D, para el procesamiento de los datos obtenidos en campo. También se utilizarán dos tipos de fuentes, el impacto de un mazo sobre una placa de metal, y la detonación de explosivos. La metodología es la misma para los dos casos de estudio, mientras que las consideraciones técnicas son propias de cada caso de estudio.

Metodología

Inicialmente se disponen los 24 geófonos y el cableado necesario para que los mismos se puedan comunicar con el digitalizador. Anteriormente se debe de planear la geometría del arreglo y las zonas donde se espera se evidencien anomalías geofísicas. Luego se verifica que el equipo esté funcionando y que todos los geófonos estén recibiendo datos adecuadamente (figura 3.1). Posteriormente se marcan las zonas en donde se iniciarán los eventos, sea por mazo o por detonación con explosivos.



Figura 3.1 Se observa la preparación en campo para la aplicación de las metodologías sísmicas.

En el caso del uso de explosivos, se realizan perforaciones de 32 mm de diámetro sobre la roca, a 1 m de profundidad aproximadamente, esto con el fin de poder colocar la carga explosiva en profundidad, como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Muestra el proceso de perforación realizado para el uso de explosivos como fuente generadora.

Posteriormente se procede a realizar la generación de ondas en los puntos designados. Para el uso del mazo como fuente generadora, se configura el equipo para generar un apilamiento de información (*stacking*), esto significa que, por cada 3 golpes del mazo en un mismo punto, el equipo agrupa la información de los 3 eventos, mejorando el sismograma resultante, mediante la búsqueda de frecuencias de onda congruentes con el evento del mazo impactando el suelo.

Posteriormente se continúa en el siguiente lugar marcado para el siguiente evento y se realiza el mismo procedimiento. De esta manera se obtienen los datos crudos de las llegadas de onda P.

En el caso de uso de explosivos como método generador de ondas, se utilizaron explosivos tipo gel o emulsión de 12x400 mm, los cuales fueron iniciados por detonadores eléctricos. Dichos productos se describen ampliamente, más adelante en el presente trabajo. Inicialmente el procedimiento consta de introducir el detonador dentro de la emulsión, con el fin de que cuando el detonador reciba la carga eléctrica, detone instantáneamente la “prima” (término utilizado para referirse al arreglo detonador/emulsión), generando el evento productor de ondas P. El uso de explosivos lo debe de realizar una persona con los permisos correspondientes para la manipulación y gestión de explosivos, por lo que una vez que el arreglo de geófonos se encuentra dispuesto y el equipo preparado, se dispone a la introducción del explosivo en el hoyo realizado para tal fin, luego se tapa el hoyo con material y hasta ese momento se puede continuar con las mediciones correspondientes.

Seguidamente se procesan los datos obtenidos para obtener un modelo de velocidades del subsuelo. Para esto se aplica la metodología de refracción sísmica (RFS) donde se realiza una inversión distancia-tiempo, la cual involucra la distancia de la fuente al receptor (dato conocido)

y el tiempo que demora la onda P en llegar al receptor, dato que se obtiene seleccionando las primeras llegadas en el sismograma como se observa en la figura 3.3.

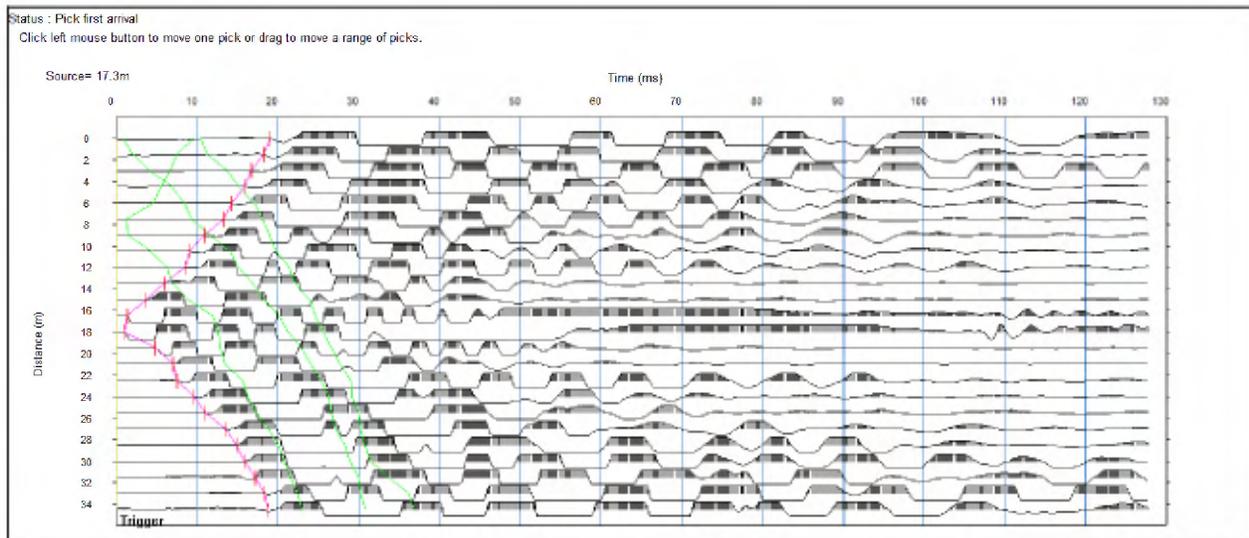


Figura 3.3 Muestra el proceso de identificación de los arribos de onda P a los geófonos (*picking*)

La identificación de las primeras llegadas es esencial en el resultado del modelo, ya que las diferencias de tiempo son del orden de milisegundos, por lo que un milímetro en el sismograma, puede significar un cambio importante en el modelo.

Los pasos para el procesamiento de datos por medio de la metodología RFS son los siguientes:

- Selección (*picking*) de las primeras llegadas de ondas P, para cada evento, generando un archivo de primeras llegadas con todos los eventos de un tendido.
- La unión de las primeras llegadas por medio de una línea, define una dromocrona, y se construyen para cada evento. Dichas dromocronas se grafican en un gráfico distancia/tiempo, en donde se asignan secciones con diferente pendiente a las capas del modelo a construir.
- El paso siguiente corresponde con el cálculo de la inversión, realizado por medio de la metodología de RFS descrita y explicada a detalle en Redpath (1973), en donde se debe de calcular de forma matricial los posibles resultados a dos incógnitas principales las cuales son, la velocidad y la profundidad, en un tiempo dado.

Para la metodología de la tomografía sísmica de refracción, se debe de iniciar con un modelo teórico, el cual se obtiene resolviendo el problema directo de un tendido sintético (figura 3.4), el cual obtiene los datos iniciales de los datos tomados en campo, para luego rastrear iterativamente los rayos refractados a través del modelo (*raytracing*), comparando los tiempos de viaje calculados a los tiempos de viaje medidos, modificando el modelo y repitiendo el proceso hasta que la diferencia entre los tiempos calculados y medidos es minimizada. El fundamento matemático es bastante complejo e incluye niveles avanzados de problemas algebraico-lineales, pero el resultado y la precisión del modelo final se puede medir por medio de la desviación cuadrática media de la

matriz (RMS), en donde una inversión precisa generaría valores bajos entre 0 ms y 5 ms. (Herrera & Cooper, 2010)

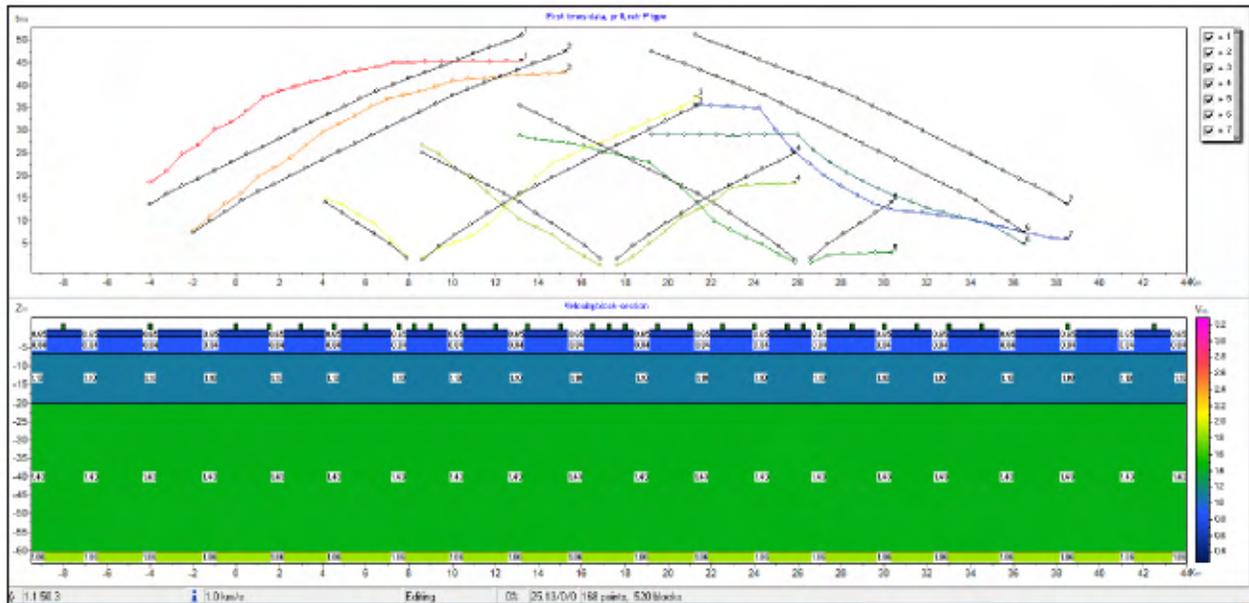


Figura 3.4 Muestra el modelo sintético creado, con sus respectivas dromocronas en la parte superior y de color negro, contrapuestas con la información recogida en el campo, la cual se muestra en color.

Todo esto se realiza con los programas ZondST2D (Kaminsky, 2018) y SeisImager (Geometrics, 2009), con sus módulos Pickwin (utilizado para identificación de arribo de ondas) y Plotrefra (modulo donde se realizan las inversiones tanto para la metodología de sismica de refracción y tomografía sísmica de refracción). El programa ZondST2D se utiliza para la resolución del problema directo, una vez determinado el modelo sintético, se utiliza el programa SeisImager para la inversión.

Limitaciones

Se identificaron ciertas limitaciones para la implementación de la metodología, en los softwares utilizados. En el caso del software ZondT2D, al ser la versión libre del mismo, no es posible ingresar topografía para la elaboración del modelo sintético, además de muchas otras opciones que en la versión de paga si se pueden utilizar. Por otro lado, el módulo Plotrefra del software SeisImager, tiene como limitación que, a la hora de realizar la inversión de la tomografía sísmica de refracción, la información de los tiros offset genera un error excesivo, ya que el software intenta completar información del tiro, donde no se midió. Para mitigar esto, en las interpretaciones de las secciones tomográficas, no se interpretó hasta la profundidad del modelo, sino hasta las profundidades donde fueron dibujados la trayectoria de rayos del modelo.

3.1 Tajo Las Cóncavas

Consideraciones Técnicas

Antes de realizar la toma de datos se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se debe de elegir zonas relativamente planas y en donde se pudieran trazar tendidos lineales. Para este tajo, se tiene como supuesto que las zonas alteradas se encuentran cercanas a las fallas o fracturas principales, por lo que las zonas que se eligieron, atraviesa perpendicularmente las fracturas principales, con el objetivo de observar anomalías geofísicas entre los materiales más cercanos y lejanos de la fractura. Los lugares escogidos se muestran en la figura 3.5.

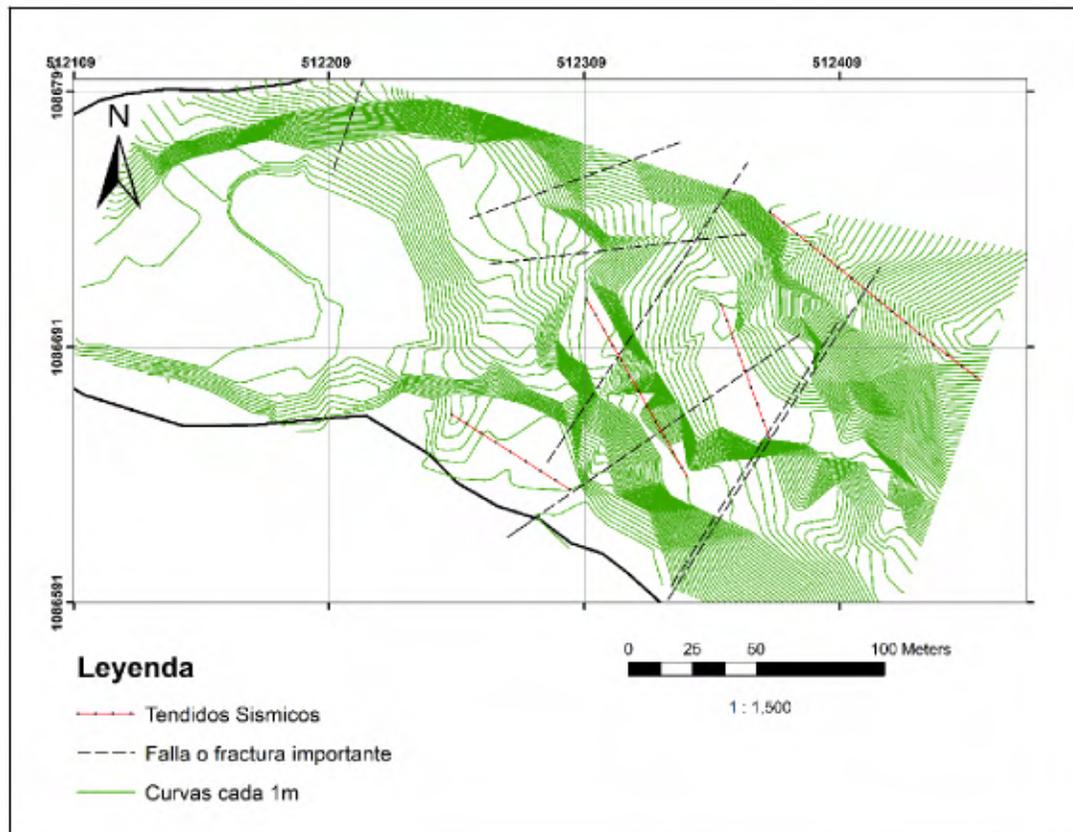


Figura 3.5 Muestra las zonas donde se realizaron tendidos sísmicos, dentro del área de concesión

- Debido al ritmo de extracción del tajo, las zonas de mayor interés operacional, se encuentran al este de la concesión, por lo que la prospección se concentró en este sector del tajo.
- Se escogió como uno de los sitios de prospección, una berma en donde el corte del talud permite observar la roca que se está prospectando, esto con el fin de verificar las

velocidades aproximadas que se manejan para los materiales del tajo, como un tipo de calibración para la posterior interpretación de los materiales, figura 3.6.



Figura 3.6 Muestra la cara de la berma que fue prospectada como verificación de lo observado en los resultados de la sísmica además de identificar las velocidades promedio para cada material.

- La separación entre geófonos se calcula en función de las dimensiones de la anomalía a medir, en este caso los contrastes no exceden los 10 metros, por lo que la separación puede ser de entre 1 m a los 5 m. Lo anterior se definió con base en diferentes estudios y manuales de metodología de refracción sísmica, como en Cavada (2000) o Herrera & Cooper (2010), sin embargo, no existe un consenso único para definir este aspecto.
- Para la generación de ondas compresionales se tiene como opción 2 tipos de fuentes:
 - Impacto por mazo, el cual genera ondas con frecuencias relativamente altas, mismas que son susceptibles a disiparse en medios no consolidados y que generalmente no llegan a grandes profundidades, sin embargo, son aptas para mediciones en anomalías de pequeñas dimensiones y someras;
 - Por otro lado, se utilizarán explosivos como fuente, los cuales, generan ondas de frecuencias más bajas, lo que facilita la transmisión de ondas en el medio, permitiendo que se puedan obtener datos a mayor profundidad y de mejor resolución, su única desventaja es que tienden a desestimar anomalías pequeñas. Para este estudio se utilizan las dos fuentes, con lo que se espera comparar los resultados. Este último tipo de fuente, solo pudo ser utilizado en una ocasión para el presente estudio, ya que su realización supone gran cantidad de explosivos y accesorios para su iniciación, por lo que el costo de realizar un tendido con esta fuente es relativamente alto.
- El arreglo contempla tiros simétricos, tanto dentro como fuera del arreglo. Los tiros fuera del arreglo tienen como objetivo prospectar las capas profundas, mientras que los tiros

internos del arreglo, pretenden prospectar la velocidad de las capas superficiales (Figura 3.7).

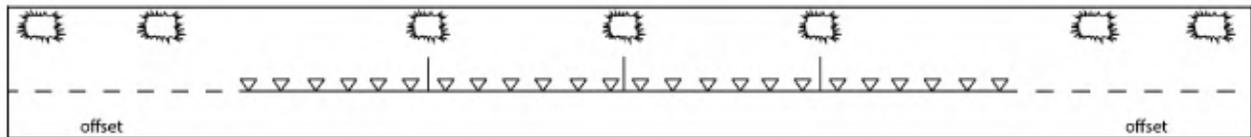


Figura 3.7 Muestra el arreglo utilizado en la mayoría de los tendidos sísmicos realizados en este estudio.

- Los tiros fuera del arreglo (offset), se alejan del mismo en función de la profundidad que se desea prospectar, la fuente que se utilice como generadora de ondas P y la distancia que se esté cubriendo con el arreglo propuesto. En cada uno de los tendidos realizados se especifica la distancia a la que se realizaron los tiros offset para cada caso.

Resultados

Se realizaron 3 tendidos con mazo como fuente generadora de ondas P y 1 con explosivos como fuente generadora de ondas P. Las dromocronas expresadas en el gráfico tiempo-distancia para cada uno de los tendidos se adjuntan en el apéndice 2 del presente informe.

1. Tendidos con Mazo

- Tendido 2: Se realizó con un espaciamiento de 1,5 m entre cada geófono, los tiros offset fueron a 8 y 4 metros de distancia del tendido. Se realizaron 7 tiros en total. El tendido tuvo una extensión de 34,5 m y atraviesa 2 fracturas importantes identificadas.
 - Metodología de Refracción Sísmica: El perfil de las velocidades aproximadas se observa a continuación. Figura 3.8

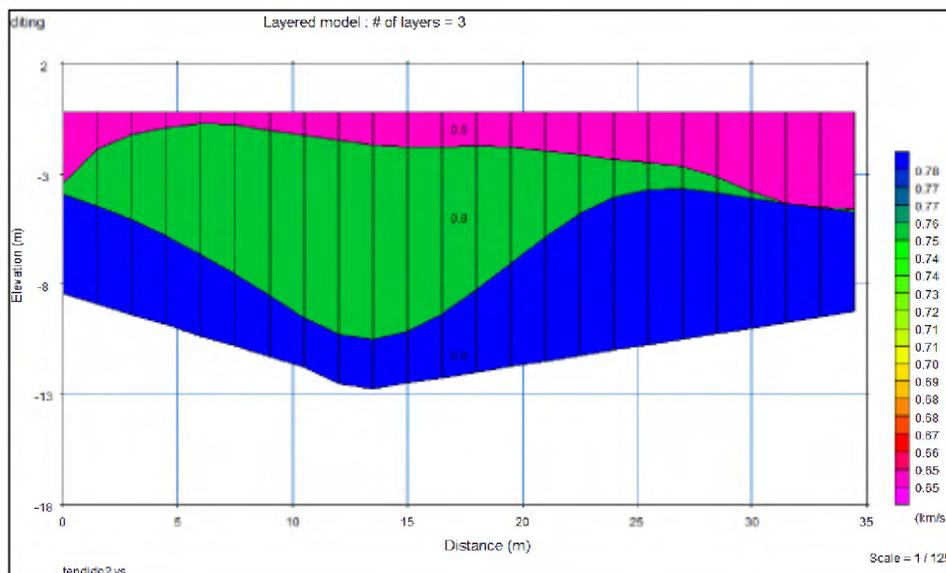


Figura 3.8 Muestra el perfil de velocidades resultantes de aplicar la metodología RFS

Se utilizó un modelo de 3 capas, en donde el modelo arroja prácticamente sólo 2 capas de 0,6 y 0,8 km/s. Esto sugiere que la probabilidad de encontrar material competente (superior a 1,7 km/s) en esta zona es baja.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

Con base en el resultado de la metodología anterior se obtiene una visualización preliminar de lo que se puede encontrar en el subsuelo. Dicho perfil de velocidades muestra únicamente dos capas, por lo que, para darle un mayor rango de acción a la metodología de tomografía sísmica de refracción, se creó un modelo sintético, el cual consiste en capas superficiales de 0,6 km/s, como inicialmente lo plantea la metodología anterior, hasta capas de 1,5 km/s, las cuales corresponderían con materiales más competentes, como se muestra a continuación. Figura 3.9

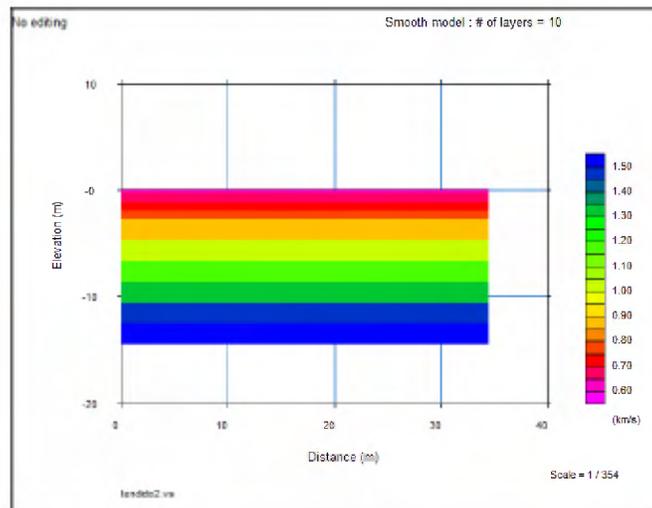


Figura 3.9 Muestra el modelo sintético utilizado en la metodología de SRT, para el tendido 2.

Al aplicar la inversión con el modelo sintético basado en la metodología de RFS, el valor del error es mucho mayor (valor de error de 9,84 ms), al valor de error para la inversión utilizando el modelo sintético mostrado en la imagen 3.9 (valor de error de 2,38 ms). Lo que significa que la metodología de RFS en esta ocasión no representa un modelo que aproxime mejor la situación real del subsuelo, como si lo hizo la inversión con el modelo sintético de la imagen 3.9.

El perfil resultante de la aplicación de la metodología de SRT, se muestra en la figura 3.10

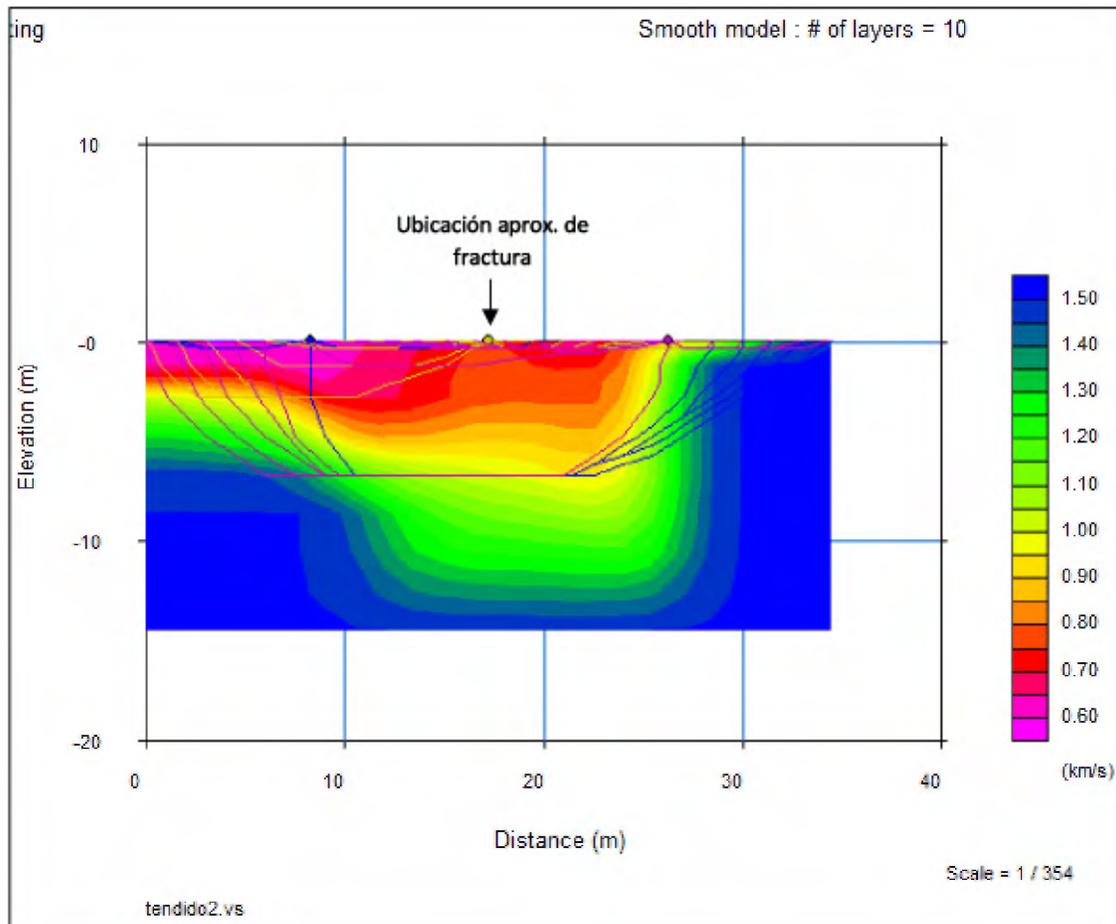


Figura 3.10 Muestra el modelo resultante de velocidades, aplicando la metodología SRT, para el tendido 2.

Analizando el perfil mostrado en la figura 3.10, se tienen velocidades de 0,6 a 0,9 km/s hasta profundidades de 5 a 8 metros, correspondiente con materiales poco competentes, como suelo, material meteorizado o zonas altamente fracturadas, mientras que a los lados se pueden observar velocidades máximas de 1,50 km/s, correspondientes con roca competente.

- Tendido 3: Se realizó con un espaciamiento de 4 m entre cada geófono, los tiros offset fueron a 4 y 2 metros de distancia del tendido. Se realizaron 9 tiros en total, 4 fuera del tendido y 5 dentro. Este tendido tiene información de topografía. El tendido tuvo una extensión de 92 m y atraviesa 2 fracturas importantes identificadas. Este tendido sirve como control para observar los materiales prospectados y poder inferir sus velocidades.
 - Metodología de Refracción Sísmica: la siguiente imagen muestra el perfil de velocidades aproximadas, luego de la aplicación de la metodología. Figura 3.11

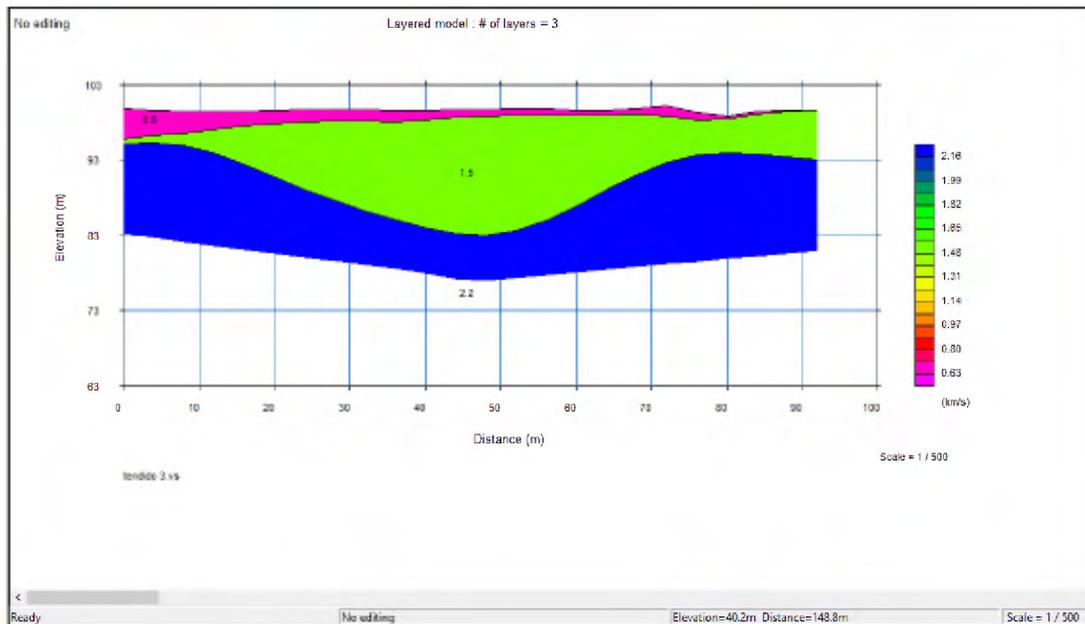


Figura 3.11 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de aplicar la metodología de refracción sísmica.

En la figura anterior, se muestran espesores considerables de material con velocidades de 1,5 km/s y un basamento de materiales con velocidades de 2,2 km/s. Una capa superficial de muy poco espesor, representaría un relleno de suelo, con velocidades de 0,6 km/s.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

Para la inversión de este tendido, se utilizó como modelo teórico, el modelo de velocidades arrojado por la metodología de RFS, resultando en el siguiente modelo teórico. Figura 3.12

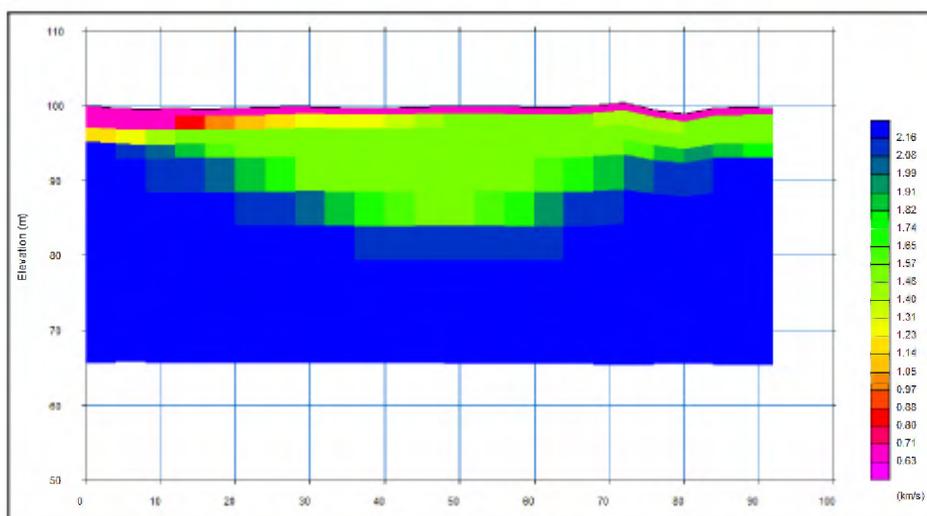


Figura 3.12 Muestra el modelo teórico a utilizar en la metodología de SRT, basado en el resultado de la metodología de RFS

Aplicando la inversión, se tiene el siguiente resultado, con un error RMS de 1,9 ms. Figura 3.13

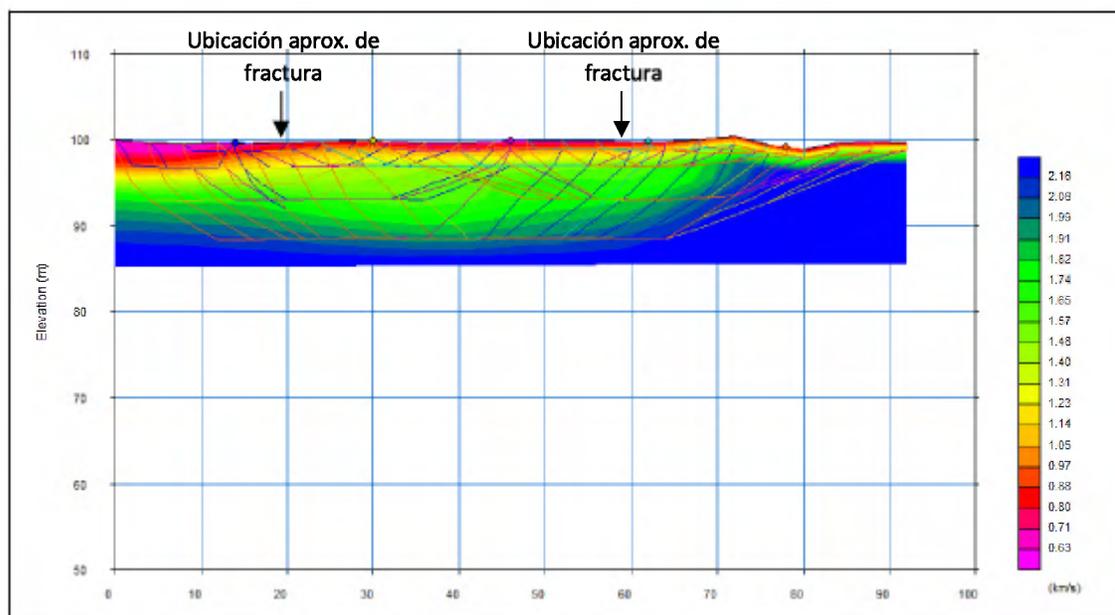


Figura 3.13 Muestra el perfil resultante luego de la metodología SRT, para el tendido 3

En la figura anterior, se evidencia una capa superficial de velocidades bajas, seguido por una capa que se extiende parcialmente por el tendido, con velocidades de 1,3 a 1,4 km/s, finalmente se tiene materiales con velocidades de más de 2 km/s distribuidos en la base y al final del perfil, siendo en este parte más somero que en el resto del modelo.

- Tendido 4: Se realizó con un espaciamiento de 1,5 m entre cada geófono, los tiros offset fueron a 2 y 4 metros de distancia del tendido. Se realizaron 7 tiros en total. El tendido tuvo una extensión de 34,5 m.
 - Metodología de Refracción Sísmica: Al igual que con los tendidos anteriores se tiene el perfil de velocidades para este tendido (figura 3.14)

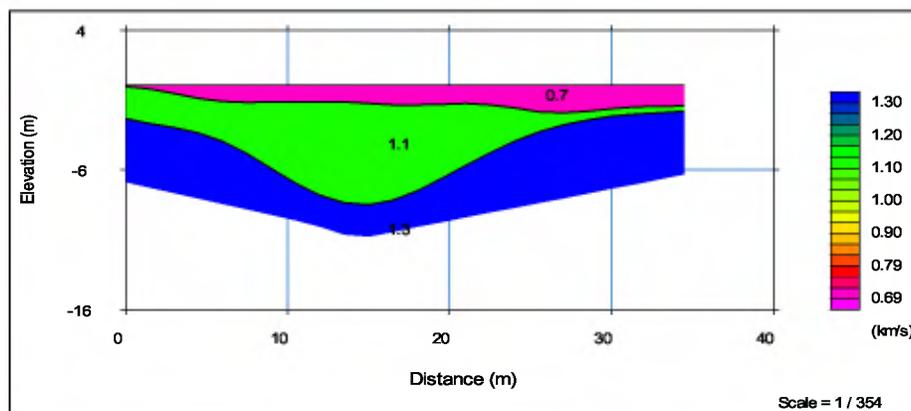


Figura 3.14 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de aplicar la metodología SRF, para el tendido 4.

En el perfil anterior se muestran capas superficiales de 0,7 km/s de poco espesor, mientras que en profundidad se identifican capas de 1,1 a 1,3 km/s, prácticamente a lo largo de todo el tendido.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

Para la inversión topográfica de este tendido, se utilizó como modelo teórico el modelo generado por el resultado de la metodología de RFS. El resultado de la aplicación de la metodología SRT se observa en el siguiente perfil (Figura 3.15), con un error de 1,94 ms.

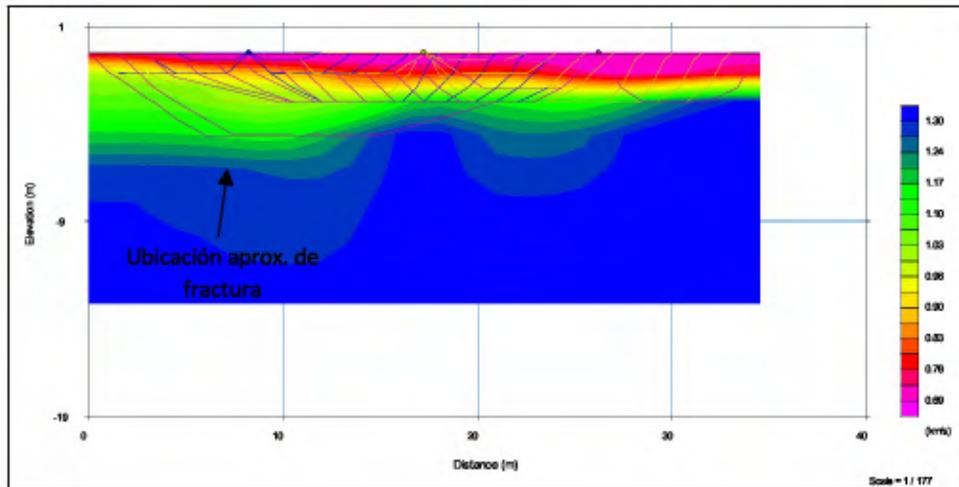


Figura 3.15 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 4.

En el perfil anterior se observa capas superficiales de 0,6 a 0,8 km/s para luego distribuir materiales con velocidades aparentes de 1 hasta 1,3 km/s.

2. Tendidos con Explosivo

- **Tendido 1:** Se realizó en la parte más alta del tajo, y a diferencia de los otros tendidos, este se realizó con un espesor considerable de suelo, generando un buen contraste entre las velocidades de propagación del medio rocoso y el espesor de suelo. Se realizó con un espaciamiento de 4 m entre geófonos, los tiros offset fueron a 20 y 10 m de distancia fuera del tendido. La topografía del área de prospección es de topografía quebrada y fuertes pendientes, por lo que la aplicación de la metodología convencional de RFS, no cumpliría varios de los principales requerimientos de dicha metodología, es aquí donde la implementación de la tomografía sísmica de refracción vendría a solucionar el problema.

- Metodología de Refracción Sísmica:

Al realizar esta metodología en un tendido con topografía muy quebrada, el error de la matriz es bastante alto, dando un valor de 15 ms, esto se debe a que a metodología considera una superficie

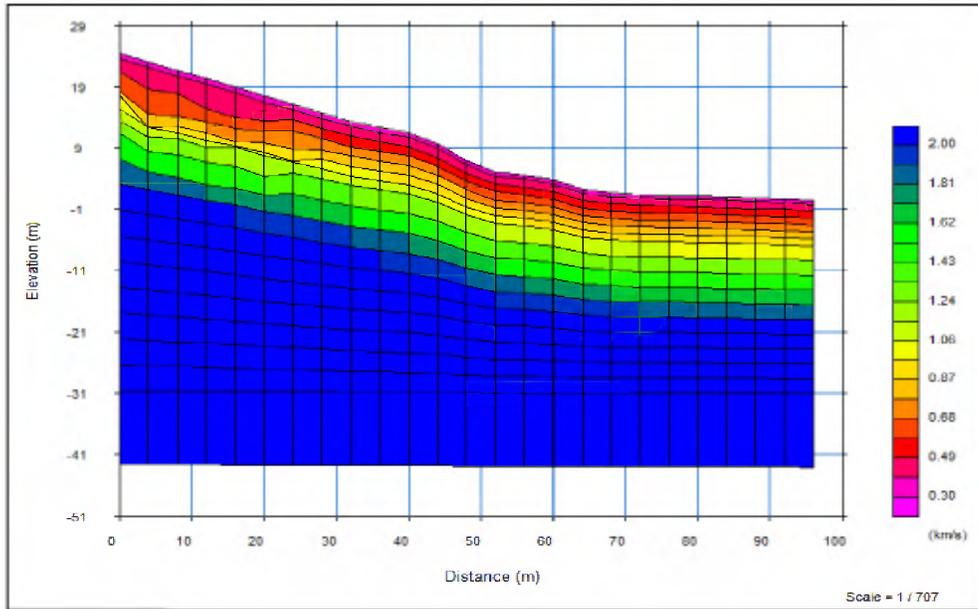


Figura 3.17 Muestra el modelo sintético resultante para el tendido 4.

Dicho modelo fue sometido a la inversión, resultando en el siguiente modelo, con un error de 2,7 ms. Figura 3.18

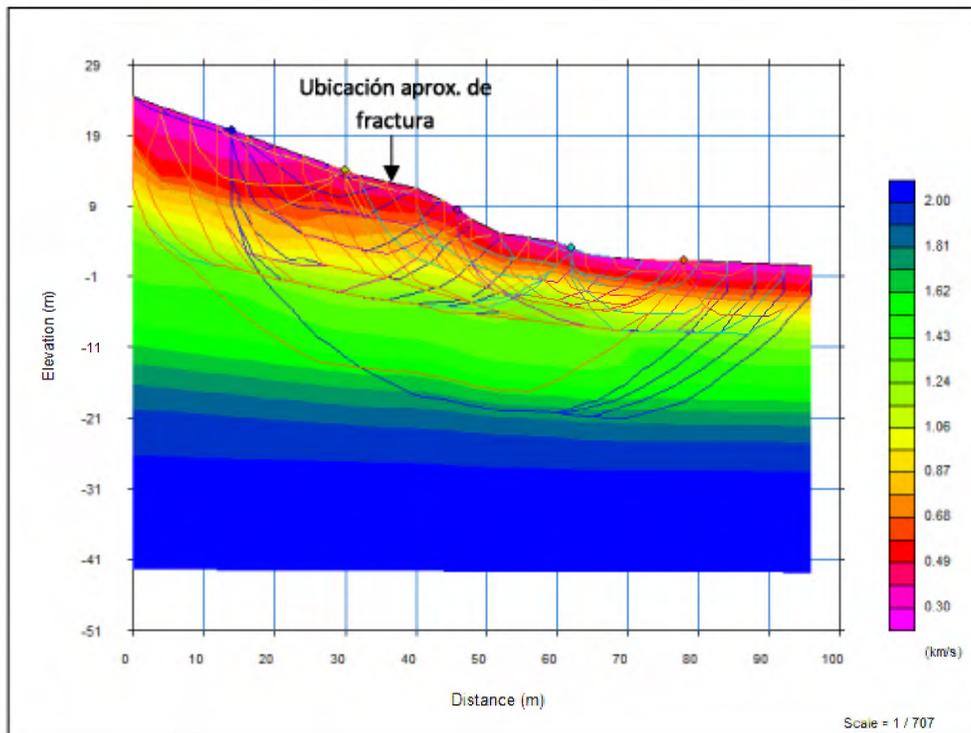


Figura 3.18 Muestra el perfil resultante luego de aplicar la metodología SRT, para el tendido 1.

Se observa como las capas de velocidades bajas incrementan en profundidad, al igual que las capas de velocidades intermedias como 1,2 y 1,4 km/s. En profundidad se alcanzan valores de 1,8 km/s consistentes con los valores de roca sana.

Con la información generada por medio de los perfiles anteriores, se podrán generar perfiles litológicos donde se infiera el tipo de roca, con respecto a las velocidades obtenidas. Esta información será incluida en el cálculo de reservas de material aprovechable.

3.2 Tajo San Buena

De igual manera, los estudios geológicos realizados en este tajo, evidenciaron una serie de discontinuidades importantes las cuales pueden generar zonas con contrastes físicos importantes, como por ejemplo la formación de cavernas por la disolución de la caliza ante agentes erosivos, o la formación de zonas mineralizadas, situaciones que en ambos casos generan una dificultad para los procesos extractivos, por lo que modelar estos escenarios a lo largo del macizo, otorgaría información importante a la hora de realizar la extracción de los materiales. Mediante la aplicación de las metodologías geofísicas planteadas en este trabajo, se pretende identificar dichos contrastes físicos, con el fin de completar aún más el modelo geológico del macizo.

Además, conociendo las posibles zonas de fracturación o de zonas con cavernas, se puede ajustar el cálculo de reservas, así como ajustar el diseño de explotación en función de las características encontradas.

Al igual que en el tajo Las Cóncavas, el equipo a utilizar es un equipo de sismica de refracción Stratavisor NZ, de 24 canales, geófonos de periodo corto. Se utilizará el programa informático SEISIMAGER y ZondST2D, para el procesamiento de los datos obtenidos en campo. También se utilizará dos tipos de fuentes, el impacto de un mazo sobre una placa de metal, y explosivos enterrados a un metro en profundidad. La metodología y las consideraciones técnicas para el estudio en el Tajo San Buena Luis se explican a continuación.

Consideraciones Técnicas

Antes de realizar la toma de datos se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se eligieron zonas relativamente planas y en donde se pudieran trazar tendidos lineales. Para este tajo, se tiene como supuesto que los contrastes físicos en el macizo se encontrarían cercanos a las zonas de fracturamiento principal o zonas de caverna, por lo que las zonas que se eligieron para prospectar, atraviesan zonas con estas características. Los lugares escogidos se muestran en la figura 3.19.

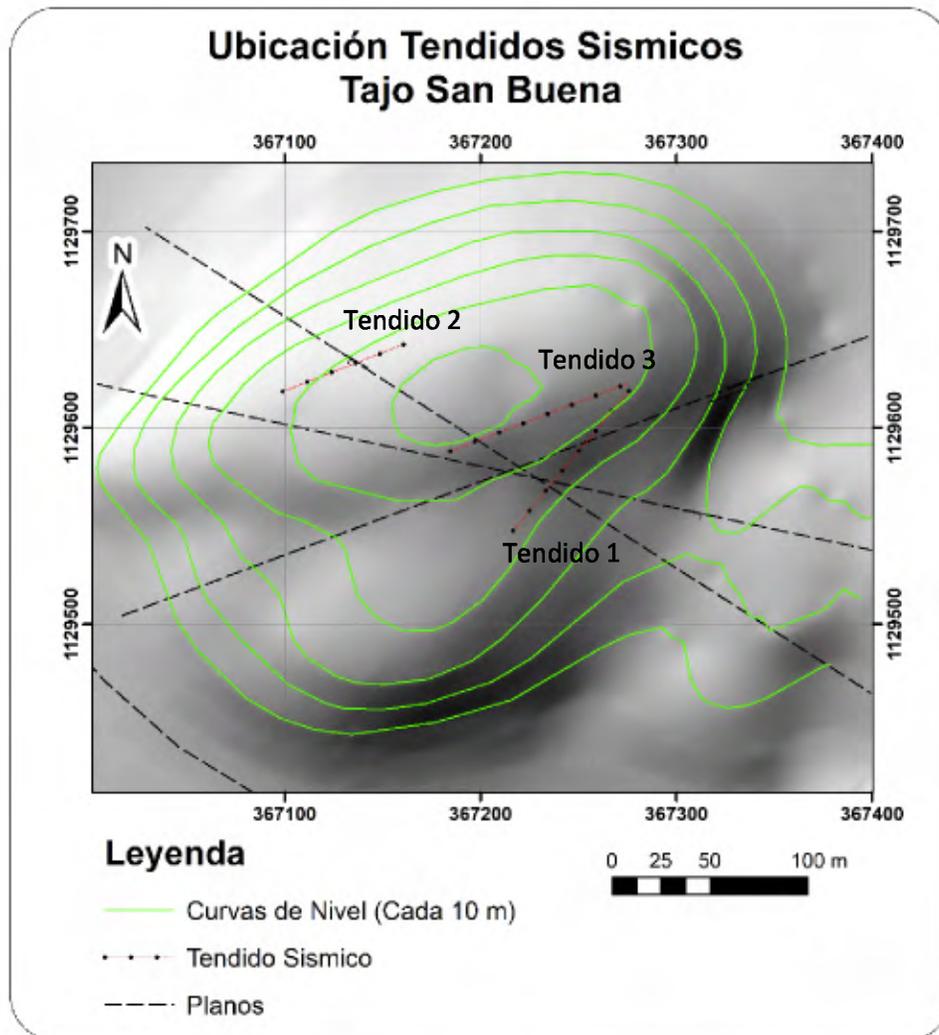


Figura 3.19 Muestra las zonas donde se realizaron tendidos sísmicos, dentro del área de concesión.

- Debido al acceso y a las zonas en donde se planea extraer inicialmente en el cerro, se prospectaron principalmente la zona norte del cerro y un camino de acceso a su parte más elevada.
- La separación entre geófonos se calcula en función de las dimensiones de la anomalía a medir, en este caso los contrastes no exceden los 10 metros, por lo que la separación puede ser de entre 1 m a los 5 m.
- Para la generación de ondas se tiene como opción 2 tipos de fuentes: impacto por mazo, el cual genera ondas con menor frecuencia, mismas que son susceptibles a disiparse en medios no consolidados y que generalmente no llegan a grande profundidades, sin embargo son aptas para mediciones de anomalías de pequeñas dimensiones; por otro lado se utilizarán explosivos como fuente, los cuales, generan ondas de frecuencias más bajas, lo que facilita la trasmisión de ondas en el medio, permitiendo que se puedan obtener datos a mayor profundidad y de mejor resolución, su única desventaja es que desestima anomalías pequeñas, las cuales pueden brindar información importante . Para este estudio

se utilizan las dos fuentes, con lo que se espera comparar los resultados. Este último tipo de fuente sólo pudo ser utilizado en una ocasión para el presente estudio, ya que su realización supone gran cantidad de explosivos y accesorios para su iniciación, por lo que el costo de realizar un tendido con esta fuente es relativamente alto.

- El arreglo contempla tiros simétricos, tanto dentro como fuera del arreglo. Los tiros fuera del arreglo tienen como objetivo prospectar las capas profundas, mientras que los tiros internos del arreglo, pretenden prospectar la velocidad de las capas superficiales (Figura 3.20).

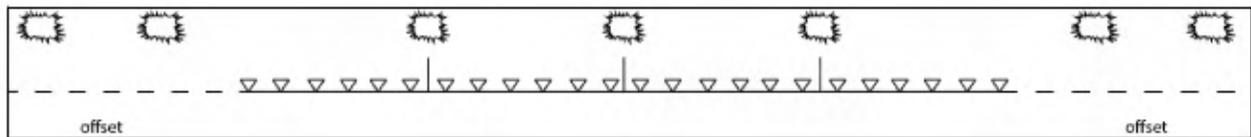


Figura 3.20 Muestra el arreglo utilizado en la mayoría de los tendidos sísmicos realizados en este estudio.

- Los tiros fuera del arreglo (offset), se alejan del mismo en función de la profundidad que se desea prospectar, la fuente que se utilice como generadora de ondas y la distancia que se esté cubriendo con el arreglo propuesto. Cada tendido especifica la distancia a la que se realizó los tiros offset.

Resultados

Se realizaron 2 tendidos con mazo como fuente generadora de ondas P y 1 con explosivos como fuente generadora de ondas P. Las domocronas expresadas en el gráfico tiempo-distancia para cada uno de los tendidos se adjuntan en el apéndice 3 del presente informe.

3. Tendidos con Mazo

- Tendido 1: Se realizó con un espaciamiento de 3 m entre cada geófono, los tiros offset fueron a 5 y 10 metros de distancia del tendido. Se realizaron 7 tiros en total. El tendido tuvo una extensión de 70 m y atraviesa 2 zonas de fractura inferidas importantes.
 - Metodología de Refracción Sísmica: El perfil de las velocidades aproximadas se observa a continuación, dicha inversión tuvo un error RMS de 0,594 ms (Figura 3.21)

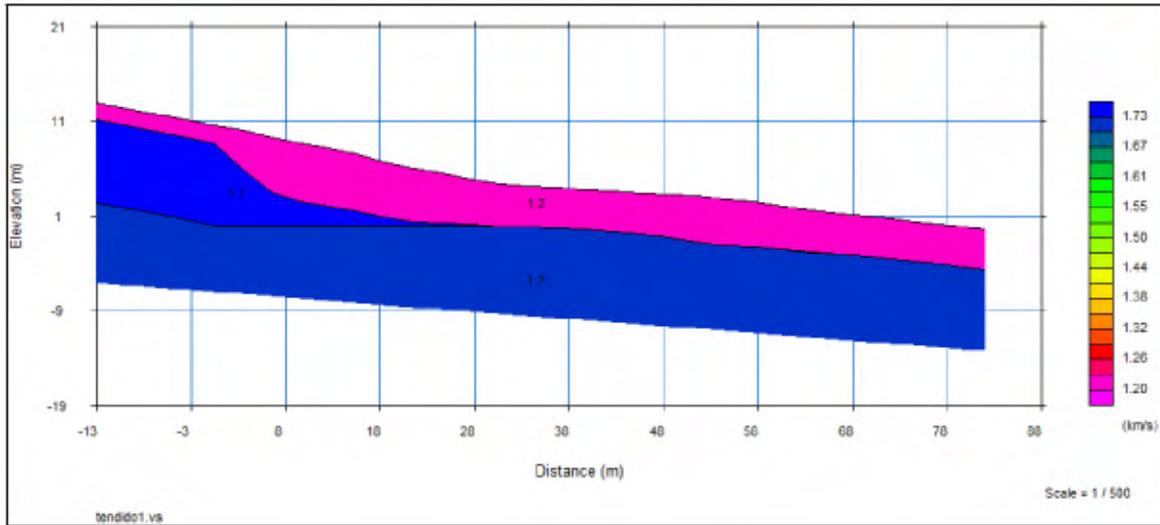


Figura 3.21 Se muestra el perfil resultante de la aplicación de SRF, para el tendido 1

El anterior perfil se resolvió por medio de un modelo de 3 capas, sin embargo, el resultado arrojó 2 de con igual velocidad, de 1,7 km/s, mientras que la capa superior, arroja una velocidad de 1,2.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

El modelo sintético se elaboró con el programa ZondT2D, utilizando la resolución del problema directo para asemejar el modelo a lo datos medidos, dicho modelo se muestra a continuación (Figura 3.22)

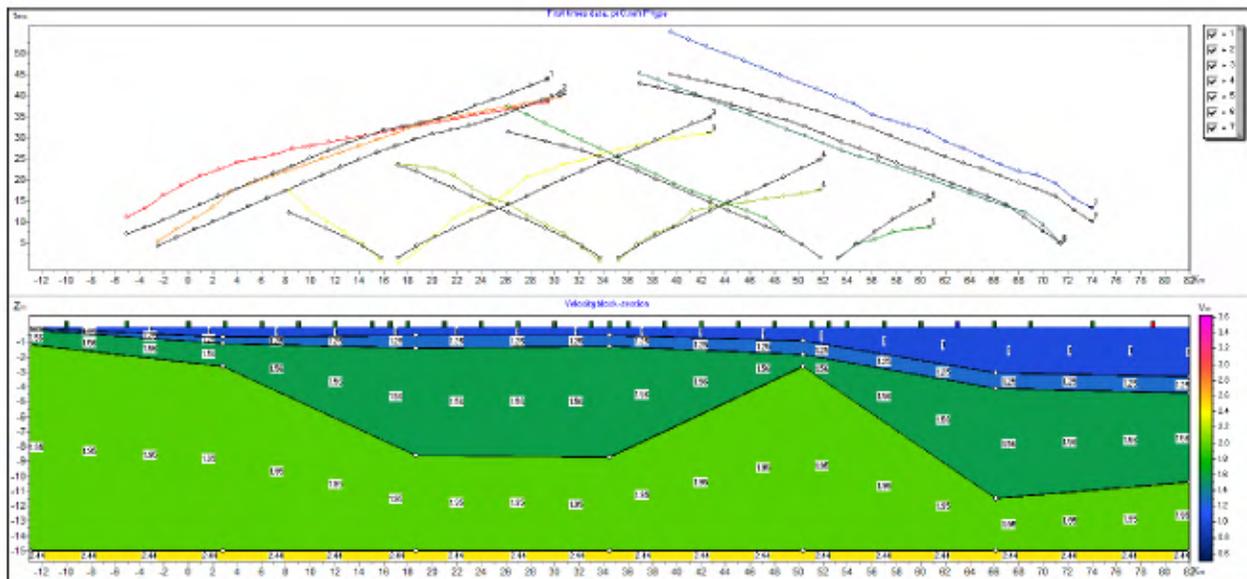


Figura 3.22 Muestra el proceso de resolución del problema directo, para la confección del perfil sintético, el cual será usado en la metodología SRT.

Pasando este modelo al software utilizado para realizar la tomografía se puede obtener la inversión basada en el modelo sintético, obteniendo un error RMS de 1,12 ms (figura 3.23).

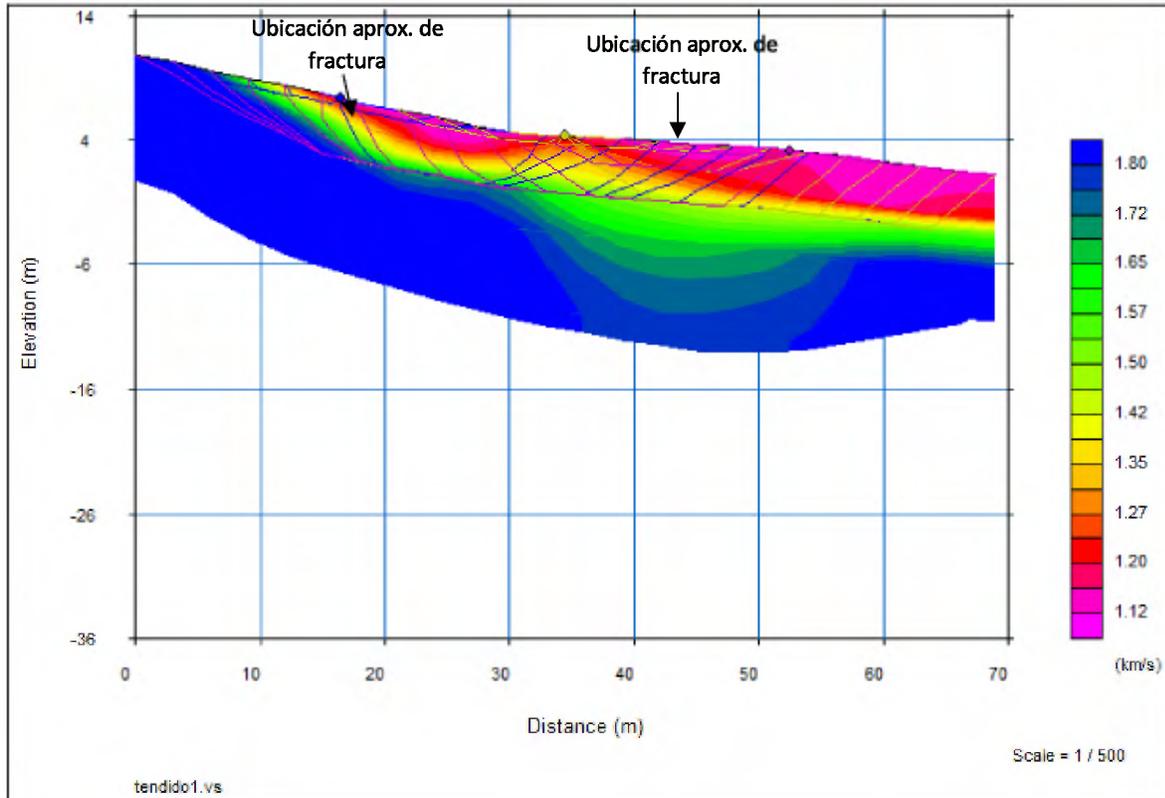


Figura 3.23 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 1.

La figura anterior muestra el trazado de rayos resultante para dicha inversión, siendo un procedimiento paralelo a la tomografía. Analizando el perfil anterior, se tienen velocidades de 1,2 km/s a 1,35 km/s en las capas superiores lo que correspondería con un relleno de material rocoso, competente, pero con muchos espacios de aire, mientras que, hacia la izquierda del perfil la velocidad aumenta hasta rangos de 1,8 km/s, donde se infiere como el valor de velocidad para la caliza intacta.

- Tendido 3: Se realizó con un espaciamiento de 2,5 m entre cada geófono, los tiros offset fueron a 10 y 20 metros de distancia del tendido. Se realizaron 9 tiros en total, 4 fuera del tendido y 5 dentro. El tendido tuvo una extensión de 58 m y atraviesa 1 fractura importante identificada.
 - Metodología de Refracción Sísmica: la siguiente imagen muestra el perfil de velocidades aproximadas, luego de la aplicación de la metodología. Para la inversión de este tendido se tuvo un error de 1,5 ms (Figura 3.24)

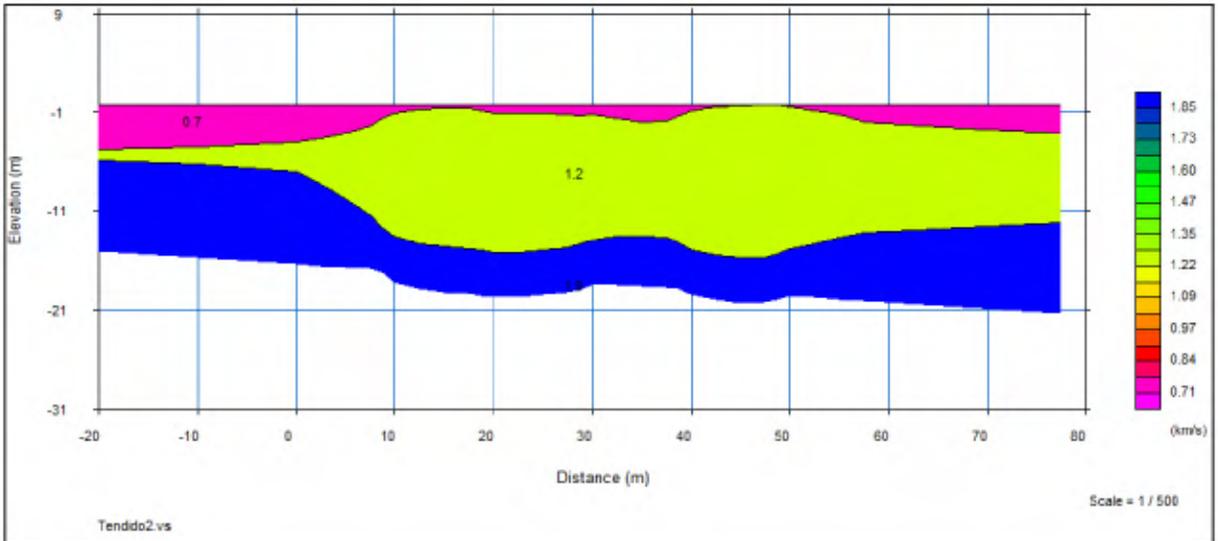


Figura 3.24 Muestra el perfil de velocidades luego de la aplicación de la metodología SRF.

En la figura anterior, se muestra una capa superficial de baja velocidad seguida por una de gran tamaño con velocidades de 1,2 km/s, mientras que la capa más profunda posee velocidades de 1,9 km/s, velocidad que concuerda con la estimada para la caliza sana.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

Para la inversión de este tendido, se utilizó como modelo teórico, el modelo de velocidades arrojado por la metodología de RFS.

Aplicando la inversión, se tiene el siguiente resultado, con un error RMS de 2,7 ms (figura 3.25)

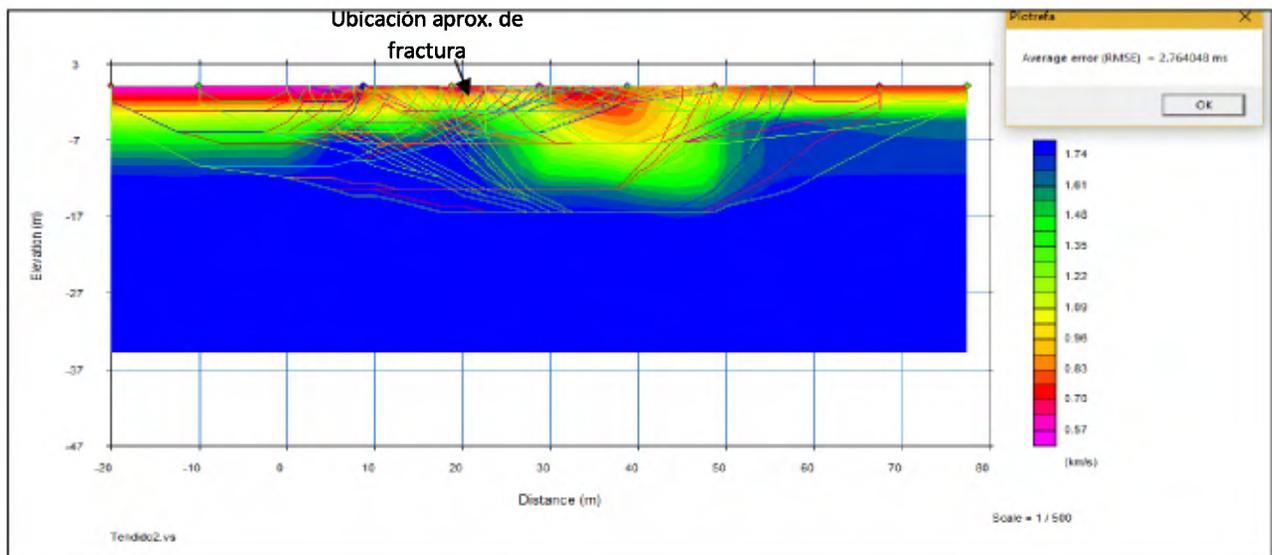


Figura 3.25 Muestra el perfil resultante de la aplicación de la metodología SRT, para el tendido 3.

En la figura anterior, se evidencia una capa superficial de velocidades bajas, seguido por una capa que se extiende parcialmente por el tendido, con velocidades de 1 a 1,4 km/s, finalmente se tiene materiales con velocidades de más de 1.7 km/s distribuidos en la base y al final del tendido, siendo en este parte más somero que en el resto del tendido. Se evidencia un contraste fuerte al centro del tendido, el cual sería consistente con una zona de caverna, la cual dimensiones de alrededor de 15 m de largo y 10 de profundidad en su parte más profunda.

4. Tendidos con Explosivo

- Tendido 2: Se realizó con un espaciamiento de 3 m entre geófonos, se realizaron tiros, 2 fuera del tendido y 2 dentro del mismo. La topografía del área de prospección tiene topografía relativamente uniforme.
 - Metodología de Refracción Sísmica:

La siguiente imagen muestra el perfil de velocidades aproximadas, luego de la aplicación de la metodología. Para la inversión de este tendido se tuvo un error de 0,5 ms (figura 3.26)

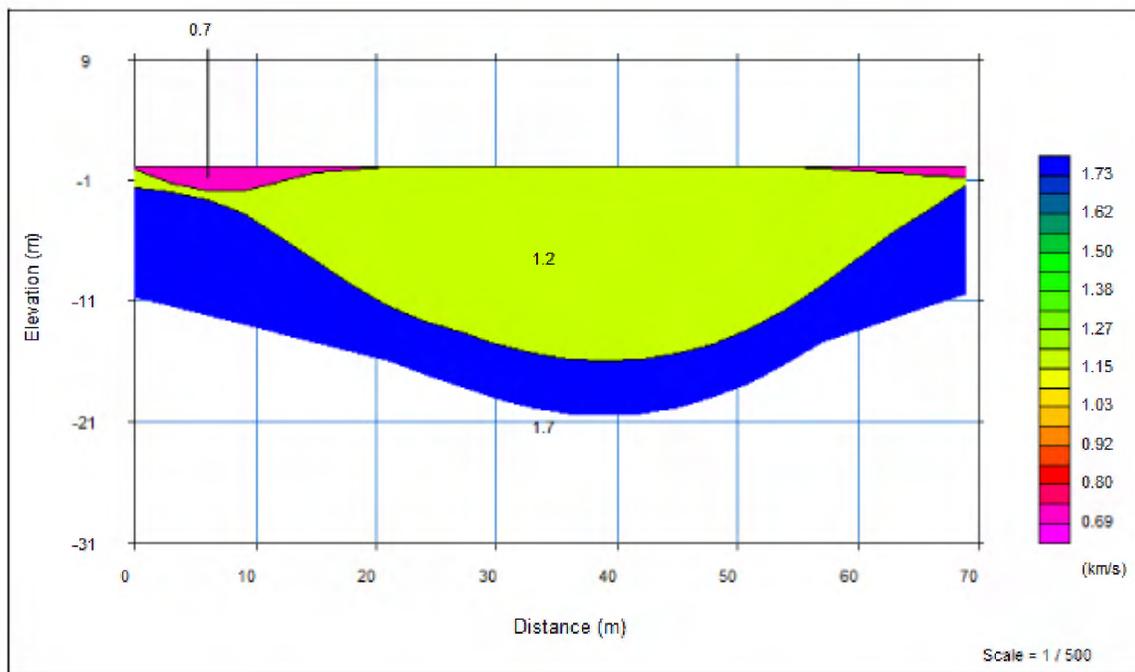


Figura 3.26 Muestra el perfil de velocidades resultante luego de la aplicación de la metodología SRF, para el tendido 2.

Se observa una velocidad máxima de onda de 1,7 km/s, valor que correspondería con una caliza sana, en el tajo estudiado, una capa intermedia de velocidad promedio de 1,2 km/s, y una capa somera de baja velocidad muy poca profundidad.

- Metodología: Tomografía Sísmica de Refracción.

Por medio del programa ZondST2D se realiza una construcción del modelo teórico, utilizando la resolución del problema directo, generando un modelo que se acerque a la información obtenida en el campo, como se muestra en la figura 3.27

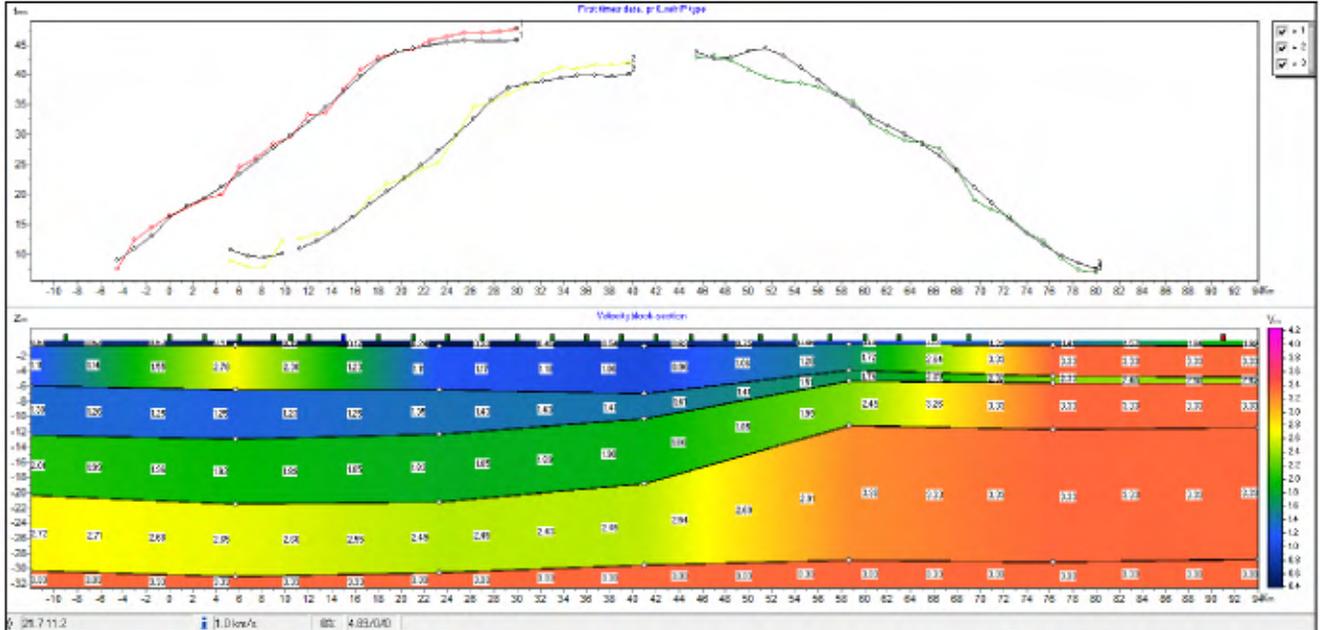


Figura 3.27 Muestra el proceso de la resolución del problema directo, mediante la edición y modificación de espesores y velocidades de las capas del modelo inferior, para la generación de un set sintético, el cual será utilizado en la metodología SRT.

Por medio de la manipulación de las capas y sus velocidades, se puede observar las domocronas que dicho modelo generaría, teniendo una noción del modelo que más se ajustaría a la realidad y que por lo tanto generaría el menor error a la hora de realizar la inversión.

Inicialmente se genera el modelo teórico, el cual considera espesores variables de velocidades bajas correlacionales con materiales meteorizados en sus primeros estratos, los cuales en la parte izquierda del perfil se mantienen hasta profundidades de hasta 10 metros. El basamento posee velocidades de hasta 2,5 km/s.

La construcción del modelo teórico para utilizar en la metodología SRT se muestra en la siguiente figura (figura 3.28)

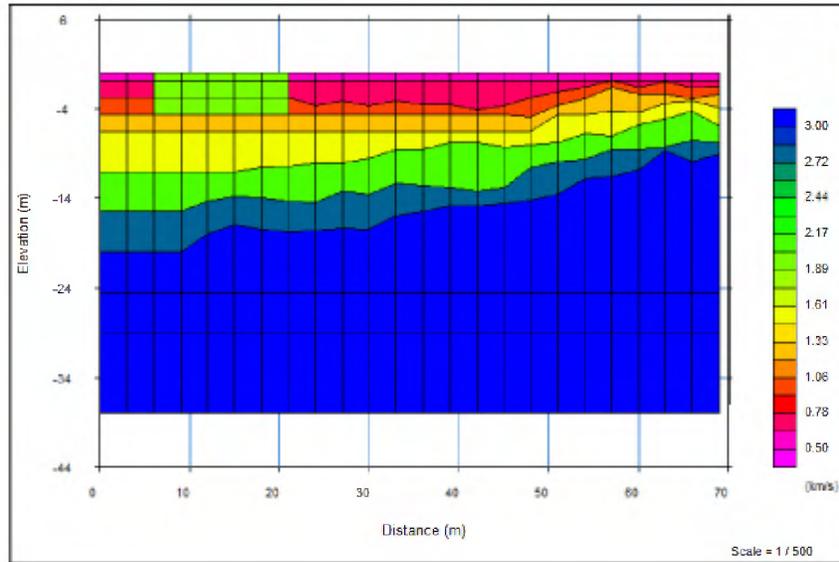


Figura 3.28 Muestra el modelo sintético que se utilizará en la metodología SRT, basado en la resolución del problema directo.

Dicho modelo fue sometido a la inversión, resultando en el siguiente modelo, con un error de 1,97 ms (Figura 3.29).

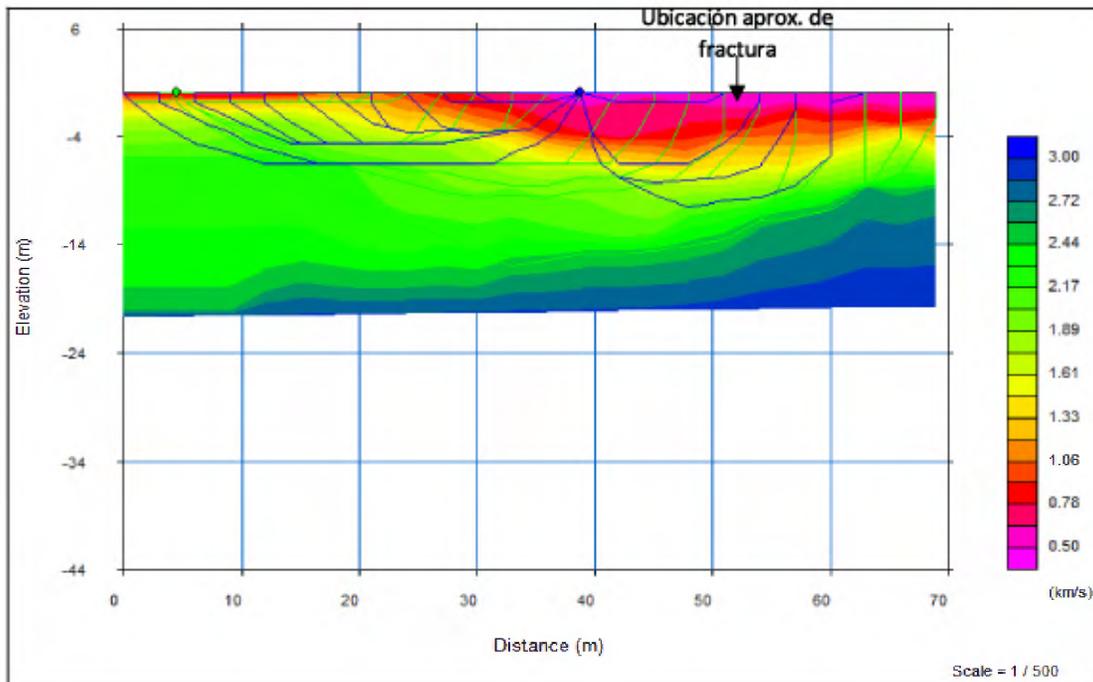


Figura 3.29 Muestra el perfil resultante de la metodología SRT, para el tendido 2.

Se observa cómo se tiene una base de roca competente con velocidades de 2 a 2,5 km/s, las capas más superficiales muestran velocidades más bajas, correspondientes con materiales más fracturados y menos competentes.

4. Integración y discusión de resultados por caso

Una vez realizados los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, se puede tener un panorama más claro, de las variables en juego para un adecuado proceso de extracción y explotación de recursos minerales, en el presente apartado se pretende integrar los resultados de los estudios anteriores, para terminar con los diseños de cantera y los respectivos cálculos diferenciados de reservas del cual se desprendieron conclusiones y apreciaciones necesarias para la correcta optimización de extracción de recursos.

4.1 Tajo Las Cóncavas

Sobre la geología del frente de extracción activo del Tajo Las Cóncavas se concluye la presencia de 2 flujos ígneos establecidos y bien diferenciados, tanto en muestras macro como microscópicamente. El flujo superior se clasifica como una andesita afanítica porfirítica, de color gris claro, con la particular característica de poseer grandes cantidades de zeolitas en su composición; mientras que el flujo inferior se clasifica como una andesita afanítica, siendo una roca gris oscura afanítica con cristales milimétricos en su matriz. En condiciones sanas, ambos flujos representan material aprovechable para el procesamiento y venta de material, siendo apto y competente para generar granulometrías de diferentes tamaños, por medio del cribado y triturado.

Sin embargo, existen zonas del frente de explotación en donde se evidencia una fuerte alteración química, debido a la presencia de minerales secundarios como zeolitas, malaquita, calcita, calcosina, y gran cantidad de arcillas, paragénesis que sugiere la zeolitización como alteración principal. La presencia de dicha alteración representa una degradación de la roca caja y roca circundante, tornando friable, deleznable y muy poco competente, lo que supone un problema en la operación del tajo, significando áreas donde el material no cumple con las propiedades físicas para ser utilizado como agregado, generando problemas a la hora de su extracción. El origen y génesis de esta alteración podría tener componentes hidrotermales, en donde los agentes químicos surgieron de un ascenso hidrotermal local, o podría tratarse de minerales primarios de origen magmático presente en las rocas, los cuales con la infiltración de agua meteórica han reaccionado y se han meteorizado químicamente. La razón de su origen puede ser motivo de estudios más completos en esta rama de la geología, sin embargo, el problema planteado inicialmente es la identificación y caracterización de dichas zonas alteradas, por lo que se dispuso a medir las diaclasas principales del tajo, por donde los fluidos, fueran meteóricos o hidrotermales, pudieran transitar, reaccionar y generar la alteración que se observa.

Estructuralmente el tajo presenta evidencias de fracturas con movimiento, sugiriendo planos de falla considerables, los cuales atravesarían gran parte del frente de extracción, con movimientos relativos de desplazamiento de rumbo. Estos planos y fracturas que se identificaron a lo largo del tajo se consideraron como la principal familia de fracturas del tajo. Debido a que existe una disyunción columnar, es posible encontrar varias familias adicionales de diaclasas, pero su

continuidad no es considerable, por lo que fueron clasificadas como familias secundarias. Tras realizar mediciones a lo largo del frente de extracción se identificó la dirección predominante de las discontinuidades agrupadas en la familia principal. Dicha orientación es de 211° a 221° aproximadamente.

Con base en la información geológica y estructural agrupada, se propone un modelo en donde, las zonas con mayor concentración de minerales de alteración, se encuentran cercanos a discontinuidades identificadas dentro de la familia principal (en algunas zonas se extiende hasta 5 metros lejos de la falla o fractura principal), como se observa en la figura 4.1, donde una zona importante de alteración se encuentra muy cercana a un plano de falla identificado.



Figura 4.1 Muestra la falla dextral y las zonas con alteración hidrotermal cercanas a la misma.

Según los datos recogidos en campo se genera el mapa geológico de la concesión de la cantera Las Cóncavas, donde se muestran algunas de las zonas más importantes que muestran alteración, y que se observan aflorando en el macizo (figura 4.2)

En él se muestra la disposición de los 2 flujos reconocidos en la zona de extracción, así como las principales zonas de alteración identificadas, definidas como importantes, ya que alcanzan extensiones de hasta 10 metros de ancho por 5 a 8 de espesor. La extensión o el largo de estas zonas se infiere que se disponen en orientación a las familias principales de fracturas existentes en el tajo.

El mapa también muestra las orientaciones de las principales familias de fracturas o diaclasas presentes en el área de concesión

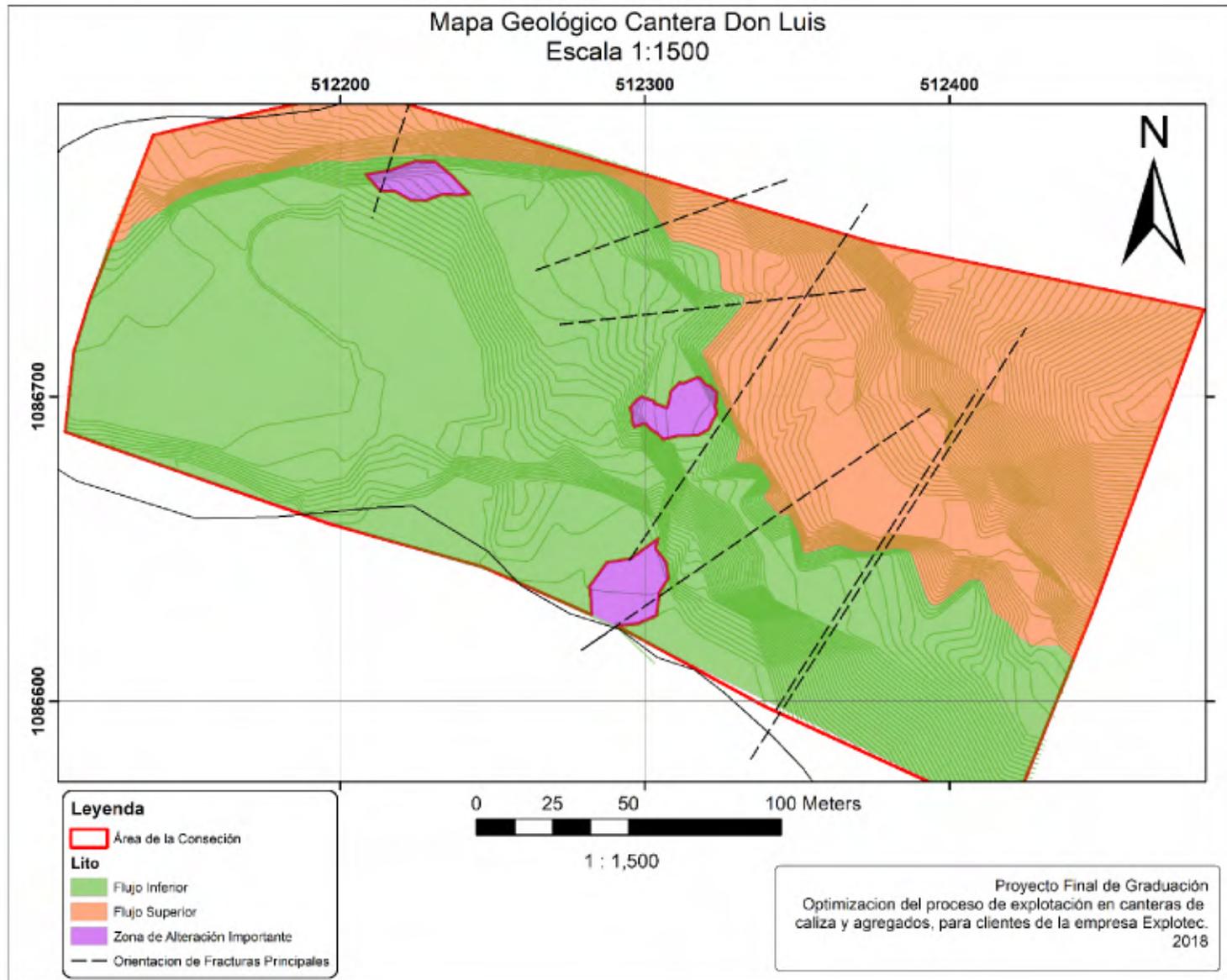


Figura 4.2 Muestra el mapa geológico elaborado para la Cantera Las Cóncavas

Luego de construir un modelo geológico conceptual para el frente de extracción del Tajo Las Cóncavas, se definieron las zonas de interés donde se realizarían las prospecciones geofísicas, con el fin de validar dicho modelo. Dichas fracturas no tienen expresión sobre la berma que se escogieron para estudiar, ya que de existir se encuentran cubiertas por el material utilizado para la confección de las bermas, sin embargo, pueden ser identificadas en los afloramientos cercanos a las mismas.

Se escogieron como zonas a prospectar, bermas establecidas dentro del tajo, en donde se atravesará perpendicularmente las principales facturas del macizo, como se muestra en la figura 4.3

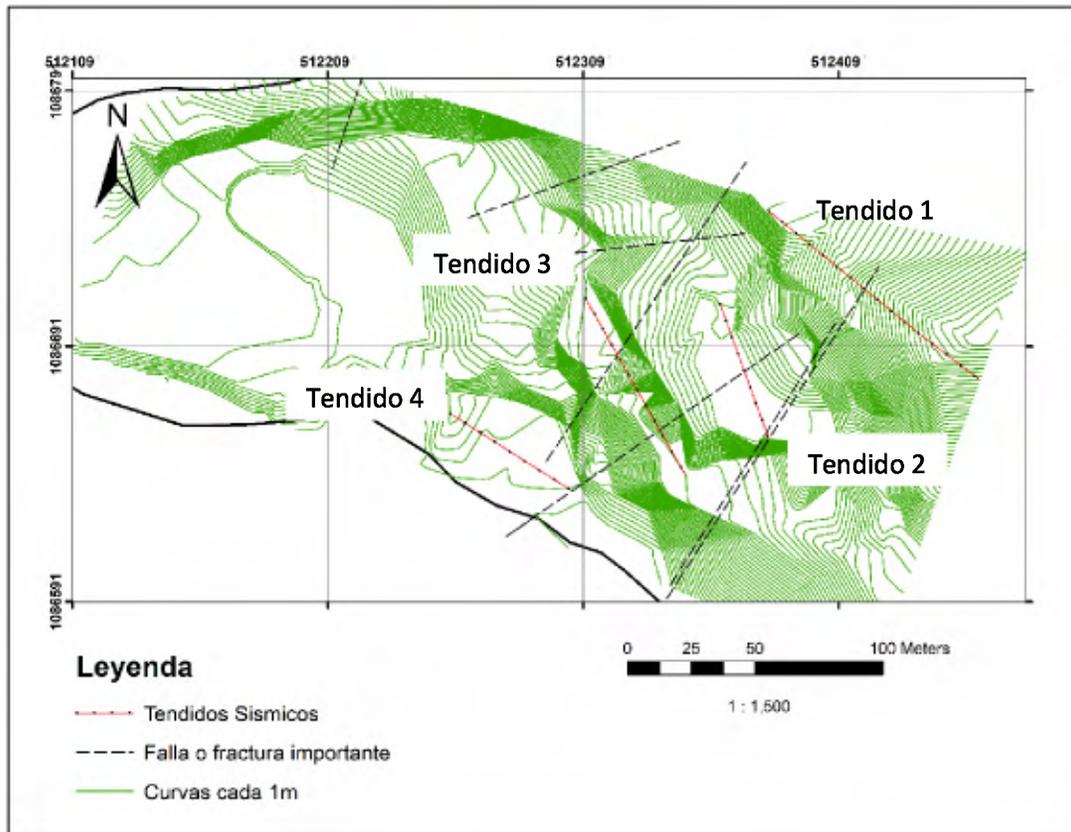


Figura 4.3 Muestra la ubicación de los tendidos sísmicos en el área de concesión de la cantera Las Cóncavas.

Se realizó el diseño de los tendidos, tomando en cuenta la geometría y dimensiones de las anomalías a prospectar y el tipo de fuente a utilizar.

El tendido 3 se utilizó como “calibración”, con el fin de observar las velocidades arrojadas por la metodología de RFS, y los materiales que se estaban prospectando, como se observa en la figura 4.4

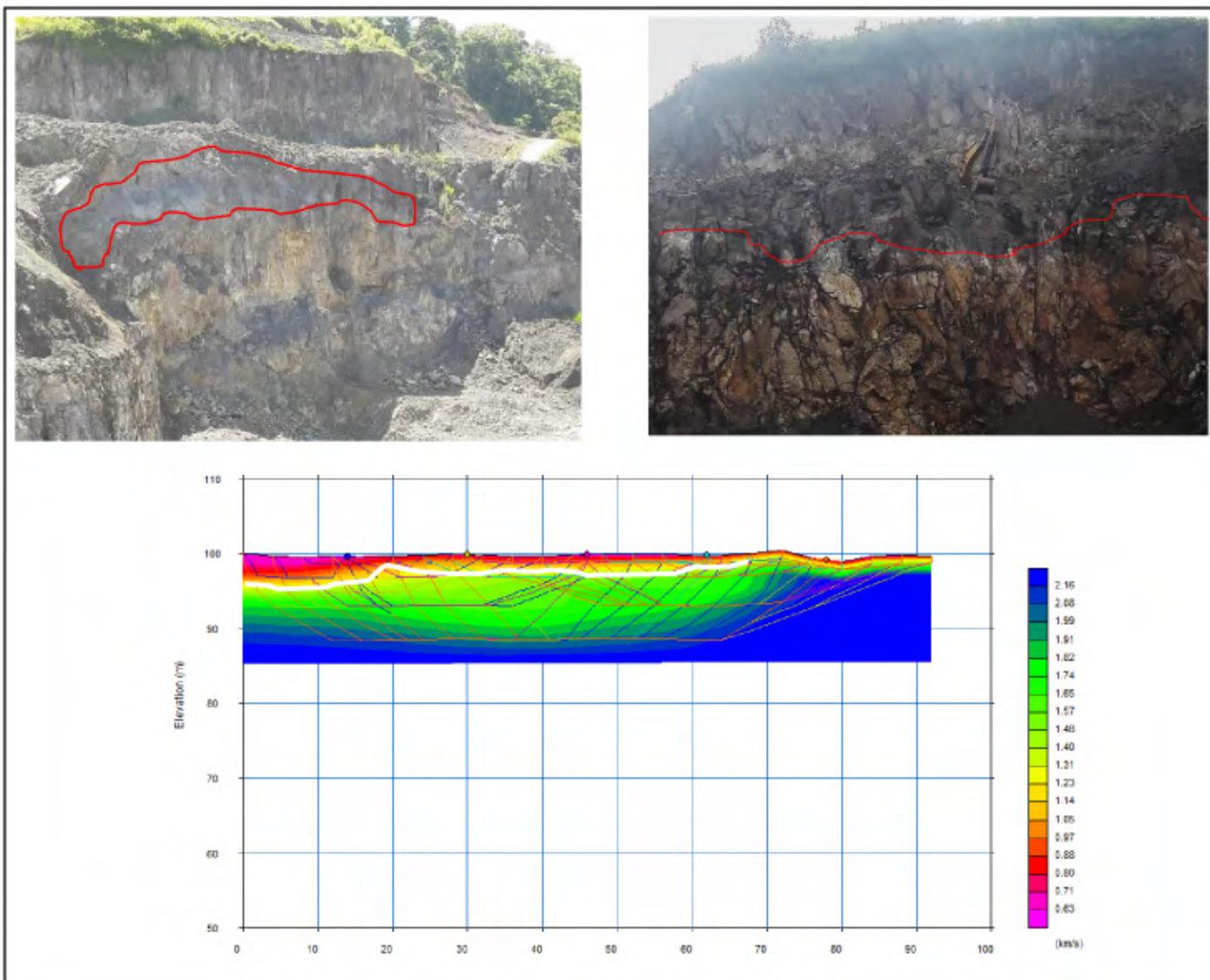


Figura 4.4 Muestra la relación entre los valores obtenidos en el perfil de velocidades y la roca aflorante, para el tendido 3.

Según el corte observado y los perfiles de velocidades generados por las metodologías sísmicas los rangos de velocidades para los materiales son los siguientes:

Material	Rango de Velocidad onda P (km/s)
Andesita Competente	1,6 – 2,2
Roca alterada o muy fracturada	0,9 – 1,5
Suelo y material de relleno	0,3 – 0,8

Establecidos los anteriores valores se procedió a realizar interpretación de los estratos geológicos, según los datos de velocidad generados y la geología sugerida por el modelo geológico propuesto.

Tendido 1

Se realizó en la parte alta de la concesión, donde la topografía es quebrada y no se ha realizado remoción de material, por lo que los espesores de suelo son bastante considerables. La interpretación litológica basada en los resultados arrojados por la geofísica y el modelo geológico se observa en la figura 4.5.

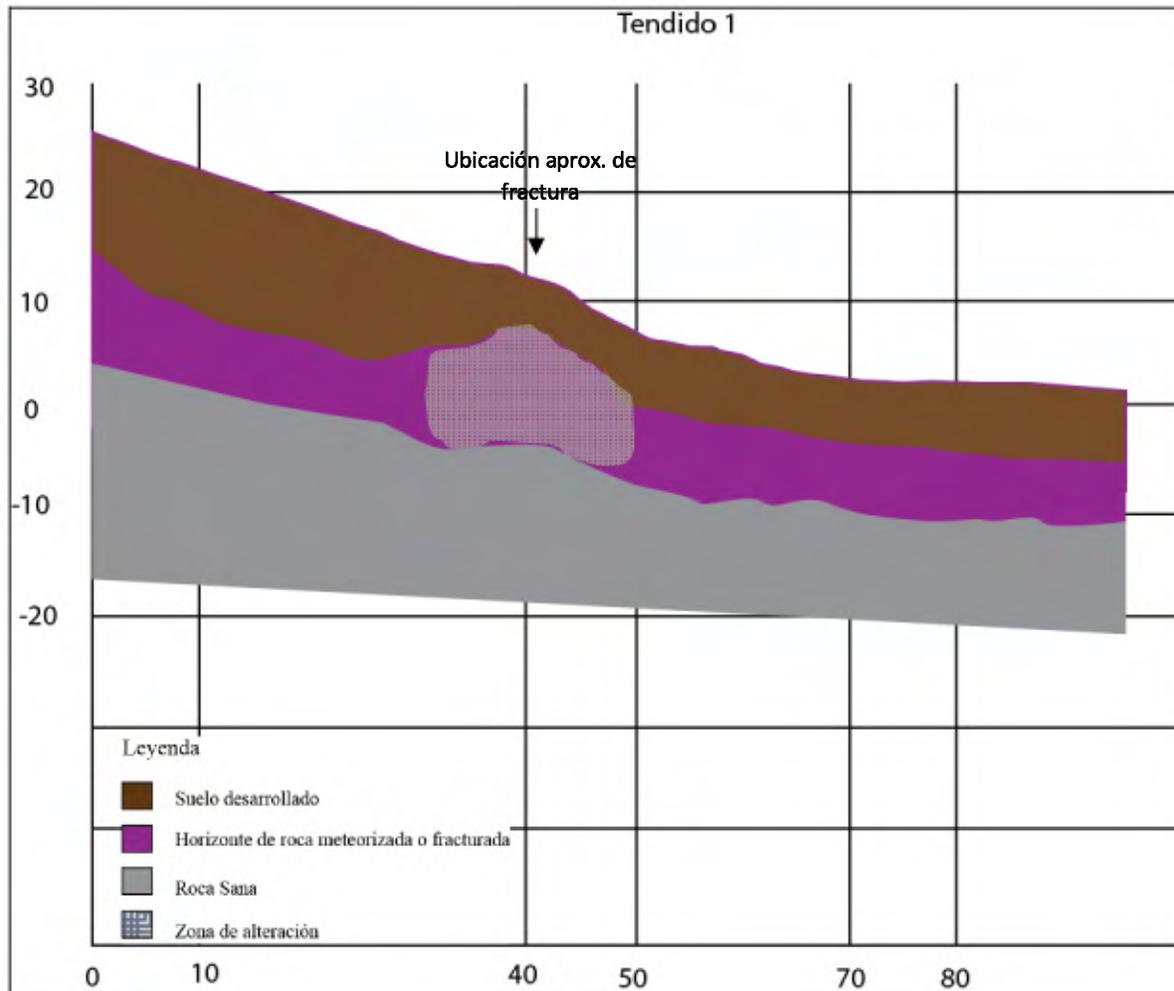


Figura 4.5 Muestra la interpretación litológica para el tendido 1.

Se concluye que en esta zona existe un espesor de suelo de 8 metros en promedio (zona color café), para luego dar paso a la transición entre roca y suelo (morado), en concordancia con algunos de las fracturas que atraviesa el tendido, se puede inferir una zona donde se tiene un lente de hasta 20 m de largo por 8 de ancho, zona donde se podría encontrar material de alteración. Finalmente se llega a la roca sana (color gris) la cual se encontraría a un promedio de 15 m de profundidad. Esto es importante tomarlo en cuenta a la hora de intervenir esta área, ya que la remoción de esa cantidad

de material de destape supone tiempo y dinero, por lo que se debe de planificar de la mejor manera para realiza trabajos en la zona.

Tendido 2

Se realizó en una berma en donde se realiza trabajos de producción desde hace varios años, y en donde en ciertas partes se tiene conocimiento que la administración anterior, utilizó para apilar material de destape. A lo largo de esta plataforma se estima que pasen al menos 2 discontinuidades principales, por las cuales se podría encontrar alteraciones. La interpretación litológica basada en los resultados arrojados por la geofísica y el modelo geológico es el siguiente:

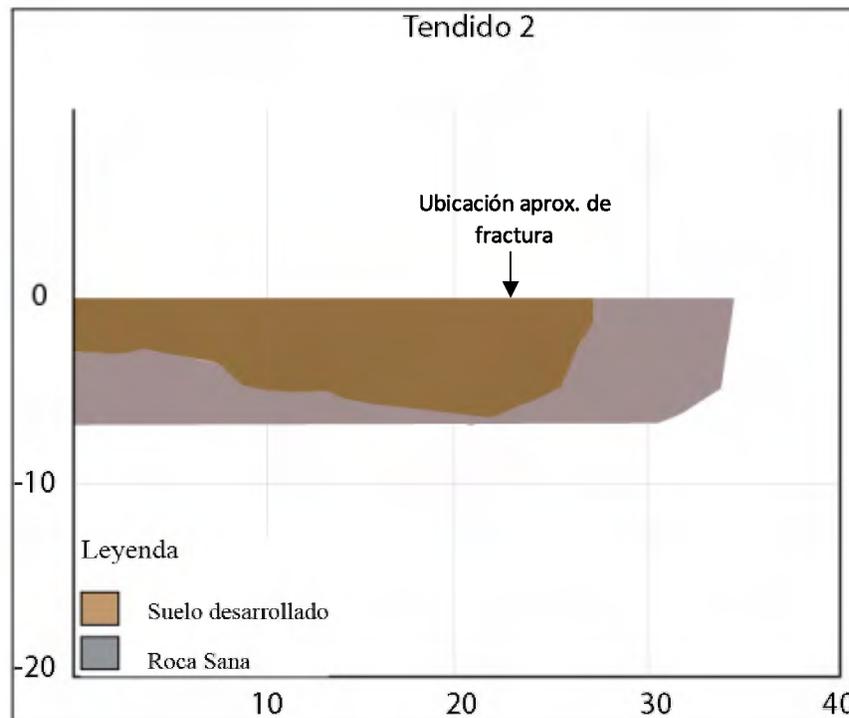


Figura 4.6 Muestra el perfil litológico interpretado para la sección del

Como se puede observar, en café se encuentran materiales de relleno, suelo y material muy meteorizado, con profundidades de hasta 8 metros, lo que indiscutiblemente genera una sobrestimación de los recursos, ya que se pensaba que esta berma estaba constituida en su mayoría por roca aprovechable. Al lado derecho del perfil se evidencia un contraste bastante alto entre roca competente pero probablemente fracturada, la cual parece hacer de pared de retención con respecto al material de al lado.

Al final se comprobó que lo que arrojaba la metodología SRT, estaba en lo cierto, ya que se realizaron trabajos de destape en la berma y se encontró que ese contraste de material tan abrupto era real y que lo que el perfil mostraba como material competente en efecto lo era.

En la imagen 4.7, se muestran fotos de la zona de contraste en donde se realizaron los trabajos de destape.



Figura 4.7 Muestra fotos del área en donde se realizó el tendido 2, evidenciando el contraste que se observaba en el perfil litológico interpretado.

En las imágenes anteriores se observa del lado derecho roca y del lado izquierdo material de relleno, comprobando así la precisión de los resultados sísmicos.

Tendido 3

Este tendido fue utilizado como forma de calibración para la estimación de los valores de velocidades para los materiales presentes y sobre esta berma ya se realizó extracción, por lo que se logró comprobar el perfil litológico, el cual se construyó como se muestra en la figura 4.8.

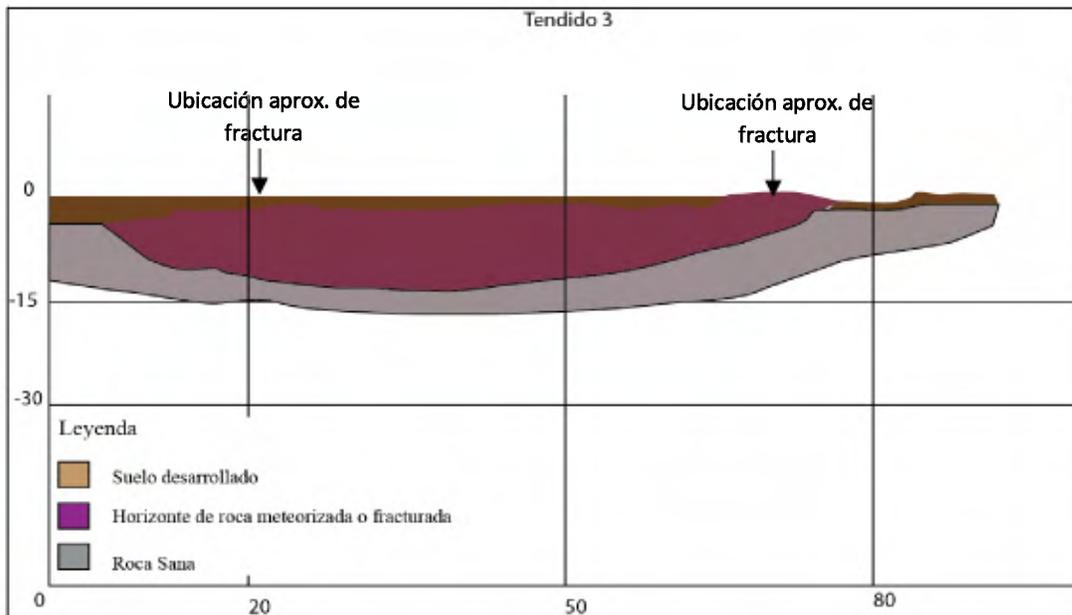


Figura 4.8 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 3.

Se comprobó la profundidad del material alterado y de las zonas donde se muestra bien el comportamiento de este material, ya que la presencia de suelo en esta zona es escasa, lo que se tiene es un relleno dispuesto por la administración del tajo, para el paso de camiones por este camino. Se tiene un área de alteración de al menos 10 m de extensión y 8 a 10 metros de profundidad. Además, las zonas por donde se trazaron las direcciones principales de una fractura principal coincidió con las zonas de alteración de la roca.

Tendido 4

Este tendido fue realizado en el nivel más bajo de la concesión, en la base de la misma y en donde se tiene planeado profundizar hasta 10 metros más para llegar a la cota límite de extracción. Por este tendido se estima que pasen al menos 2 fracturas principales en la orientación de la familia principal.

La interpretación litológica de este tendido se muestra en la figura 4.9

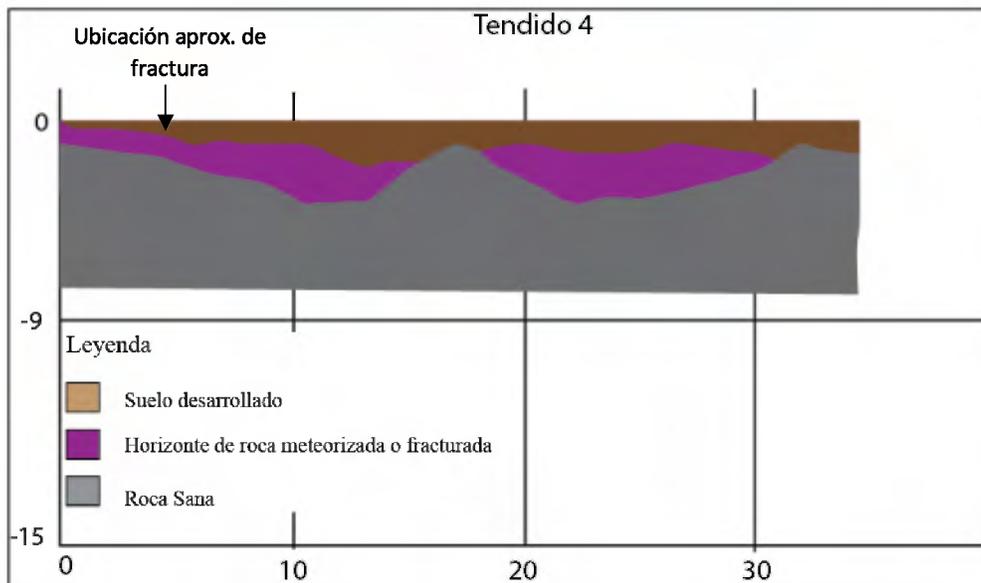


Figura 4.9 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 4.

Se evidencia una zona considerable de roca alterada, además de partes donde las velocidades son consistentes con un macizo fracturado. Esto se podrá comprobar una vez que se realice la extracción en esta zona. Se infieren lentes de material muy meteorizado correspondiente hasta con relleno, pero por ser una zona inalterada es más probable la existencia de material alterado que relleno.

Se demostró la presencia de zonas mineralizadas aledañas a fracturas o diaclasas importantes, con espesores considerables. La posibilidad de que continúen en profundidad es probable, ya que en profundidad, capas verticales de poco espesor muy probablemente sean desestimadas por la metodología, por lo que las más evidentes son las que se encuentran relativamente someras.

Con los perfiles litológicos anteriores se pretende construir un modelo geológico completo, con el fin de realizar un cálculo de reservas, en donde se tomen en cuenta los porcentajes existentes, para los diferentes materiales presentes en la cantera.

4.2 Tajo San Buena

El frente de extracción del tajo San Buena, se encuentra conformado en su totalidad por caliza con eventuales apariciones de lentes de cuarzo, dicho frente se encuentra altamente fracturado, con diaclasas que se orientan predominantemente E-W, como resultado de los esfuerzos generados por las fallas presentes en el cerro, generadas en un marco tectónico antiguo. Dichas diaclasas generaron grietas las cuales son aprovechadas por aguas meteóricas, para disolver, transportar y cristalizar calcita, por lo que se encuentran cavernas de considerable tamaño, así como grietas mineralizadas en sus interiores.

Se determinó el cerro como una unidad denudacional, en donde no existen esfuerzos tectónicos ejerciendo presión sobre esta zona, por lo que su destino final sería su completa erosión.

A continuación, se incluye el siguiente mapa geológico del área de estudio, con todas las consideraciones estudiadas en el presente informe (figura 4.10)

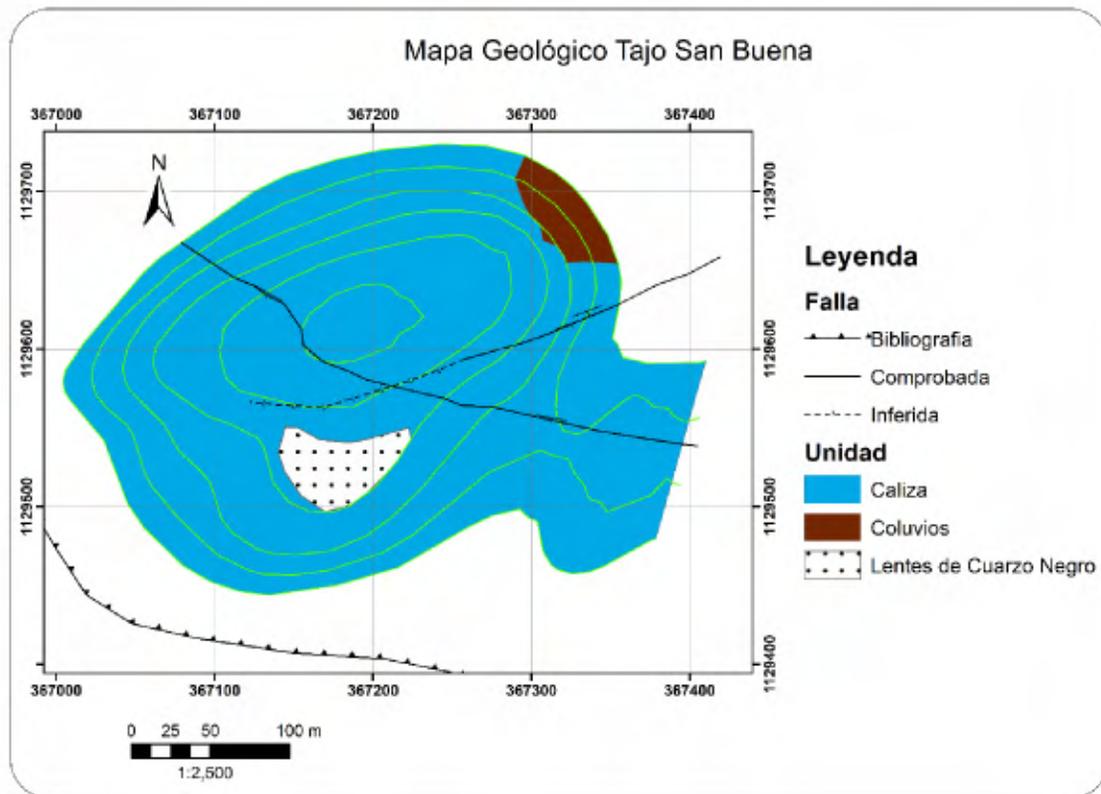


Figura 4.10 Presenta el mapa geológico propuesto para el cerro en estudio.

El objetivo principal con la recolección de muestras y posterior análisis químico, era conocer y zonificar la concentración de algunos elementos necesarios, para la caracterización y asignación de calidades de roca, para diferentes usos industriales. De igual manera se intentó correlacionar algunas coloraciones particulares de la roca en el macizo, con las condiciones químicas reales de la caliza.

Si bien la distribución química en el cerro puede responder a distintas variables, como origen de la roca, génesis de la roca y factores de meteorización fisicoquímica por parte de los elementos, propiciada por evidencias de una geología estructural predominante y evidente; el propósito de dicho muestreo químico es únicamente zonificar los elementos, con el fin de elaborar un adecuado diseño de explotación, en donde sea posible para la administración del tajo, ubicar y extraer las zonas con la concentración química que desee, según la demanda de material que presenten. No se pretende investigar a fondo las razones por las cuales se tiene dicha distribución química.

Lo que sí se puede generar con los resultados observados en el apartado de estudios geoquímico, es una noción del patrón de distribución de los elementos, al menos para la zona muestreada. Existen muestras recolectadas en la cima, y en sus laderas, tanto la ladera noroeste como la ladera sureste. Entre estas zonas específicas es donde se evidencian cambios considerables en las concentraciones químicas.

Para la cima del cerro se muestra caliza más pura relativamente, ya que se observan porcentajes de concentración de CaO mayores a 92%, mientras que los valores bajos se ubican en las laderas del cerro, en zonas bajas. En cuanto a la concentración de sílice es prácticamente ver un efecto en negativo de la distribución de calcio, ya que en las zonas donde la concentración de calcio es mayor, la de silicio es mucho menor y viceversa (figura 4.11)

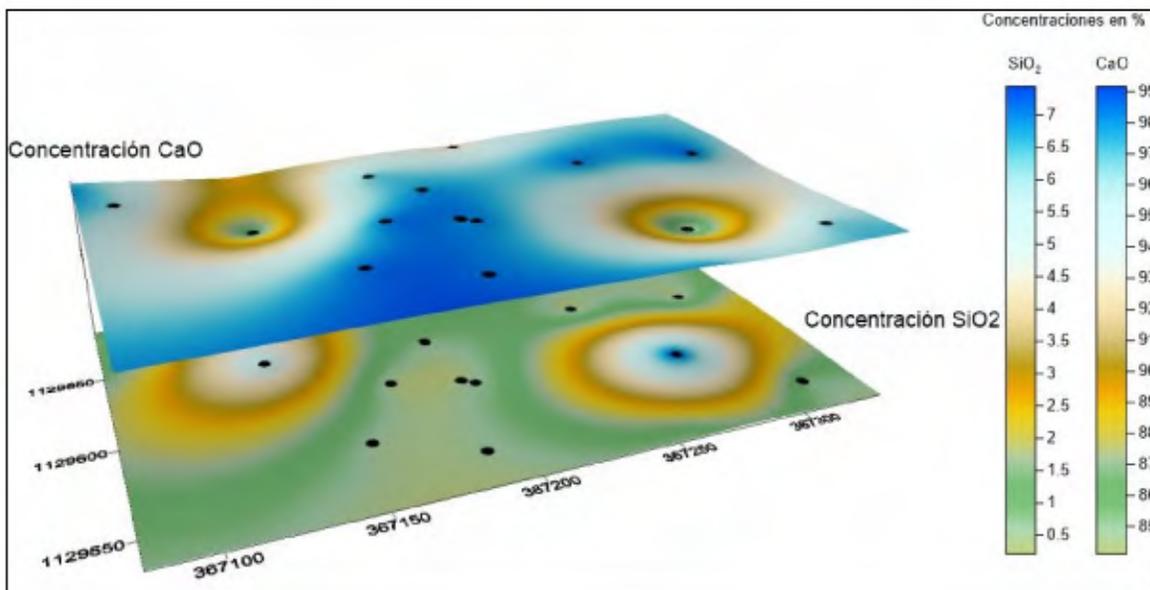


Figura 4.11 Muestra la comparación entre los mapas de concentración de sílice y calcio.

Esto puede sugerir una mayor contaminación de la caliza, con detritos o materiales meteorizados provenientes de la cima del cerro, lo que genera un incremento en la concentración de sílice. Casualmente las dos muestras que presenta la mayor concentración de silicio, se ubican muy

cercanas a las zonas donde se evidencian planos de falla y zonas de alta fracturación o caverna, por lo que se espera que estas zonas de debilidades vean una mayor concentración de rocas calizas con alto contenido de sílice. En el caso del hierro y el aluminio, también mantienen un patrón con respecto a las concentraciones de sílice, por lo que refuerza más la teoría de que estas zonas no sólo presentan la concentración inherente de la roca, sino que reciben un mayor aporte de dichos elementos, gracias al transporte y redistribución que se genera con los procesos de meteorización.

En el caso del potasio y el sodio, no parecen tener una tendencia en especial, sin embargo, continúa existiendo mayor concentración en las partes bajas. En el caso del sodio propiamente, muy pocas muestras registraron la presencia de este elemento y de las que lo hicieron, los valores no superaron el 1% de concentración.

Para los análisis de diseño de cantera, se priorizó en la zonificación de rocas con mayor concentración de sílice y caliza, la cuales representan los elementos principales a la hora de caracterizar la calidad de una roca. Además, según los estudios realizados, se puede concluir que en las zonas donde se encuentran las mayores concentraciones de sílice, también se encontraran las mayores concentraciones de hierro y aluminio.

Con base en los resultados finales, se definieron 3 frentes de explotación principales, en donde se tienen mayores concentraciones de calcio y sílice (figura 4.12)

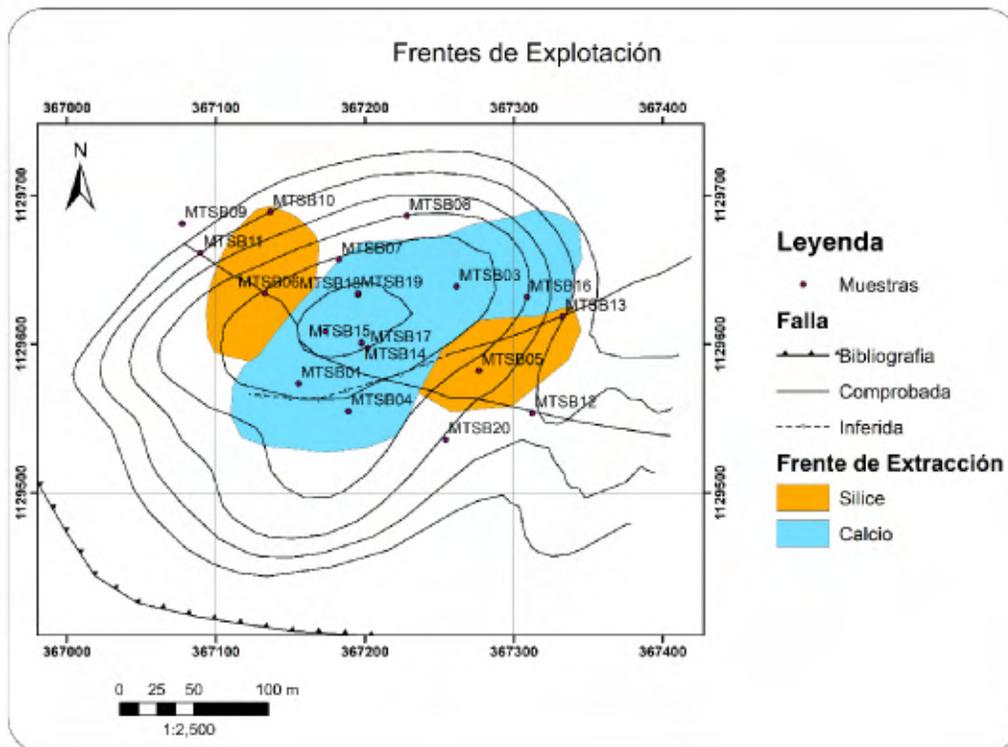


Figura 4.12 Muestra el mapa de zonificación de los frentes de explotación propuesto, según las concentraciones máximas de SiO₂ y CaO.

Posterior a la construcción de un modelo geológico conceptual y geoquímico para el cerro del Tajo San Buena, se realizó la prospección sísmica que se desarrolló en el apartado 3.

Se escogieron como zonas a prospectar, zonas con acceso y que cumplieran con una relativa horizontalidad y con espacio suficiente como para realizar un tendido lineal, que además atravesaran perpendicularmente las principales fracturas del macizo, como se muestra en la figura 4.13.

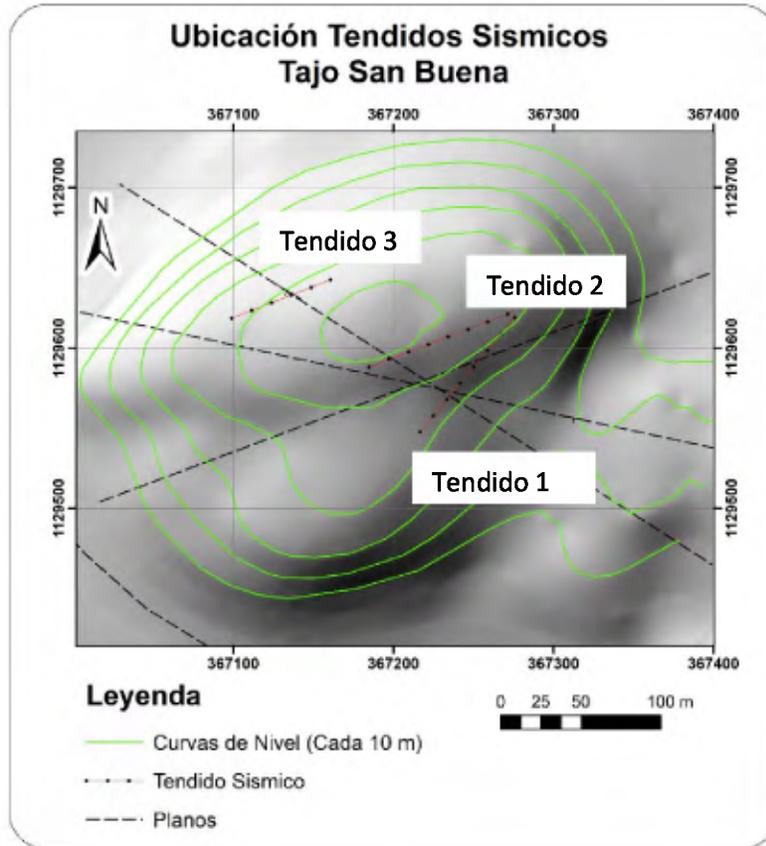


Figura 4.13 Muestra el mapa de ubicación para los tendidos sísmicos realizados en el Tajo San Buena

Se realizó el diseño de los tendidos, tomando en cuenta la geometría y dimensiones de las anomalías a prospectar y el tipo de fuente a utilizar.

Según el corte observado y los perfiles de velocidades generados por las metodologías sísmicas los rangos de velocidades para los materiales son los siguientes:

Material	Rango de Velocidad onda p (km/s)
Caliza Sana	1,7 – 2,2
Roca alterada o muy fracturada	1 – 1,7
Suelo y material de relleno	0,5 – 0,8

Establecidos los anteriores valores se procedió a realizar interpretación de los estratos geológicos, según los datos de velocidad generados y la geología sugerido por el modelo geológico propuesto.

Tendido 1

Se realizó sobre uno de los caminos que lleva a la parte alta del cerro, donde el camino fue conformado con relleno de rocas de sobre tamaño. La interpretación litológica basado en los resultados arrojados por la geofísica y el modelo geológico se presenta en la figura 4.14.

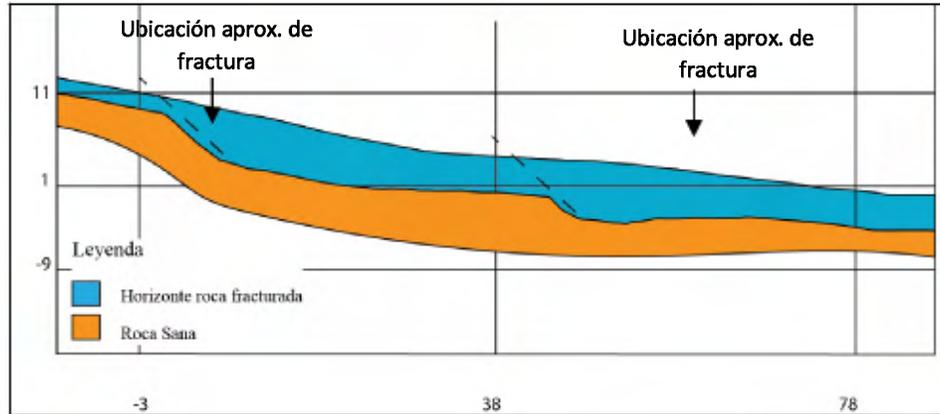


Figura 4.14 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 1.

Se observa un estrato superior de velocidad intermedia, correspondiente con roca muy fracturada, o como en este caso, roca suelta de sobre tamaño, con el cual lograron elaborar un camino y poder acceder a la parte alta del cerro. El basamento es concordante con roca sana y es evidente discontinuidades en dicho basamento, los cuales podrían concordar con los dos planos de falla que atraviesan el tendido, y razones por las que tuvieron que aplicar material, para uniformar el camino ante la topografía original. Dado que es una zona en donde han realizado trabajos y estas intervenciones son relativamente nuevas, no existe un estrato de suelo o material meteorizado considerable. En este tendido no se lograron evidenciar la presencia de cavernas, sin embargo, se logra identificar e inferir expresiones de los planos de falla presentes en el cerro.

Tendido 2

Se realizó en la parte superior del cerro, y en este tendido se utilizaron los explosivos como fuente generadora de ondas p. Para este tendido los tiros offset fueron de 20 m, con lo que se logró alcanzar una profundidad de prospección de más de 25 m de profundidad. A lo largo de esta plataforma se estima que pasen al menos 2 discontinuidades principales o planos, por las cuales se esperaría encontrar cavernas de considerable tamaño. La interpretación litológica basado en los resultados arrojados por la geofísica y el modelo geológico se presenta en la figura 4.15.

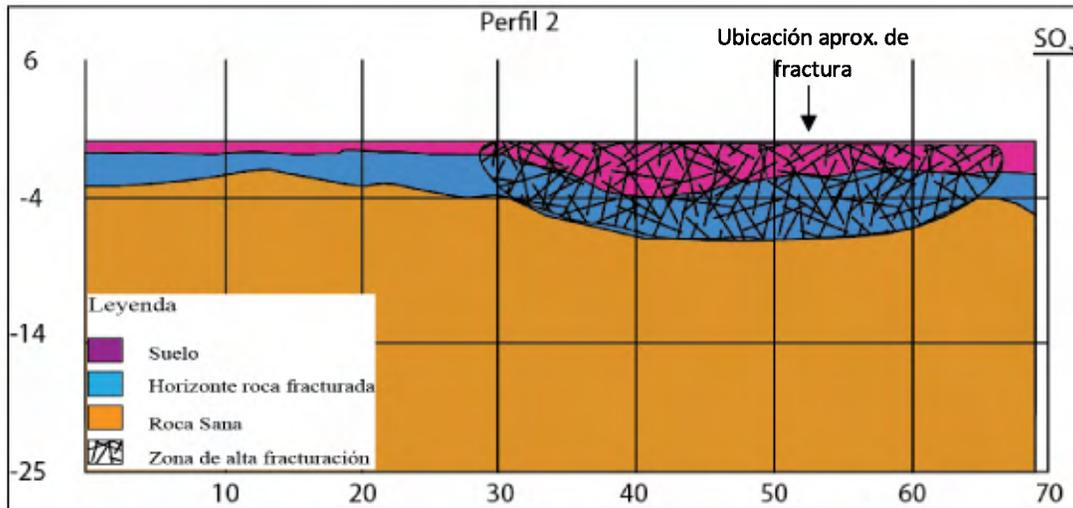


Figura 4.15 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 2.

Perfil de sismica y de los estudios geológicos, se concluye que en la parte noreste del tendido se mantiene una estratificación constante, en donde se observa una capa de material meteorizado y/o suelo, posteriormente un estrato menos competente, para seguidamente encontrar un estrato de buena consistencia, concordante con roca sana, hacia el extremo final del tendido, se amplían los estratos de material meteorizado y fracturado, sitio donde es concordante el paso de uno de los planos de falla presentes en el cerro, por lo que la alteración y fracturamiento se espera fueran mayores. Conocer estas variables del macizo en esta zona son de gran ayuda para la futura planificación de voladuras y extracción del material. El basamento no parece tener anomalías geofísicas, al menos no del tamaño necesario para que las ondas P alteren su velocidad circunstancialmente, por lo que, de haber zonas de fractura muy probablemente sean menores a los 5 metros.

Tendido 3

Este tendido fue realizado en un camino ubicado al norte del cerro, muy complicado de acceder sin embargo se ubicaron expresiones de un plano de falla, que atravesaban el tendido, por lo que se logra interpretar una zona de caverna en el punto, como se muestra a continuación en la interpretación del tendido (figura 4.16)

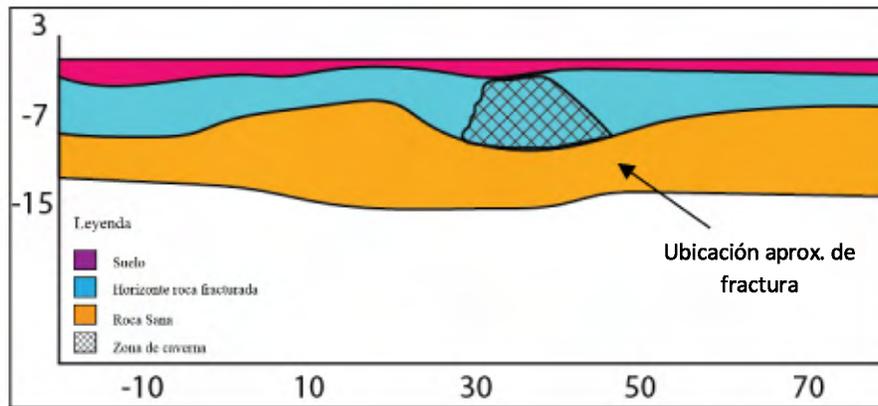


Figura 4.16 Muestra el perfil litológico interpretado para el tendido 3.

Se infiere una capa de al menos un metro de material meteorizado seguido por un material meteorizado o fracturado, hasta llegar a un basamento de roca sana a unos 7 m de profundidad, hacia el extremo del tendido se evidencia un ensanchamiento súbito de los estratos de velocidades bajas, alrededor de donde se observa evidencia de paso de planos de falla, por lo que se infiere como una zona donde existe la posibilidad de encontrar cavernas, producto de la disolución de la caliza. En el perfil sísmico no se evidencia la continuación de la probable caverna, lo cual no significa que no exista, si no que probablemente se reduzca dicho ensanchamiento, y haya sido sobreestimada la cavidad. La única manera de comprobar su existencia es por medio de la prospección mecánica con una perforadora, a medida que se vaya explotando el cerro.

En general el cerro estudiado presenta una relativa homogeneidad en sus materiales y en la calidad física que presentan, manteniendo capas superficiales de suelo o material meteorizado, seguido de material fracturado, para finalmente encontrar basamentos de caliza sana. Se evidenciaron zonas con contrastes geofísicos suficientes para ser consideradas como cavernas, sin embargo, no presentan grandes dimensiones, la más grande visible en los afloramientos no supera los 5 metros, y en los perfiles sísmicos se evidencian zonas de anomalías de hasta 20 metros de ancho, sin embargo, para ser establecidas como cavernas hay que perforar y comprobar espacios vacíos en estos sitios.

Para la realización del modelo geológico se considera más ventajoso, utilizar la caracterización geoquímica principalmente, ya que se concluye que no existen variaciones físicas suficientes como para modelarlas en el modelo geológico.

Si deben de ser consideradas las zonas cercanas a las zonas o planos de falla, donde sí se espera encontrar mayor grado de fracturación del macizo, acompañado de zonas de caverna, las cuales, según los estudios geoquímicos, contienen mayores concentraciones de sílice y hierro.

Finalmente se tienen los datos necesarios para desarrollar una propuesta de diseño de cantera, con el cual se puede garantizar la extracción máxima de las reservas del cerro, optimizando espacio y recursos.

5. Estudios de Diseño de Cantera y Cálculo de Reservas

En el presente apartado se desarrollan las metodologías y consideraciones tomadas en cuenta para realizar un apropiado diseño de cantera y además calcular las reservas aprovechables de los casos de estudio, teniendo como información base, todos los insumos generados en los estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos.

Mediante un estudio geológico se caracterizaron los diferentes rasgos físicos de la roca, las cuales condicionan el tipo de material que puede ser extraído y comercializado por la administración del tajo.

La geofísica ayudó a comprobar y completar el modelo geológico propuesto, definiendo las dimensiones y ubicaciones aproximadas de los materiales a prospectar, logrando modelarlos y ubicarlos en dicho modelo.

En el presente apartado se proponen diseños de cantera para los 2 casos de estudio, en función de las características topográficas del frente de extracción, pero sobre todo según las necesidades de material que presente la administración del tajo y su capacidad instalada. (Maquinaria móvil y quebrador).

Existen varios reglamentos mineros a nivel mundial, que restringen o delimitan el desarrollo y modelamiento de una cantera o mina, dando los lineamientos base para desarrollar la misma desde el punto de vista operacional, extractivo y de seguridad laboral. Para la realización del diseño en este informe se tomaron en cuenta el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España (Ministerio de Energía, 1985) y el Reglamento de Seguridad Minera, Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería de Chile (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2002).

Las consideraciones principales a tomar en cuenta para el diseño final de una cantera son sus propiedades intrínsecas y extrínsecas de la misma (Herrera Herbert, 2007), para el caso de estudio, estas las podemos clasificar de la siguiente manera:

Intrínsecas:

- Disposición y ubicación de los materiales geológicos de interés
- Elementos geológicos presentes (estructural, hidrogeológico, geomorfológico).
- Consideraciones técnicas del macizo rocoso (estabilidad de taludes, altura de los bancos, ancho máximo de las bermas). Algunas de las consideraciones que engloban este punto fueron extraídos de estudios técnicos realizados por las administraciones de los tajos, los cuales se encuentran en cada uno de los expedientes mineros de cada proyecto.
- Topografía y áreas de acceso del tajo

Extrínsecas

- Facilidad Operacional: Se debe de considerar el tránsito y operación del tipo de maquinaria existente en el tajo.

- Elementos cercanos a la cantera, susceptibles a percibir efectos de la actividad minera.
- Consideraciones legales (Directrices de la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, directrices u observaciones técnicas de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental)

En el caso de las metodologías para el cálculo de las reservas se utilizaron las metodologías de los perfiles y la metodología de los bloques. Ambas metodologías generan resultados de volúmenes, en donde para esta tesis lo más importante son los porcentajes de material arrojado, ya que lo que se desea es un modelo donde se zonifique y se cuantifique el material aprovechable. Los resultados numéricos son confidenciales y no son mostrados en este informe final, sin embargo los resultados si fueron revisados y analizados por el comité asesor del presente proyecto final de graduación, en informes de evaluación anteriores. Como anteriormente se puntualizó el valor numérico es de especial ayuda en proyecciones económicas, en este caso se prioriza en la información arrojada por el modelo de bloques, donde se obtiene la zonificación, porcentajes y dimensión de los materiales presentes.

5.1 Tajo Las Cóncavas

Diseño de Cantera

Propiedades Intrínsecas

- Disposición y ubicación de los materiales geológicos de interés:

La cantera Las Cóncavas, presenta una relativa uniformidad en los materiales geológicos que extrae, esto se debe a que se ubica sobre flujos de roca andesita, provenientes de macizos volcánicos cercanos. Si presenta una variación de las características físicas de estos productos pétreos, debido principalmente, a alteraciones químicas. De igual manera las zonas alteradas han sido ubicadas y estudiadas, por lo que se tiene la información necesaria para identificar las zonas de extracción en donde se encuentran estos materiales.

- Elementos geológicos presentes (estructural, hidrogeológico, geomorfológico).

El elemento estructural no condiciona el desarrollo de la actividad en el tajo, ya que, si bien presenta elementos estructurales cercanos y dentro del mismo tajo se observan fallas y planos de pequeñas dimensiones, los mismos no presentan evidencia de actividad reciente que condiciones la actividad extractiva del tajo. Sin embargo, estas fracturas, planos y potencial sísmico si deben de ser tomados en consideración para el análisis de estabilidad de taludes.

La hidrogeología del área tampoco es un tema condicionante, ya que, según estudios realizados y desarrollados en el Programa de Explotación del proyecto el cual se encuentra en el expediente minero del mismo, se establece que, bajo el proyecto yace un acuífero confinado a más de 20 metros del piso mínimo de extracción, el cual presenta una valoración de riesgo despreciable, según la metodología GOD.

Geomorfológicamente presenta áreas circundantes con una topografía suave, con cierta pendiente (entre 20% a 40%), lo que exenta de cualquier zona con probabilidad de deslizamiento o algún otro elemento geomorfológico que genere una amenaza considerable.

- Consideraciones técnicas del macizo rocoso (estabilidad de taludes, altura de los bancos, ancho máximo de las bermas)

Normalmente estos estudios deben de ser actualizados según el avance del tajo y de la nueva roca que aflora luego de la extracción. En este caso el alcance de este estudio no contempla el análisis de estabilidad de taludes, por lo que las especificaciones técnicas para realizar el diseño se extraerán del Programa de Explotación del Proyecto. En este caso se especifica que los taludes deben de tener un ángulo de reposo no mayor a 80° y una altura máxima de banco de 10 a 15 metros. Sin embargo, se consideró que las condiciones planteadas por el programa de explotación, por lo que se realizó el diseño con bermas de 10 m máximo de altura y 75° de ángulo de reposo del talud, generado un escenario más conservador.

- Topografía y áreas de acceso del tajo

El frente de explotación presenta un único camino de acceso hacia la mayoría de sus bermas, esto debido al encajonamiento que presenta en su frente de explotación, encajonamiento que es producto de la actividad antrópica de la explotación, no es un elemento natural del terreno. El camino de acceso al proyecto en sí, lo conforma una servidumbre de paso que rodea de cierta forma el frente explotación. Para el diseño final de cantera, se considera el acceso a las bermas de mayor altitud, conectando con este camino. La recomendación principal es que las bermas de un mismo nivel, deben de tener al menos dos accesos, en caso de atrapamiento por derrumbe o por avería de maquinaria. Esta recomendación es necesaria durante la etapa de operación del tajo, para el diseño propuesto se considera sólo un acceso, ya que este diseño es el que se debe de tener al cierre técnico del tajo, diseño que optimiza al máximo las reservas aprovechables en el área de concesión.

Propiedades Extrínsecas

- Facilidad Operacional: Se debe de considerar el tránsito y operación del tipo de maquinaria existente en el tajo.

Al haberse analizado las características de acceso, las pistas o rampas deben de tener las siguientes especificaciones, las cuales se obtienen basadas en el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España y en el Reglamento de Seguridad Minera, Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería de Chile.

Rampas y pistas de acceso:

- Serán de un carril, esto con el fin de optimizar al máximo el volumen de extracción. La maquinaria deberá ingresar a las bermas en reversa, para ser cargadas por la maquinaria de extracción (excavadora, cargador).

- Tendrá un ancho de 6 m, lo que considera, un carril de 3 metros de ancho, una separación del pie del talud de 1,5 m y considerando una berma de seguridad de 1,5.
- Las rampas de acceso deben de mantener, en la medida de lo posible, pendientes no mayores a 15%.
- Deben de considerar una convexidad de al menos 1° del centro a ambos lados del carril, con el objetivo de dar salida a el flujo de escorrentía.
- No se consideran curvas de viraje dentro del diseño, todos los caminos poseen entadas directas sin necesidad de virajes bruscos en la maquinaria.

- Elementos cercanos a la cantera, susceptibles a percibir efectos de la actividad minera

Afortunadamente en los alrededores del proyecto se ubican terrenos utilizados únicamente para actividades de pastoreo de ganado y potrero, por lo que ninguna actividad humana se verá afectada con el avance de la actividad y la implementación del nuevo diseño.

- Consideraciones legales (Directrices de la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, directrices u observaciones técnicas de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental)

La fiscalización del ente rector de la minería en Costa Rica, estipula una serie de directrices específicas para cada proyecto, en el caso del tajo en estudio, únicamente mencionan como tope la cota 1220 msnm. Además, cumplir con las regulaciones ambientales, y las medidas de control y compensación ambiental a las que se comprometieron, las cuales son fiscalizadas por el regente ambiental y geológico.

Con todas las variables anteriormente consideradas y llegando a un consenso con el administrador del tajo y su regente geológico se elaboró el presente diseño final, el cual trata de optimizar al máximo el área de concesión. (Figura 5.1 y 5.2)

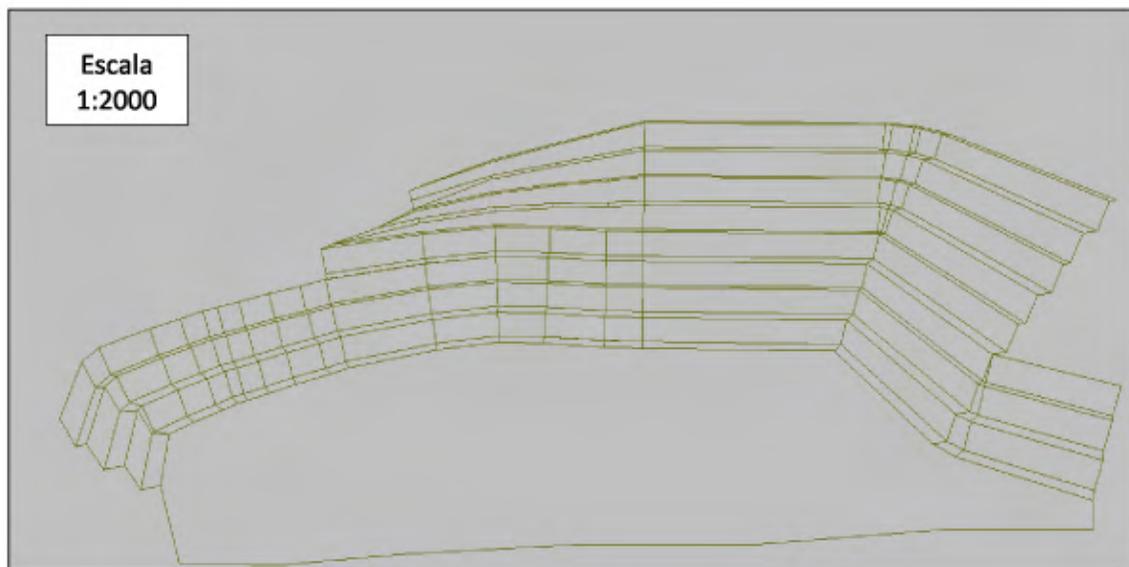


Figura 5.1 Diseño final del Tajo Las Cóncavas, tomando en cuenta sus elementos intrínsecos y extrínsecos.

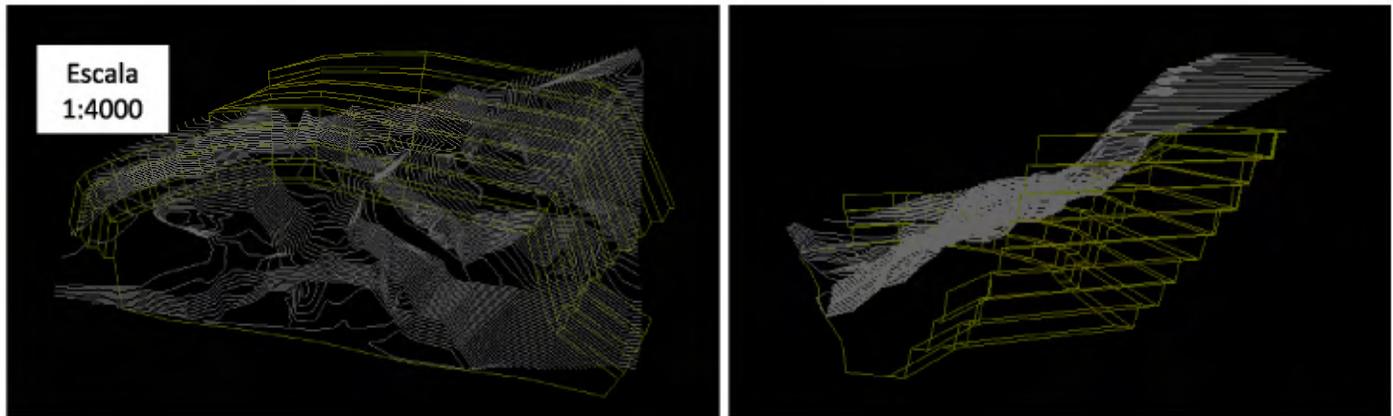


Figura 5.2 Muestra varias vistas del diseño final de la cantera, superpuesto por la topografía actual de la cantera.

La imagen anterior consiste en la propuesta para el diseño en su máxima explotación, es decir, el diseño en donde se extraen la mayor cantidad de reservas posibles, respetando los lineamientos mencionados anteriormente. La anterior propuesta tiene las siguientes características:

- Sistemas berma/talud de 10 m de alto máximo, con bermas de 3 metros de ancho, llegando a una cota mínima de 1230 msnm.
- Rampas de acceso a bermas de 10% máximo de pendiente, con un ancho de 3 metros igual.
- Drenajes o cunetas en cada una de las bermas para el manejo de las aguas superficiales.

La elaboración del presente diseño es indispensable para el siguiente paso: los estudios de cálculos de reserva.

Cálculo de reservas

Para el estudio de cálculo de reservas se utilizó únicamente métodos geométricos, ya que los métodos analíticos están más orientados al manejo y cálculo de leyes en minería metálica. Las dos metodologías geométricas a utilizar son: Metodología de Cálculos por Perfiles, y la Metodología de los Bloques Regulares.

Para el análisis se utilizará el programa informático RecMin, utilizando como área aprovechable la delimitada por el diseño final de cantera ya realizado (superficie base) y la topografía actual del frente de extracción (superficie tope).

Metodología de los Perfiles

La implementación de esta metodología, evidenció una deficiencia a la hora de aplicarla en tajos de geometría irregular, ya que el método se sustenta en la conformación de supuestos prismas regulares (conformados promediando las áreas de 2 perfiles y multiplicándolos por la distancia en línea recta entre ellos) los cuales no son tan precisos en tajos donde se encuentran áreas curvadas o topografía irregular. Para eliminar esta limitante, se deben de incrementar los perfiles a considerar en el cálculo de las reservas, incrementando el procesamiento matemático a realizar.

Para este caso se realizaron un total de 15 perfiles, en una orientación N-S, como se muestra en la siguiente figura (figura 5.3)

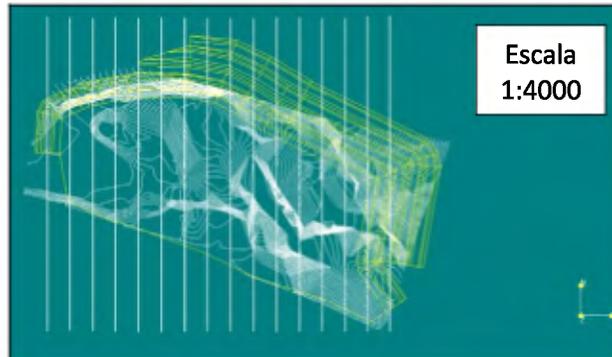


Figura 5.3 Muestra los perfiles (líneas verticales blancas, orientadas N-S) que se realizaron para el cálculo de reservas mediante el método de los perfiles. La imagen muestra en una vista de planta la superficie tope y base del Tajo Las Cóncavas.

Cada 2 perfiles se define un bloque con el área de sus extremos conocida y la longitud entre estas superficies también conocidas, con lo que es posible aproximar el volumen sobre estas dos superficies.

Con el software Recmin se realizan los perfiles que se utilizarán para los cálculos (Figura 5.4), el mismo programa calcula el área entre las superficies, y conociendo el valor de separación entre los perfiles, realiza el cálculo final arrojando el valor del volumen aproximado.



Figura 5.4 Muestra las secciones utilizadas por el programa, para el caculo de las reservas por medio de la metodología de los perfiles transversales. La línea blanca corresponde con la superficie tope y la línea amarilla corresponde con la superficie base.

Finalmente, el programa arroja un valor que corresponde con el volumen encerrado entre las secciones realizadas en el tajo.

Metodología de los Bloques

Esta metodología ubica las coordenadas del espacio delimitado entre las dos superficies (base y tope) y la rellena con bloques regulares de igual volumen, activando los bloques que se encuentren

encerrados por dichas superficies. La limitante que se identificó con esta metodología es que, en tajos de geometría irregular, se debe de disminuir el tamaño del bloque con el fin de que se ajuste lo más posible a la topografía limite. Al disminuir el tamaño del bloque, se aumenta el procesamiento de cálculo, sin embargo, se logra una precisión bastante alta a la hora de calcular el volumen de los bloques, ya que estos rellenan perfectamente el espacio aprovechable. Además, se le puede dar un valor a cada bloque, definiendo zonas con diferentes litologías, esto con el fin de calcular los volúmenes aproximados de los diferentes materiales.

Para el cálculo de las reservas de la cantera Las Cóncavas, se utilizó el diseño de final de cantera como superficie base y la topografía actual como superficie tope, se utilizaron bloques de 125 m³, es decir de 5 metros de largo para cada arista del cubo.

La siguiente figura presenta el modelo de bloques para la cantera Las Cóncavas (figura 5.5)

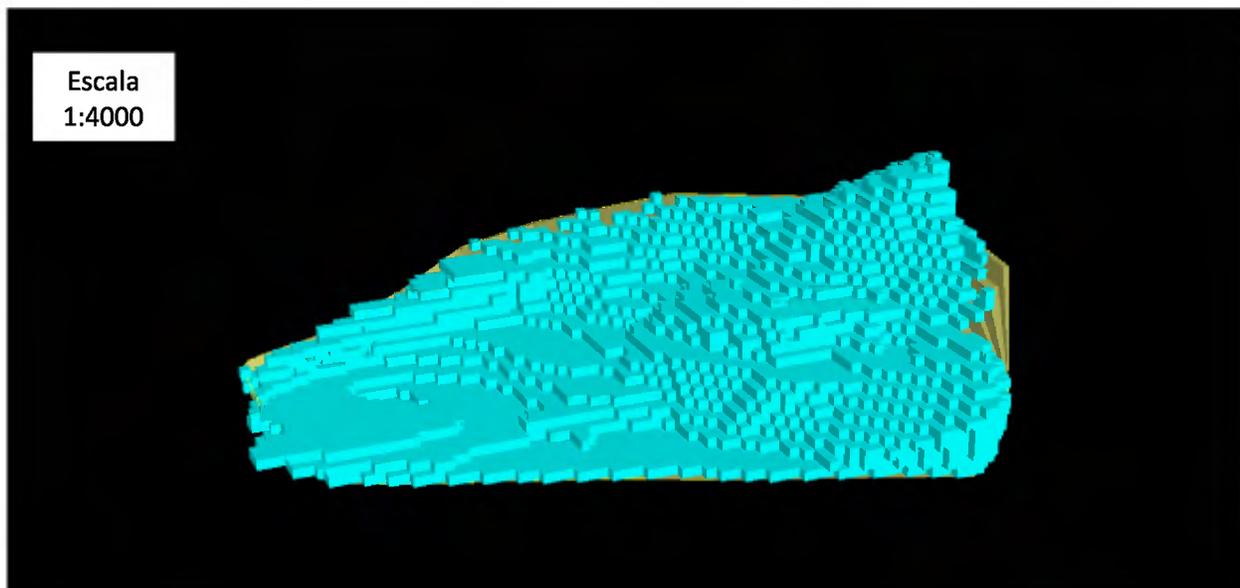


Figura 5.5 Muestra el modelo de bloques para el área de concesión del tajo las cóncavas, en total engloba 11 484 bloques de 5 metros de arista.

Como anteriormente se mencionó, la ventaja con la utilización de esta metodología, es que además de la alta precisión a la hora de discretizar el yacimiento, se puede incluir información sobre el tipo de roca o su uso proyectado con el fin de ajustar aún más las reservas reales que son utilizables dentro de la cantera.

Gracias a la información acumulada en los estudios de geología de campo, los estudios de sísmica de refracción y tomografía sísmica de refracción, así como el desarrollo mismo del tajo, el cual permite la constante actualización de la geología, se puede obtener un modelo de bloques, señalando los tipos materiales y su disposición dentro de la cantera.

Finalmente, se le otorga a la administración del tajo el modelo mostrado en la figura 5.6

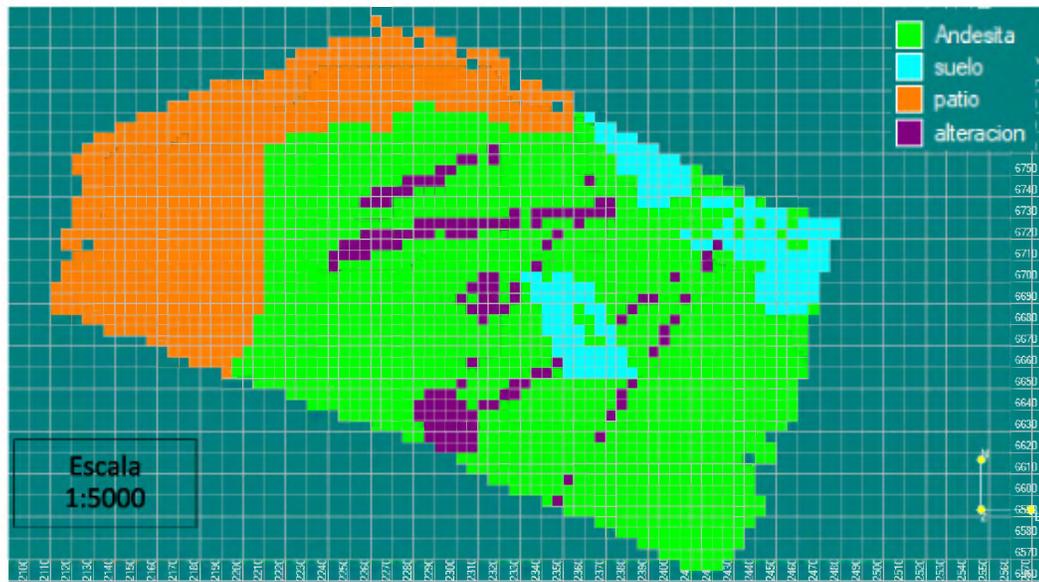


Figura 5.6 Muestra el diseño final de cálculo de reservas con sus respectivos materiales identificados y zonificados.

Sobre dicha figura, se puede planear y proyectar los materiales que se van a encontrar en las diferentes zonas del tajo, esto con el fin de adelantarse y proyectar las metodologías de extracción y los materiales a extraer.

En la figura 5.7, se muestra el modelo anterior de manera tridimensional con el fin de observar de mejor manera la distribución de los materiales presentes, donde se muestra de color verde las zonas potenciales para encontrar roca sana, de color morado las zonas donde se espera encontrar roca alterada, de color celeste las zonas donde se encuentran suelo, y de color anaranjado las áreas en donde se ubican zonas que ya no se consideran explotables por la administración

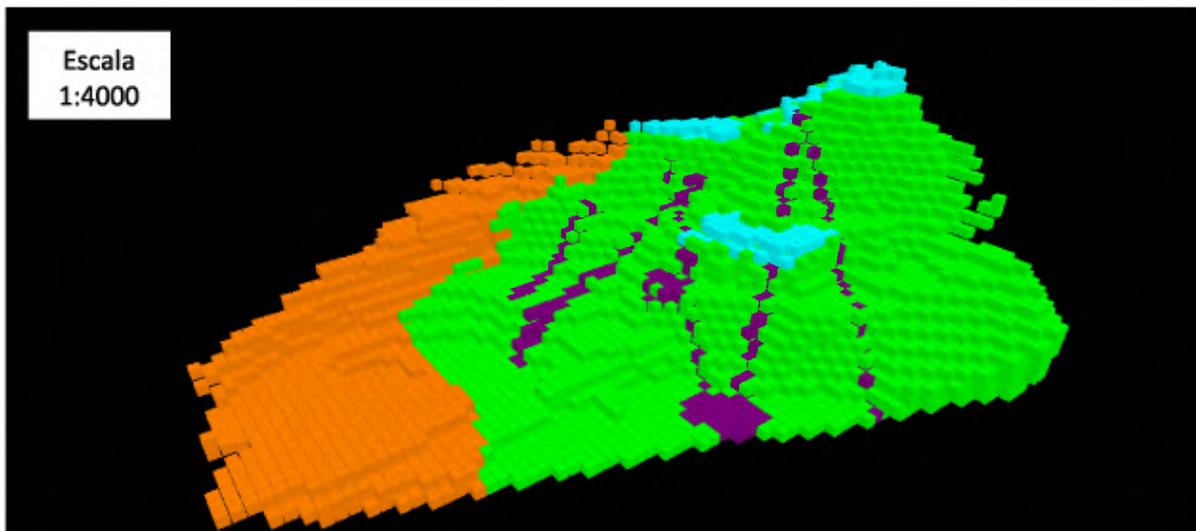


Figura 5.7 Muestra el modelo de bloques, con la información ingresada y diferenciada por colores.

Con el modelo anterior es posible realizar cálculos diferenciados de los materiales presentes, esto se logra mediante la activación y desactivación de los bloques que compartan los mismos valores, permitiendo calcular y visualizar exclusivamente el volumen para los materiales deseados. Un ejemplo de esta selección de materiales se observa en las figuras 5.8 y 5.9.

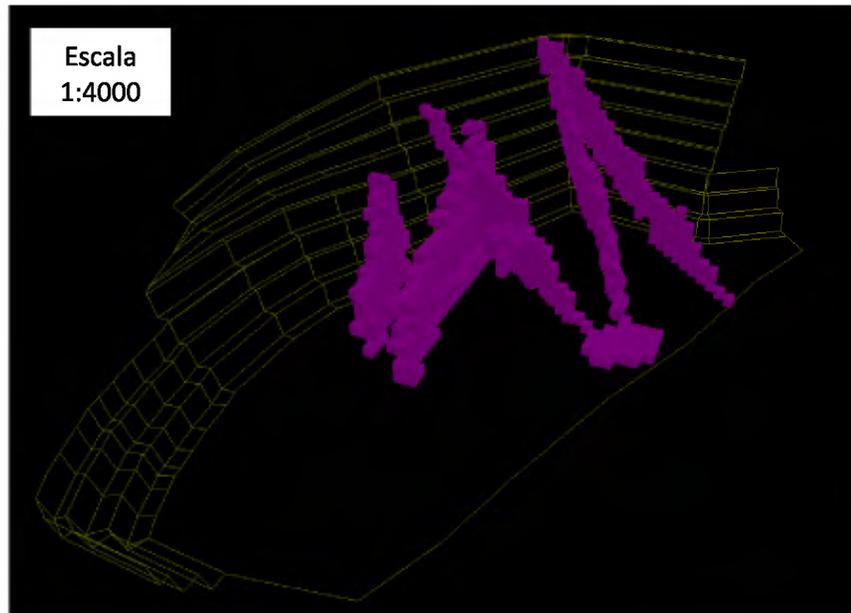


Figura 5.8 Muestra los bloques correspondientes con la zona en donde el modelo ubica áreas potenciales de alteración química.

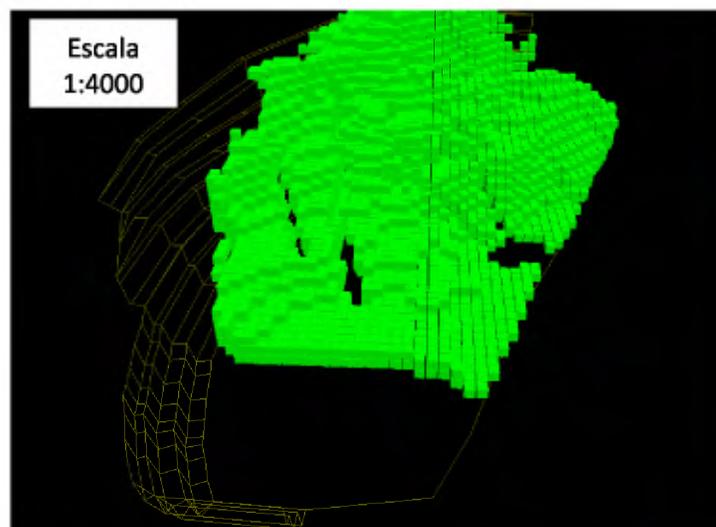


Figura 5.9 Muestra el macizo restante y el cual se considera material aprovechable. En esta imagen se eliminó, las zonas de alteración, el suelo y las zonas de patio y taludes finales.

Los valores finales de reservas, se calcularon con ambas metodologías, sin embargo, una de las condiciones para la participación del tajo en el presente estudio, fue no revelar dichos valores finales. Empero, es posible mostrar los porcentajes de material presentes, los cuales están directamente relacionados al cálculo de reservas y a las reservas presentes en la concesión.

Material Total Calculado	100%
Material de Alteración	18 %
Suelo	4 %
Zonas inutilizables (Patio y zonas de taludes finales)	23%
Total Aprovechable	55%

En definitiva, el modelo nos muestra que al menos un 40% del volumen total en la concesión, lo conforma material que no necesariamente presenta la mejor característica para ser comercializado como material rocoso, sin embargo, el material de alteración, puede ser utilizado como componente en la conformación de lastre y bases granuladas. Tomando esto en cuenta, se puede incluir parte de este material dentro del valor de volumen total aprovechable, incrementando las reservas en un 18%, obteniendo un porcentaje total de 73% de reservas aprovechables.

Ahora queda realizar recomendaciones sobre las metodologías de extracción que se pueden utilizar, según los materiales, la ubicación y la calidad, que el modelo anterior ofrece, dichas recomendaciones serán desarrolladas en el siguiente apartado.

5.2 Tajo San Buena

Diseño de Cantera

De igual manera se desarrollan las propiedades del tajo, con el fin de identificar los aspectos necesarios para desarrollar el diseño del presente caso:

Propiedades Intrínsecas

- Disposición y ubicación de los materiales geológicos de interés:

El material de interés para la administración del Tajo San Buena, representa la totalidad del cerro que se plantea para la nueva extracción, ya que en su totalidad se encuentra compuesto por caliza. Las únicas variaciones que se encuentran es la disposición de las concentraciones químicas dentro del cerro, por lo que el diseño debe contemplar un acceso permanente a todas las áreas donde se han identificado zonas de importancia química.

- Elementos geológicos presentes (estructural, hidrogeológico, geomorfológico).

Estructuralmente el tajo presenta evidencias de planos de fallas que se orientan en promedio este-oeste, con evidencias de movimientos de cizalle y con componente inverso. Si bien se identifican dichos planos y fracturas, las mismas no corresponden con el actual régimen de esfuerzos regional, por lo que se consideran fallas no neotectónicas.

Hidrogeológicamente no se han encontrado evidencias de acuíferos cercanos, y de existir, podrían presentarse con contaminación salina, ya que la influencia del Golfo de Nicoya y las salinas cercanas al terreno del tajo, hacen posible dicha situación. De igual manera a la cota que se desea explotar, es el piso en el que actualmente se desarrollan los procesos de trituración y acopio, y a este nivel no se tienen señales de brotes de agua o acuíferos someros.

Geomorfológicamente el cerro a explotar se caracteriza como un cerro relictivo, con fuertes pendientes en sus laderas y con cimas planas y espaciosas, esta geomorfología facilita la explotación del mismo, dado que se pueden generar patios de explotación con mayor facilidad.

- Consideraciones técnicas del macizo rocoso (estabilidad de taludes, altura de los bancos, ancho máximo de las bermas)

Normalmente estos estudios deben de ser actualizados según el avance del tajo y según las zonas que se identifiquen inestables debido a su fracturamiento o por la formación de cavernas. En este caso el alcance de este estudio no contempla el análisis de estabilidad de taludes, por lo que las especificaciones técnicas para realizar el diseño se extraerán del Programa de Explotación del Proyecto. Para este proyecto se especifica que los taludes deben de tener un ángulo de reposo no mayor a 70° y una altura máxima de banco de 7 a 10 m. De igual manera se considera con estas dimensiones se ajustan a los equipos que se tienen tanto para la extracción como la perforación.

- Topografía y áreas de acceso del tajo

La topografía en los alrededores del cerro es plana por completo, únicamente el cerro presenta una elevación considerable. Esto facilita la conformación y planeación para caminos de acceso y zonas de acarreo y acopio. Al sur del cerro si se presenta una zona de manglar y salinas, por lo que esta zona no puede ser utilizada para realizar trabajos y se recomienda dejar una zona de contención para evitar impactos en estos ambientes naturales.

Propiedades Extrínsecas

- Facilidad Operacional: Se debe de considerar el tránsito y operación del tipo de maquinaria existente en el tajo.

Al haberse analizado las características de acceso y del macizo, las pistas o rampas deben de tener las siguientes especificaciones, las cuales se obtienen basadas en el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera (RGNBSM) del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital de España y en el Reglamento de Seguridad Minera, Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería de Chile.

Rampas y pistas de acceso:

- Serán de 2 carriles, esto con el fin de optimizar al máximo el volumen de extracción. Los caminos deberán de conectar todas las bermas de producción.
- Tendrá un ancho de 11 m, lo que considera, dos carriles de 3 metros de ancho y separación de 1 metro entre ellos, una separación del pie del talud de 2 m y considerando una berma de seguridad de 2.
- Las rampas de acceso deben de mantener, en la medida de lo posible, pendientes no mayores a 15%.
- Deben de considerar una convexidad de al menos 1° del centro a ambos lados del carril, con el objetivo de dar salida al flujo de escorrentía.
- No se tienen previstas virajes de más de 20°, por lo que no se calcula los radios de virajes mínimos para cada equipo móvil.

Bermas y patios de producción:

- Deberán contar con dos accesos independientes, esto con el fin de mantener un solo sentido de conducción de la maquinaria, tratando de evitar accidentes en los caminos de tránsito y la pérdida de impulso para camiones que vayan subiendo pendientes.

- Elementos cercanos a la cantera, susceptibles a percibir efectos de la actividad minera

Afortunadamente en los alrededores del proyecto se ubican terrenos utilizados para la misma extracción de material, en otras partes de la concesión, y algunas zonas para actividades de pastoreo de ganado y potrero, por lo que ninguna actividad humana se verá afectada con el avance de la actividad y la implementación del nuevo diseño.

Si se debe de tomar en consideración que, al extremo sur del cerro, se presentan zonas de manglar y salinas, por lo que dentro del diseño se contemplará una zona de contención para evitar que efectos negativos relacionados con la actividad minera impacten dichas zonas naturales.

- Consideraciones legales (Directrices de la Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, directrices u observaciones técnicas de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental)

La fiscalización del ente rector de la minería en Costa Rica, estipula una serie de directrices específicas para cada proyecto por aparte, en el caso del tajo en estudio, ninguna limita la conformación del diseño, por lo que se instará a cumplir al desarrollador con las regulaciones ambientales, y las medidas de control y compensación ambiental a las que se comprometieron.

Con todas las variables anteriormente considerada, se elaboró el siguiente diseño de cantera, el cual utiliza todo el espacio y las reservas de la concesión. La cota mínima de extracción se establece a los 20 m.s.n.m. Dicho diseño se observa en la figura 5.10.

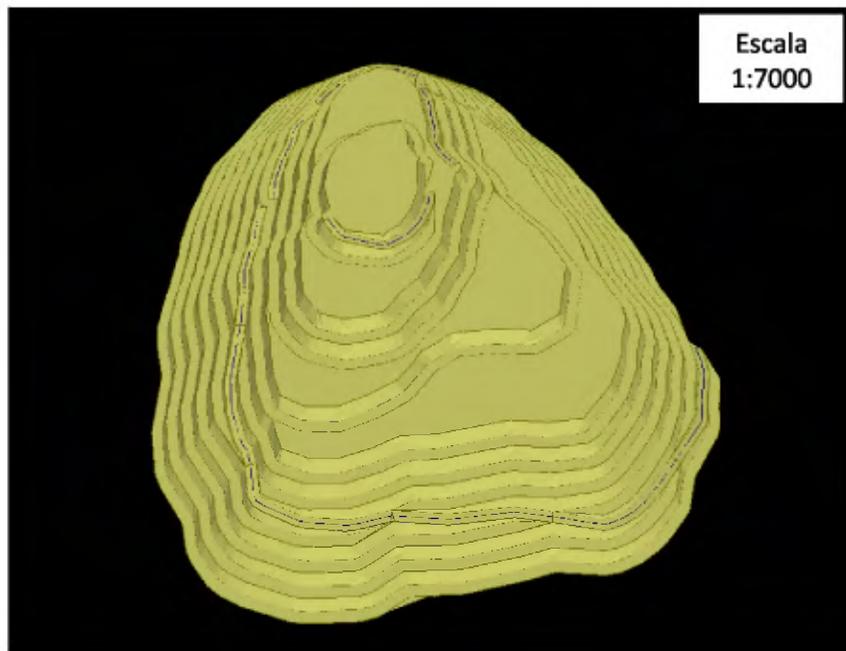


Figura 5.10 Muestra el diseño de cantera propuesto, en la imagen superior se tiene el diseño con las curvas de nivel, mientras que en la imagen inferior se observa como un sólido.

El diseño anterior consiste en la propuesta para el diseño de inicio, es decir las primeras definiciones de bermas y rampas. Su explotación total es la remoción completa del cerro hasta la cota 20 m.s.n.m. El anterior diseño tiene las siguientes características:

- Sistemas berma/talud de 7 m de alto máximo, con bermas de 5 metros, llegando a una cota mínima de 20 msnm.
- Rampas de acceso a bermas de 10% máximo de pendiente, con un ancho de 11 metros máximo, el cual puede variar dependiendo del flujo de maquinaria que transite cierta rampa, de ser un flujo en donde sólo se tiene un ciclo (una sola maquinaria cargando y descargando) se pueden tener rampas de hasta 5 m.
- Drenajes o cunetas en cada una de las bermas para el manejo de las aguas superficiales.

La elaboración del presente diseño es indispensable para el siguiente paso: los estudios de cálculos de reserva.

Cálculo de reservas

Para el análisis se utilizará el programa informático RecMin, utilizando como área aprovechable el diseño de explotación inicial propuesto, tomando como base la cota máxima de explotación.

Metodología de los Perfiles

La implementación de esta metodología, evidenció una deficiencia a la hora de aplicarla en tajo se geometría irregular, ya que el método se sustenta en la conformación de supuestos prismas regulares, los cuales no son tan precisos en tajos donde se encuentran áreas curvadas o diferencias en topografía muy abruptas. Para eliminar esta limitante, se deben de incrementar los perfiles a considerar en el cálculo de las reservas, incrementando el procesamiento matemático a realizar.

Para este caso se realizaron un total de 20 perfiles, en una orientación N-S, como se muestra en la figura 5.11

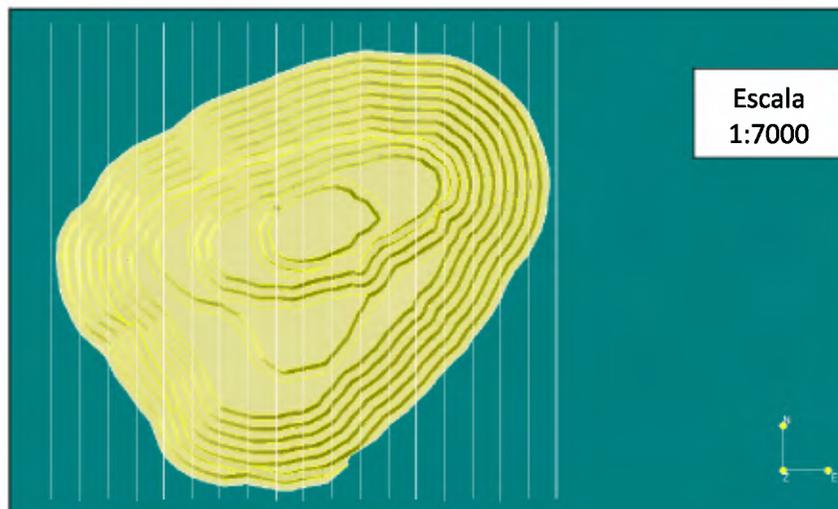


Figura 5.11 Muestra los perfiles (líneas verticales blancas, orientadas N-S) utilizados para la realización del cálculo de reservas.

Cada 2 perfiles se define un bloque con el área promedio de sus extremos y la longitud entre estas superficies también conocidas, con lo que es posible aproximar el volumen entre estas dos superficies.

Con el software Recmin se realizan los perfiles que se utilizaran para los cálculos (Figura 5.12), el mismo programa calcula el área entre las superficies, y conociendo el valor de separación entre los perfiles, realiza el cálculo final arrojando el valor del volumen aproximado (figura 5.13), con esta metodología.

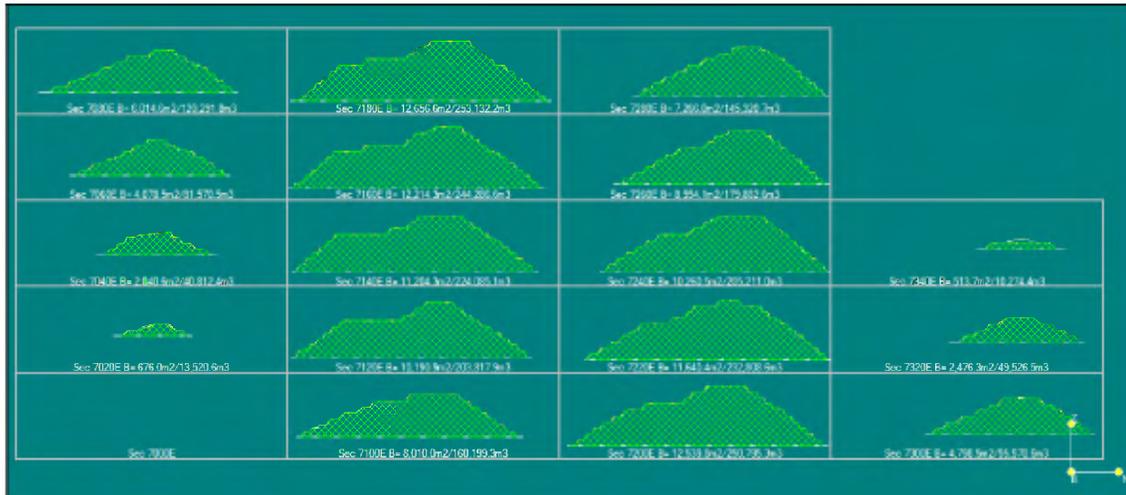


Figura 5.12 Muestra las secciones utilizadas por el programa, para el caculo de las reservas por medio de la metodología de los perfiles transversales.

```

Coordenadas Este :
Mínimo = 7002.85, Máximo = 7355.3
Coordenadas Norte :
Mínimo = 9425.67, Máximo = 9740.74
Coordenadas Z :
Mínimo = 20, Máximo = 90
  
```

Sección	Area	Paso	parcial	Total
7,002.85	0.00			
7,022.85	859.69	20.00	8,596.90	8,596.90
7,042.85	2,274.03	20.00	31,337.20	39,934.10
7,062.85	4,365.72	20.00	66,397.50	106,331.60
7,082.85	6,316.78	20.00	106,825.00	213,156.60
7,102.85	8,301.50	20.00	146,182.80	359,339.40
7,122.85	10,379.98	20.00	186,814.80	546,154.20
7,142.85	11,352.98	20.00	217,329.60	763,483.80
7,162.85	12,300.52	20.00	236,535.00	1,000,019.00
7,182.85	12,684.12	20.00	249,846.40	1,249,865.00
7,202.85	12,441.04	20.00	251,251.60	1,501,117.00
7,222.85	11,499.29	20.00	239,403.30	1,740,520.00
7,242.85	10,073.48	20.00	215,727.70	1,956,248.00
7,262.85	8,803.98	20.00	188,774.60	2,145,023.00
7,282.85	6,952.54	20.00	157,565.20	2,302,588.00
7,302.85	4,499.83	20.00	114,523.70	2,417,112.00
7,322.85	2,137.70	20.00	66,375.30	2,483,487.00
7,342.85	422.81	20.00	25,605.10	2,509,092.00
7,355.30	0.00	12.45	2,631.99	2,511,724.00

Figura 5.13 Muestra un reporte de los resultados matemáticos realizados por el programa para realizar el cálculo de las reservas mediante la metodología de los perfiles.

Finalmente, el programa arroja un valor que corresponde con el volumen encerrado entre las secciones realizadas.

Metodología de los Bloques

Esta metodología ubica las coordenadas del espacio delimitado entre las dos superficies (base y tope) y la rellena con bloques regulares de igual volumen, activando los bloques que se encuentren encerrados por dichas superficies. La limitante que se identificó con esta metodología es que, en tajos de geometría irregular, se debe de disminuir el tamaño del bloque con el fin de que se ajuste lo más posible al diseño. Al disminuir el tamaño del bloque, se aumenta el procesamiento de cálculo, sin embargo, se logra una precisión bastante alta a la hora de calcular el volumen de los bloques, ya que estos rellenan perfectamente el espacio aprovechable. Además, se le puede dar un valor único a cada bloque, definiendo zonas con diferentes litologías, esto con el fin de calcular los volúmenes aproximados de los diferentes materiales.

Para el cálculo de las reservas del Tajo San Buena, se utilizó el diseño inicial de explotación como superficie tope y la cota máxima de explotación como superficie base, se utilizaron bloques de 8 m^3 , es decir de 2 metros de largo para cada arista del cubo.

La siguiente figura presenta el modelo de bloques para el tajo San Buena (figura 5.14).

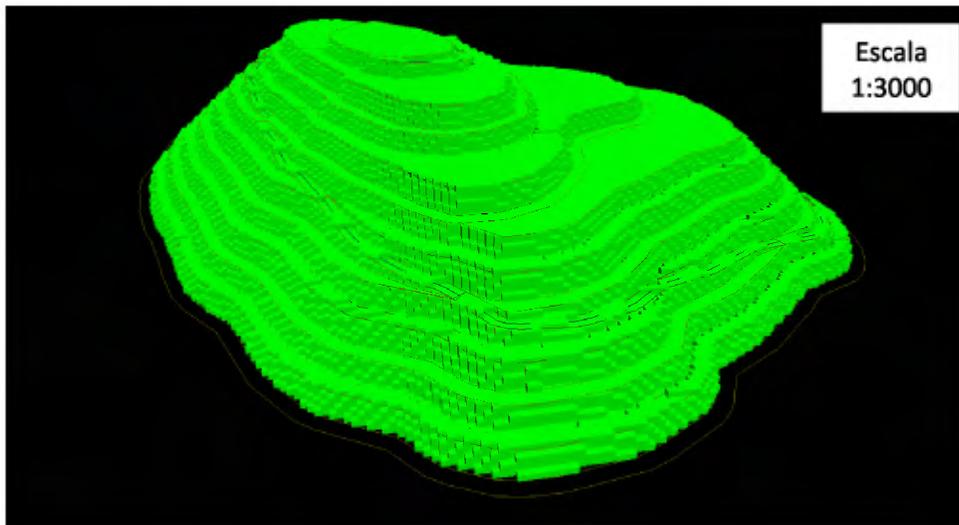


Figura 5.14 Muestra el modelo de bloques calculado para el Tajo San Buena, donde se utilizaron 275465 bloques de 8 m^3 de volumen cada uno.

La ventaja con la utilización de esta metodología, es que además de la alta precisión a la hora de discretizar el yacimiento, podemos incluir información sobre el tipo de roca o su uso proyectado con el fin de ajustar aún más las reservas reales que son utilizables dentro de la cantera.

Gracias a la información acumulada en los estudios de geología de campo, los estudios de sísmica de refracción, tomografía sísmica de refracción y en este caso el geoquímico principalmente, se puede obtener un modelo de bloques, señalando las concentraciones de ciertos elementos en el macizo y su disposición dentro de la cantera.

De igual manera, los valores finales de reservas, se calcularon con ambas metodologías, sin embargo, una de las condiciones para la participación del tajo en el presente estudio, fue no revelar dichos valores finales.

No obstante, se presenta, al igual que para el caso del tajo Las Cóncavas, los porcentajes asociados a las áreas designadas como frentes de explotación, calculados para las zonas donde se tienen mayores concentraciones de CaO y mayores concentraciones de SiO₂.

En el siguiente cuadro se observan los porcentajes, de las áreas propuestas para los frentes de explotación del cerro:

Área Total Calculado	100%
Área con alto contenido en CaO	18 %
Área con alto contenido en SiO	12 %
Restante a estudiar químicamente	70%

El cuadro anterior, posee valores de áreas, ya que la prospección fue superficial y no en profundidad debido a la falta de la maquinaria adecuada. De igual manera arroja un dato de mucha ayuda, ya que identifica el área total en donde se conoce la concentración química del macizo, dejando como zonas conocidas un 30%, el cual es más que suficiente para el inicio de operaciones del tajo, mientras se reduce ese 70% en donde no se conoce aún la química del macizo.

Al igual que en el caso del Tajo Las Cóncavas las especificaciones técnicas de los sistemas berma/talud fueron extraídas de informes técnicos y estudios realizados por la administración del tajo. De igual manera se deja una base de datos necesarios para realizar análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos, ya que se tiene mediciones de fracturas y discontinuidades, su estado y condición, además de los valores de la velocidad de onda P, la cual se puede utilizar en valoraciones de caracterización de macizo rocoso como por ejemplo el realizado en el Método Q, desarrollado por Barton, Lien y Lunde.

Finalmente, se le entrega a la administración del tajo el modelo de diseño de cantera mostrado en la figura 5.15.

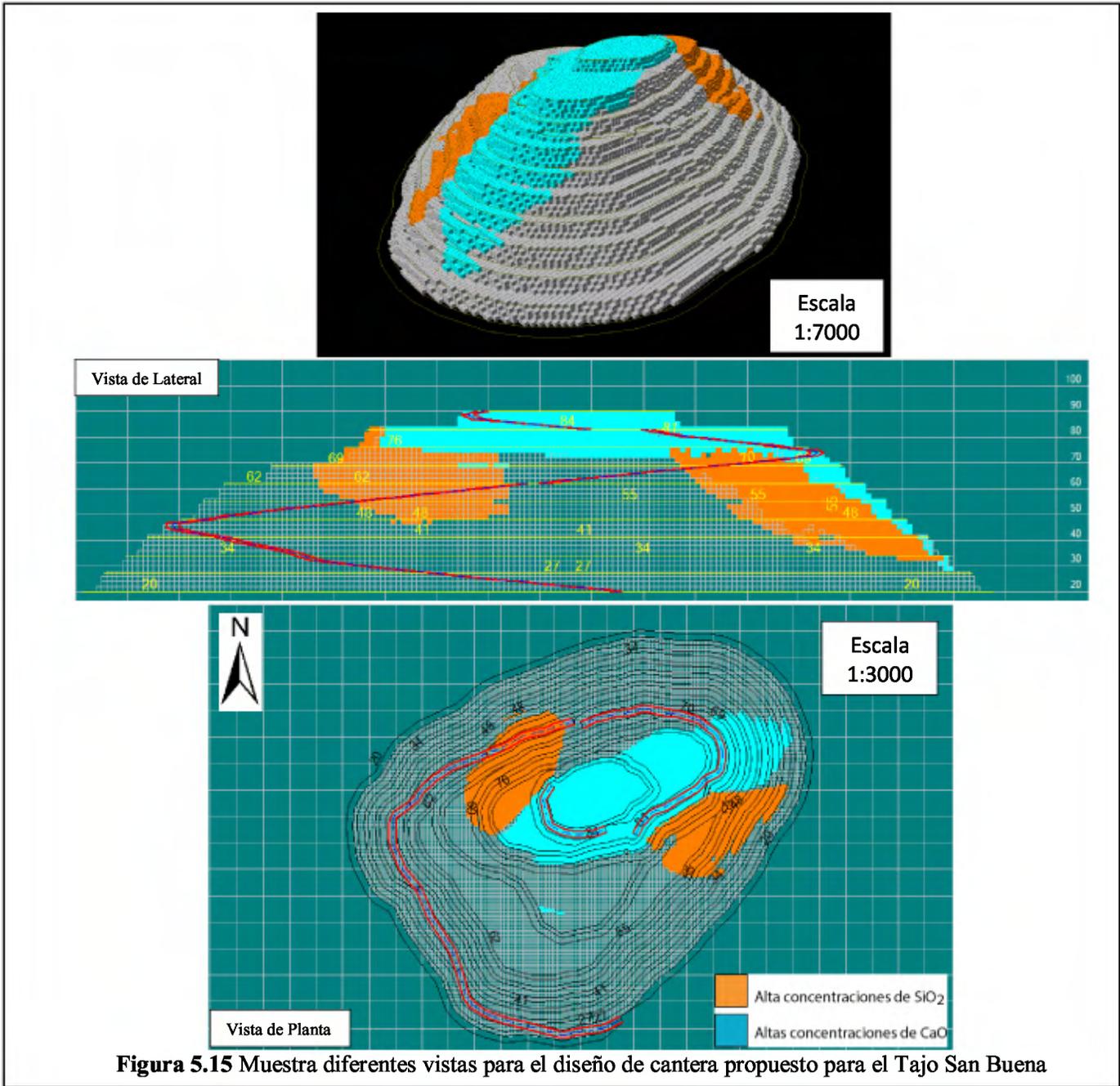


Figura 5.15 Muestra diferentes vistas para el diseño de cantera propuesto para el Tajo San Buena

En las imágenes anteriores se observa el modelo propuesto, junto con las cotas de cada una de las bermas de producción, las cuales se recomienda respetar a lo largo de toda la fase operativa del cerro, también se ubican los caminos de acceso a todas las bermas, además de las zonas en donde se encontraron las mayores concentraciones de CaO (color celeste) y SiO (color anaranjado).

6. Consideraciones para la explotación y extracción óptima

Con base en la información generada por los estudios geológicos, geofísicos y de cálculo de reservas, se puede generar una propuesta para la optimización de los procesos de extracción. Esto por medio de la aplicación de una correcta y responsable aplicación de procesos de voladura, a continuación, se explicará brevemente el proceso recomendado para la extracción en los casos de estudio.

Metodología de extracción por explosivos

El uso de explosivos para la extracción de roca en las canteras a cielo abierto o minas subterráneas, es una práctica común en muchos de las concesiones minera del país, pero en muchas ocasiones no se realiza de la manera más óptima, debido a que no se tiene un conocimiento amplio del tema y de las condiciones de la roca a extraer, por lo que se puede dar escenarios de usos indebidos o sobrediseño de mallas de voladura, lo que posteriormente puede desencadenar en resultados inesperados en la fragmentación de la roca, y hasta accidentes por proyectiles de roca o “*Fly Rock's*” que al descender a gran velocidad pueden ocasionar daños en infraestructura y hasta en personas. Todos estos aspectos negativos de la mala implementación de las voladuras, desencadena en pérdidas para el desarrollador, teniendo que incurrir en gastos innecesarios, como aplicación de martillos hidráulicos para reducir rocas de sobretamaño. (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987)

Para comenzar con una adecuada programación y diseño de voladura se debe de tener en cuenta la importancia que juega la perforación de los hoyos, la cual determina en gran medida el desarrollo y el resultado de esta metodología de extracción. Principalmente, la malla de perforación debe de ir orientada de manera que corte perpendicularmente las principales familias de fracturas identificadas en el macizo; también debe de guardar una adecuada relación entre la profundidad y las dimensiones de la malla; entre algunas otras variables que deben de ser consideradas por un profesional con conocimiento no sólo en diseño de voladuras, sino también en la geología a extraer. (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987)

Entre los productos a escoger para la realización de la voladura, se tienen los explosivos de carga de pozo, y los detonadores, los cuales conforman los productos mínimos para realizar una voladura. Un aspecto importante a la hora de clasificar y escoger explosivos para una u otra voladura, es la velocidad de detonación, la cual se define como la velocidad de frente de onda que viaja a través de un explosivo en el momento de su detonación, y está directamente relacionada a la potencia otorgada por el explosivo, es decir a la potencia por unidad de tiempo, que genera. Por lo tanto, explosivos con mayor velocidad de detonación, serán más potentes que aquellos con una menor velocidad. (Legorburu Zuazua & Sánchez Barbero, 2012)

Entre los explosivos industriales encontramos:

- ANFO: Se define como combustible a base de nitrato de amonio o *Ammonium Nitrate - Fuel Oil*, por sus siglas en inglés, se encuentra compuesto de *prills* de nitrato de amonio combinados con diésel y un químico rojo llamado waxoline, el cual es utilizado para diferenciar el nitrato de amonio agrícola del nitrato industrial (figura 6.1). Es uno de los productos más importantes y de más bajo costo, en los procesos de extracción por explosivos y ampliamente recomendado para voladuras en rocas competentes y/o con alto grado de fracturación, ya que, al momento de detonar, libera gran cantidad de gases los cuales ayudan a la apertura de microfracturas en la roca, además de ayudar al desplazamiento del material. Posee una velocidad de detonación de 4800 m/s.



Figura 6.1 Saco de ANFO

- Emulex: Este producto es clasificado dentro de los explosivos tipo gel, el cual posee una velocidad de detonación mayor que el ANFO, generando velocidades de 5200 m/s, por lo que normalmente se utiliza como explosivo iniciador. Se puede encontrar en diferentes presentaciones, en función del tamaño del hoyo (figura 6.2).



Figura 6.2 Presentación del explosivo tipo gel o emulsión.

- Hidromita: Se clasifica como explosivo tipo gel no sensitivo, el cual posee una velocidad de detonación mayor que el ANFO, pero menor al emulex, y es utilizado normalmente en situaciones donde existen la presencia de agua, esto debido a que el ANFO es soluble en agua, por lo que se puede perder antes de realizar la detonación de la voladura. Existen

varias dimensiones del explosivo 50 x 200 mm, 30 x 400 mm, dependiendo del hoyo que se perfora. Posee una velocidad de detonación de 5200 m/s.

Los anteriores productos conforman lo que se denomina como la carga de pozo, ya que son los productos que se introducen en el pozo y liberan la energía necesaria para la fracturación y desplazamiento del material. Es importante aclarar que todos estos productos se desintegran y transforman en calor y gases, al momento de la detonación, por lo que no queda ningún residuo en la roca fracturada.

Para iniciar los diferentes pozos cargados con los anteriores productos, se utilizan detonadores, de estos se tienen 3 tipos: los no eléctricos, los eléctricos y los electrónicos, todos son utilizados para traspasar la energía de detonación de pozo a pozo, entre filas de pozos y desde la fuente inicial.

Dentro de los detonadores no eléctricos se utilizan:

- *Dual Delay*: Son tubos de pequeños diámetros, que llevan dentro pequeñas cantidades de explosivo recubierto por capas plásticas para evitar su evaporación y contacto con el ambiente, en ambos extremos posee detonadores los cuales transmiten la energía al resto del arreglo (figura 6.3). Estos detonadores pueden tener diferentes tiempos de retraso según sea el diseño de la voladura.



Figura 6.3 Detonador Dual-Delay, de 25 milisegundos (ms) en superficie y 500 ms en profundidad.

- *In Hole Delay*: Este tipo de detonadores son utilizados en minería subterránea principalmente, ya que solo posee un detonador en uno de sus extremos, los cuales tienen diferentes retrasos, según el diseño de voladura (figura 6.4).



Figura 6.4 Detonador In Hole Delay.

- *Quick Delay*: Estos detonadores se conocen como conectores de superficie, ya que permiten la transmisión de la energía de detonaciones entre líneas de pozos, poseen un solo detonador en uno de sus extremos, el cual de igual manera puede tener diferentes tiempos de retrasos, según sea el diseño de voladura (figura 6.5).



Figura 6.5 Detonador Quick Delay.

Por otro lado, también se utilizan detonadores eléctricos, los cuales se inician por medio de la recepción de una carga eléctrica, la cual activa el detonador (figura 6.6). Estos detonadores son utilizados normalmente para iniciar el proceso de voladura en general, debido a su manejo seguro de iniciación.



Figura 6.6 Detonador eléctrico.

El proceso de voladura inicia, como anteriormente se detalló, con la perforación de los hoyos en la roca, posteriormente se realiza el carguío de explosivo en dichos pozos, la cantidad de explosivo para cada pozo está definido por el factor de carga que se establezca, normalmente los pozos no son rellenados en su totalidad de explosivo, por lo que ese restante es rellenado con un taco, el cual se recomienda que sea grava de entre 1/2" y 3/4". Posteriormente se realiza el amarre, el cual tiene como objetivo unir los pozos y que a la hora de la detonación salgan con una secuencia establecida, la cual se logra con los retrasos en los detonadores dual delay y los conectores de superficie quick relay, dicha secuencia es necesaria para un adecuado fracturamiento y desplazamiento del material volado.

En el caso del carguío en los macizos calcáreos, en algunas ocasiones se pueden presentar zonas de cavernas o alta fracturación, en donde se dan pérdidas de explosivo, debido al escape del mismo por estas zonas, para este tipo de situaciones se recomienda utilizar la metodología de conformación de "Decks" (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987), la cual aísla la zona de pérdida por medio de sellos, los cuales retienen el explosivo dentro de las zonas donde no existe pérdida (figura 6.7) , para esto se debe de tener conocimiento de las zonas de caverna.

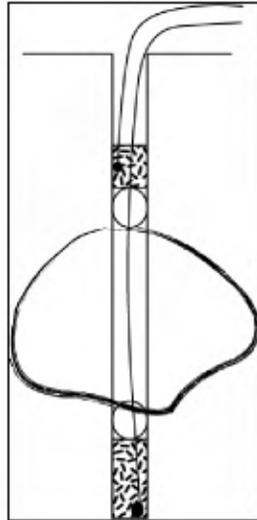


Figura 6.7 Muestra la aplicación de la metodología “Decks”

6.1 Tajo Las Cóncavas

Hasta el momento se ha comprobado que, en el frente de extracción actual se tienen diferentes comportamientos en los materiales, generados por la meteorización química de rocas andesíticas. Estas áreas de meteorización generan que la roca caja y circundante carezca de propiedades físicas requeridas para ser utilizada como agregado lítico. El modelo establecido en estos estudios, sitúa los espacios en donde aparece este tipo de roca, cercano a zonas donde se han identificado fracturas principales, las cuales se orientan en una dirección promedio de 236° azimuth. En el presente apartado se realizarán recomendaciones técnicas sobre las zonas recomendadas para la extracción de materiales, la metodología adecuada para optimizar dicho proceso y además se analizará brevemente la capacidad instalada del tajo y su relación con las reservas reportadas.

El modelo propuesto se observa en la imagen 6.8.

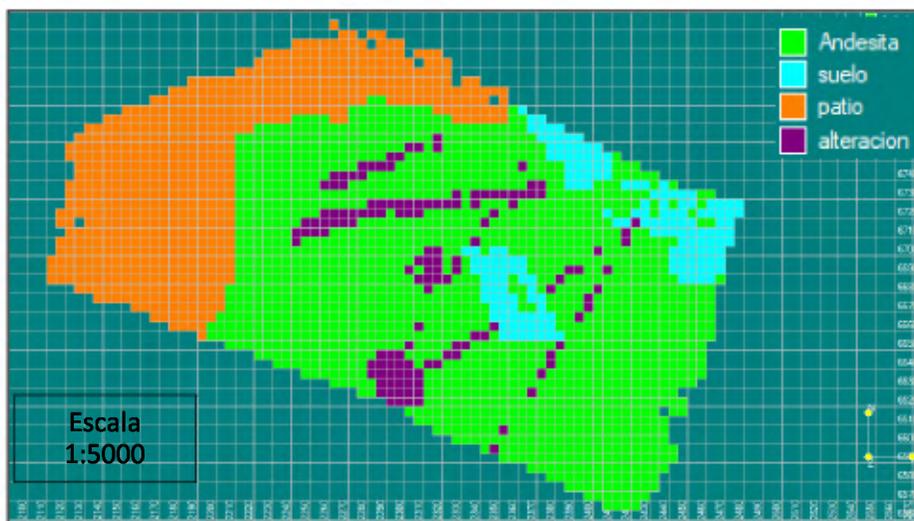


Figura 6.8 Muestra el modelo presentado, sobre el cual se propone realiza la extracción mediante explosivos.

Elementos a considerar para la Extracción

Los procesos extractivos van a estar condicionados por la demanda en el tipo de material que el tajo comercialice y la maquinaria que dispone para llevar a cabo la extracción de materiales. Con respecto a la maquinaria, se debe de tener un control de rendimientos diarios, tener indicadores de trabajo y eficiencia, para conocer si se está llevando a cabo una adecuada extracción. A continuación, se describe la maquinaria disponible en el Tajo Las Cóncavas, para llevar a cabo el proceso de extracción:

Capacidad Instalada (equipo móvil y quebrador)

- Quebrador:
 - Apertura: 14*18 pulgadas
 - Capacidad diaria: 250 m³
- Equipo Móvil:
 - Cargador Frontal: 3 m³
 - Excavadora: 1,5 m³
 - Vagonetas: 10 m³ y 30 m³
- Equipo de perforación (Diámetro): Diámetro fijo 3,5 pulgadas (el diámetro puede ser, variable, de variar el diámetro se deben de hacer ajustes en la malla)
- Horas de Trabajo: 72 horas semanales.

Con las características anteriores el quebrador limita la producción mensual, siendo esta de 6 000 m³ aproximadamente.

Tipo de material a comercializar

Dependiendo de la demanda que posea la cantera, podrá direccionar sus acciones de extracción a alguna de las zonas que indica el modelo. Por ejemplo, para el procesamiento de materiales competentes para el procesamiento en quebrador, se recomienda realizar la extracción en las zonas oeste de las zonas estudiadas, donde se observa en la figura 6.9

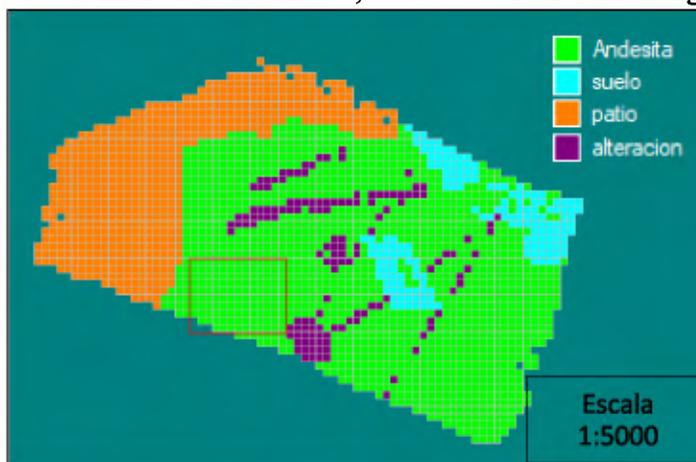


Figura 6.9 Muestra un ejemplo de cuadrante donde se modela roca competente para la producción de agregados.

Por otro lado, si se desea obtener mezcla de calidades de materiales, entre competente y material poco competente, el encargado podrá ubicar la voladura en las bermas superiores, donde se tiene zonas identificadas de alteración, generando una combinación entre materiales.

Metodología de extracción

Los métodos de extracción se pueden realizar mediante la utilización de explosivos (como normalmente se realiza en el tajo), y mediante la extracción con la retroexcavadora, removiendo la roca por medio de la acción mecánica que realiza dicha maquinaria. Con las variables de capacidad instalada se puede proponer la siguiente metodología de extracción por explosivos:

Para la utilización de explosivos en el Tajo Las Cóncavas, se recomienda considerar los siguientes aspectos:

- Orientación: Las mallas de voladura deben de realizarse perpendiculares a las familias de fallas predominantes, cuando se desea una buena fracturación del material. En caso de necesitar bloques de sobredimensión, se deben de planear paralelas a dichas fracturas, con el fin de abrir estas fracturas preexistentes y mantener las dimensiones de los bloques.
- Malla recomendada: Según (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987) el diseño de la malla se va a tener en función del diámetro de perforación para cada caso. En el tajo las cóncavas, se perfora a un diámetro de 3,5”, por lo que, para dicho diámetro, y en función de la admisión del quebrador se propone la siguiente malla de perforación:
 - Espaciamiento: 2,8 m
 - Burden: 2,8
 - Profundidad: Mínima 3 m, Ideal 6 m.

La anterior malla se debe de utilizar sobre materiales competentes, es decir en las zonas verdes del tajo, mientras que, para las zonas alteradas, la malla de perforación se puede ampliar, ya que el material es menos competente, permitiendo que, con eventos de baja energía se logre extraer el material, por lo que para estas zonas se recomienda la siguiente malla:

- Espaciamiento: 4 m
- Burden: 3,5 m
- Profundidad: Mínima 4 m, ideal 7 m.

Estas mallas de perforación se basan en la teoría del diseño de mallas de perforación, descrito en (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987), pero se debe se probar el comportamiento real en el campo. Dichas mallas están ligadas al siguiente aspecto y es uno de los más importantes para el uso de explosivos

- Factor de Carga: El Factor de carga se define como la cantidad de explosivo que se debe de utilizar para fragmentar un metro cubico de roca. Esto define la cantidad de explosivo que se debe de utilizar y la cantidad de material de taco con la que se debe de rellenar un hoyo, en orden de obtener la fragmentación deseada. Este factor debe de ser evaluado para

cada una de las voladuras que se vayan a realizar, ya que esto influirá en las variables del material a volar, su nivel de fracturamiento, elementos cercanos de la voladura entre otros. En general par canteras con materiales competentes y medianamente fracturados se puede considerar un factor de carga con rangos entre 0,2 – 0,35 kg/m³ (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987). Dicho rango se consigue calculando la carga lineal de explosivo en cada pozo, y dividiéndolo entre la cantidad de material que se pretende volar. La carga lineal es calculada mediante la siguiente fórmula:

$$Cl = 0.507 \times De \times D^2$$

Donde:

Cl: Carga lineal (kg)

De: densidad de explosivo

D²: Diámetro del hoyo expresado en pulgadas, al cuadrado.

Delimitación de bermas y frentes de explotación

Para llegar a obtener el diseño final deseado, se recomienda detallar topográficamente, las cotas sobre las cuales están conformadas los sistemas de berma/talud del diseño, dichas cotas se muestran en la figura 6.10.

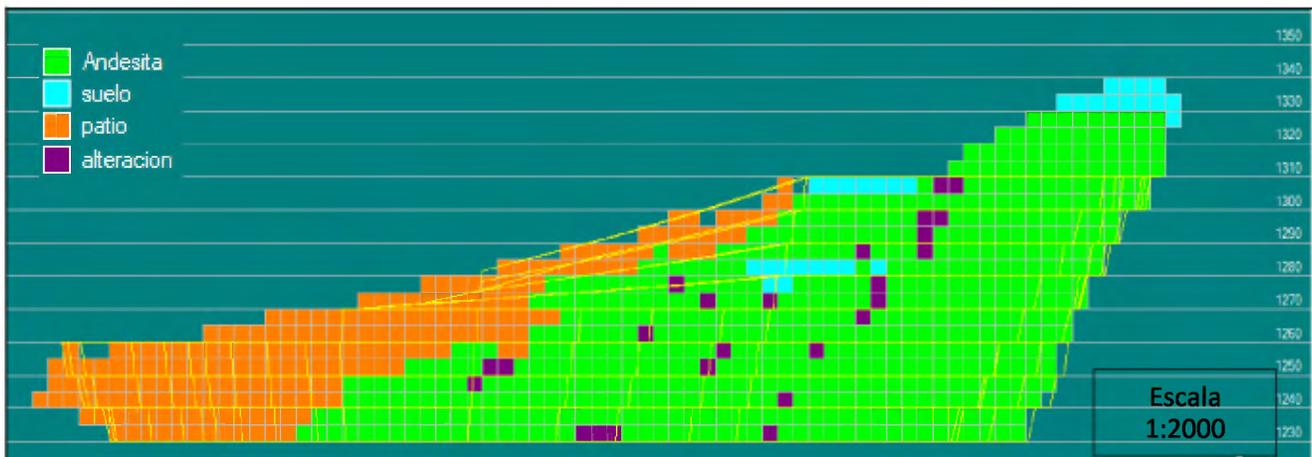


Figura 6.10 Muestra las cotas a las que se plantea la conformación de las bermas de producción.

Como se muestra en la figura anterior la cota mínima fue establecida a los 1230 m.s.n.m, por lo que la definición de las restantes bermas a lo largo del tajo, es de vital importancia para ir proyectando las bermas finales. Dichas cotas se establecen cada 10 m a partir de la cota mínima, siendo la última berma y cota máxima el valor de 1330 m.s.n.m. De igual manera se recomienda que para los taludes finales y las bermas finales, se realice un proceso de preparación para el macizo restante, el cual se denomina precorte, esta metodología evita un excesivo fracturamiento en el talud final, teniendo un efecto de filtro de las vibraciones y evita que hasta un 60% de las vibraciones evitando la formación de nuevas fracturas hacia el macizo que se pretende cuidar.

6.2 Tajo San Buena

Luego de realizar el cálculo de las reservas disponibles en el cerro, incluyendo consideraciones geoquímicas, geológicas y geofísicas, se tienen definidas las zonas donde el material presenta cierto interés químico, lo que, para efecto de extracción, delimita zonas únicamente, y no condiciona la extracción como tal. La geofísica realizada en el cerro, arrojó la presencia de horizontes bien definidos, en donde se encuentra suelo en los primeros 30 centímetros de profundidad, luego un horizonte de roca más fracturada, para luego dar paso a roca más sana y competente. A medida que el cerro se vaya desarrollando, se espera encontrar en su mayoría con este último horizonte, en donde la caliza se encuentra más sana y competente. El modelo establecido, comprende las zonas cercanas a planos o discontinuidades principales, los sitios con mayor fracturación y mayor probabilidad de encontrar cavernas, por lo que en estas zonas se debe de tener especial atención a la hora de llevar actividades de extracción.

En el presente apartado se realizarán recomendaciones técnicas sobre las zonas recomendadas para la extracción de materiales, la metodología adecuada para optimizar dicho proceso y además se analizará brevemente la capacidad instalada del tajo y su relación con las reservas reportadas.

El modelo propuesto se observa en la siguiente imagen 6.11.

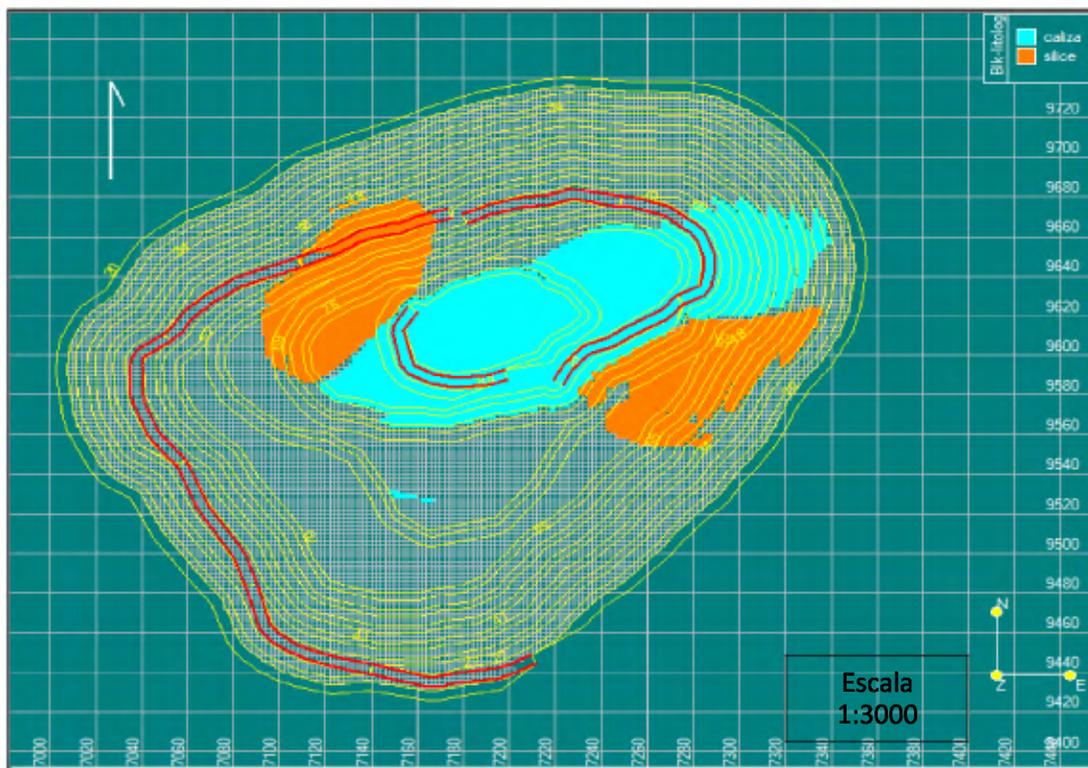


Figura 6.11 Muestra el diseño de cantera propuesto para el cerro a explotar en el Tajo San Buena.

Con base en este modelo se propondrá un modelo de avance para la correcta extracción y la optimización del proceso.

Elementos a considerar para la Extracción

Los procesos extractivos van a estar condicionados por la demanda en el tipo de material que el tajo comercialice y la maquinaria que dispone para llevar a cabo la extracción de materiales. Con respecto a la maquinaria, se debe de tener un control de rendimientos diarios, tener indicadores de trabajo y eficiencia, para conocer si se está llevando a cabo una adecuada extracción. A continuación, se describe la maquinaria disponible en el Tajo San Buena, para llevar a cabo el proceso de extracción:

Capacidad Instalada (equipo móvil y quebrador)

- Quebrador:
 - Apertura: 20*24 pulgadas
 - Capacidad diaria: 800 m³
- Equipo Móvil:
 - 2 Cargador Frontal: 3 m³
 - 1 Excavadora: 1,5 m³
 - 3 Vagoneta: 10 m³
 - Articulada: 30 m³
- Equipo de perforación (Diámetro): Diámetro fijo 3,5 pulgadas.
- Horas de Trabajo: 72 horas semanales.

Tipo de material a comercializar

Teniendo en cuenta que la totalidad del cerro mantiene una consistencia en la calidad de roca, teniendo en consideración los 3 horizontes y las zonas de falla, el único punto en donde se puede zonificar la extracción, es cuando se quiere tener una concentración química en específico. Como se ha puntualizado en el estudio geoquímico, las zonas con mayores contracciones químicas, para SiO y CaO, se encuentran zonificadas y ubicadas en el cerro.

Metodología de extracción

Considerando la capacidad instalada del tajo y sus condiciones geológicas, se propone como metodología de extracción la extracción por medio de explosivos, para llevar a cabo se recomienda considerar las siguientes recomendaciones:

- Orientación: en caso del cerro a explotar, solo se evidencia 2 familias importantes de discontinuidades, por lo que se recomienda planificar las mallas de perforación de manera perpendicular a dichas familias.
- Malla recomendada: Según (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987) el diseño de la malla se va a tener en función del diámetro de perforación para cada caso. En el tajo san buena, se perfora a un diámetro de 3,5", por lo que, para dicho diámetro, y en función de la admisión del quebrador se propone la siguiente malla de perforación:
 - Espaciamiento: 4 m (alto porcentaje calcio)

- Burden: 3,5
- Profundidad: Mínima 4 m, Ideal 8 m.
- Otra malla para zonas menos competentes (bajo % CaO)
 - Espaciamiento: 4,5 m
 - Burden: 4
 - Profundidad: Mínimo 5 ideal 7.
- Factor de Carga: Para cantera de caliza se pueden tener rangos de valores para el factor de carga entre los 0,15 – 0,30 kg/m³ (López Jimeno, Pernia Llera, Lopez Jimeno, & Ortiz de Urbina, 1987), como se explicó anterior mente, se puede calcular dicho factor utilizando la fórmula de carga lineal, para calcular la cantidad de explosivo a utilizar, para posteriormente dividirla entre los metros cúbicos que se pretenden volar, obteniendo así el valor adecuado para una fracturación adecuada en esta cantera.

Debido a las condiciones del macizo, y mala implementación de la voladura, se pueden obtener fracturación de roca poco efectiva, generando la obtención de bloques de mayor tamaño, los cuales exceden la apertura de entrada del quebrador, por lo que la utilización de martillos hidráulicos para reducir el tamaño de la roca, podrían ser utilizados. Esto genera aumentos excesivos en los costos mensuales, por lo que evitar una fracturación que genere bloques de sobre tamaño, es esencial para optimizar los procesos en la cantera.

Delimitación de bermas y frentes de explotación

Para llegar a obtener el diseño final deseado, se recomienda detallar topográficamente las cotas sobre las cuales están conformadas los sistemas de berma/talud del diseño, dichas cotas se muestran en la figura 6.12.

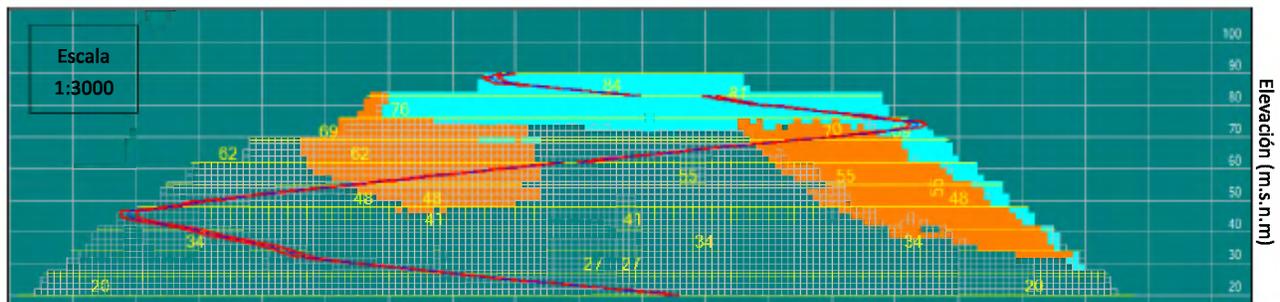


Figura 6.12 Muestra las cotas a las que se propone conformar las bermas de producción en el cerro a explotar dentro del Tajo San Buena.

Como se muestra en la figura anterior la cota mínima fue establecida a los 20 m.s.n.m, por lo que la definición de las restantes bermas a lo largo del tajo, es de vital importancia para ir proyectando las bermas finales. Dichas cotas se establecen cada 7 m a partir de la cota mínima, siendo la última berma y cota máxima el valor de aproximadamente 90 m.s.n.m. El no existir taludes finales, ya que la administración desea extraer la totalidad del cerro, no es necesario aplicar la metodología del precorte.

7. Consideraciones y Conclusiones Finales

La optimización de los procesos en una cantera no sólo pasa por variables como las consideradas en este proyecto final, si no por el deseo y voluntad de la administración y sus colaboradores en el seguimiento y cumplimiento de las normas establecidas por estudios técnicos, como los que se han realizado en este proyecto final de graduación. Con la realización del cálculo de reservas diferenciado, se logró generar recomendaciones para optimizar la extracción del material y la precisión del material a extraer, evitando la divagación del desarrollador a lo largo del tajo, buscando o probando zonas donde la litología y el macizo se ajusten a la demanda de material que desea satisfacer. Mantener un adecuado control del diseño de explotación generará una actividad minera mucho más precisa y rentable, que a la postre genera beneficios en muchos ámbitos, uno muy importante es, en la seguridad laboral de los tajos, ya que se designan zonas y actividades específicas, así como cotas de extracción, rampas de acceso para maquinaria entre otros.

Sobre los estudios utilizados para la realización del cálculo de reservas diferenciado, se concluye que el procesamiento de los datos sísmicos mediante las dos metodologías propuestas en este estudio, son útiles y complementarias, y deberían de realizarse conjuntamente, ya que la tomografía sísmica de refracción viene a validar a un más los resultados de la metodología de RFS o, a evidenciar que probablemente no se esté realizando un adecuado procesamiento con la metodología de RFS. Por lo que se recomienda seguir utilizando las dos metodologías para cada interpretación sísmica que se realice. La utilización de la tomografía ayuda en zonas donde la metodología convencional de RFS no logra dar modelos con valores de error aceptables (entre 1 y 5), debido a los supuestos que necesita cumplir, como zonas de topografía plana, homogeneidad en los estratos (sin cambios laterales drásticos).

Sobre los resultados de la implementación de la metodología de fluorescencia de rayos x, se concluyeron patrones de distribución de las concentraciones a lo largo del área de estudio, lo que ayudó a precisar los posibles frentes de explotación que se pueden trabajar en la concesión. De igual manera se dejaron los valores de concentración para cada zona, siendo un insumo importante a la hora de comercializar el material, ya que los clientes tienen lo necesario para considerar si la caliza que se ofrece cumple con las especificaciones de concentración que necesitan.

Para las metodologías utilizadas para los cálculos de reservas, se utilizaron la metodología de los perfiles y la de los bloques. Se concluye que la metodología de los perfiles, puede sobreestimar o subestimar los volúmenes reales en la cantera, ya que, si la topografía entre dos secciones de perfiles es muy irregular, parte de ese volumen puede ser obviado del valor final o más bien se puede agregar volumen que no precisamente este en la topografía real, como por ejemplo si hubiera una depresión entre dos secciones de perfiles o si hubiere una elevación anormal. Por esta razón es que se considera la metodología de los bloques como la más precisa, ya que el cálculo del volumen lo delimitan la topografía original del terreno y el diseño creado. Además, esta metodología permite ingresar valores a los bloques y poder así discretizar los diferentes materiales dentro de ese volumen, siendo una herramienta de mucha ayuda para completar el modelo. El modelo de bloques es necesario para obtener el cálculo de reservas diferenciado, el cual es la base para cualquier optimización en la extracción de recursos.

En cuanto a los resultados de los estudios para cada uno de los casos de estudio se extraen las siguientes conclusiones:

Para el Tajo Las Cóncavas, se identificaron dos flujos establecidos con diferencias texturales y mineralógicas, donde se encuentra alteración zeolítica, lo que genera una desintegración de la roca caja, generando problemas con los trabajos de extracción del tajo.

Al aplicar los estudios de sísmica de refracción y tomografía sísmica de refracción, se identificaron contrastes geofísicos notables en las zonas cercanas a las zonas de fracturas principales, con velocidades de transmisión de onda que son correlacionales con materiales de alteración o material poco competente.

Para el Tajo San Buena, se identificó la homogeneidad litológica del cerro, conformándolo en su totalidad por roca caliza, con zonas de alta fracturación, y atravesado por varios planos de fallas que no se encuentran activos. Los estudios de sísmica, comprobaron zonas con una mayor fracturación e incluso la posibilidad de cavernas de considerable tamaño, los cuales deben de ser confirmados a la hora de la explotación del cerro. El insumo más importante lo otorgaron los estudios químicos realizados en el cerro, donde se identificaron patrones de concentración mediante los que se definieron 3 frentes de explotación los cuales fueron incorporados al diseño. Dichos patrones mantienen las mayores concentraciones de CaO, en la cima del cerro, mientras que las mayores concentraciones de SiO₂, Fe₂O₃, y Al₂O₃, tienen mayores concentraciones de las laderas del cerro.

Se realizó una propuesta del diseño final para ambos casos, con el cual pueden garantizar la extracción máxima de las reservas, dentro del área de concesión otorgada. Se utilizaron normas internacionales para ciertos aspectos, además de elementos propios del tajo, los cuales hacen que dicho diseño se ajuste a las necesidades y realidades del tajo. Un adecuado manejo en los trabajos de extracción y una correcta planificación, tienen como resultado, lograr alcanzar el diseño propuesto. Para esto se debe de tener en cuenta el control topográfico en las cotas de extracción, el cual debe de ser estricto y continuo, con el fin de mantener las bermas bien establecidas hasta el final de la concesión.

En general, el diseño de una cantera y la definición de los sistemas berma/talud se establecen en función de las actividades de operación del tajo mayoritariamente, y no exclusivamente de la litología presente. Evidentemente la litología condiciona la conformación del diseño para estos sistemas, sin embargo lo principal es tener un adecuado y responsable funcionamiento operacional en el tajo, con el fin de que siempre se tengan zonas accesibles para poder trabajar en diferentes frentes de explotación al mismo tiempo.

Para el Tajo Las Cóncavas se definieron sistemas berma/talud de un máximo de 10 m de alto, con ángulos de reposo de máximo 75°, con bermas de ancho mínimo de 3 metros, todas las rampas de acceso y caminos del proyecto no deben de exceder pendientes del 10%. Para el Tajo San Buena se definieron sistemas de berma/talud de máximo 7 m de alto, con ángulos de reposo de 75° máximo, y bermas de 5 m de ancho mínimo.

Finalmente se ha tomado en consideración el uso de la metodología de extracción por explosivos como manera de materializar la optimización de la extracción de recursos. Es cierto que el conocimiento de la geología (incluyendo todos los aspectos estructurales, litológicos, geoquímicos, etc.), y un adecuado diseño de cantera son esenciales para optimizar la extracción, sin embargo, existe un porcentaje que incluye la certera planificación del proceso de voladura. Es posible conocer todas las variables de una zona que se pretende extraer, que, si al final se realiza un proceso erróneo de voladura, no se logrará concretar la optimización en el proceso. Es por esto que se debe de tomar en consideración varios puntos a la hora de realizar una adecuada planificación para voladura:

- Elección de zonas con litología y variables estructurales conocidas.
- Adecuada selección y ubicación de malla de perforación.
- Adecuado diseño de voladura (incluyendo profundidades, espaciamientos, burden, y tiempos de salida entre explosivos, taco adecuado)
- Selección adecuada de explosivos y detonadores incluyendo los tiempos adecuados de detonación y longitudes, para la malla propuesta.
- Amarre de la voladura (esto dependerá si se tiene una voladura con o sin espacio para desplazamiento de material, además de deben de tomar en cuenta las familias de fracturas principales)
- Medición de la granulometría resultante luego de la voladura como control de calidad, esperando tener menos de un 20% en tamaños mayores a los aceptados por el quebrador.

Por último, se concluye que la optimización en los procesos de extracción para el tajo las Cóncavas, se logrará utilizando las mayas adecuadas de voladura, para las zonas definidas en los estudios, generando una reducción en los costos por concepto de voladura y por concepto de horas máquina, ya que el carguío de un material bien fracturado es mucho más rápido, además de que optimiza el espacio en las góndolas de las vagoneta generando incluso beneficios en los procesos de transporte, así como en los procesos de producción y quebrado. De las conclusiones anteriores se obtiene el siguiente cuadro, el cual muestra las mallas de perforación generadas para garantizar la optimización de la explotación, con base a la información del modelo,

Extracción Mediante Explosivos	
Orientación mallas de perforación	Orientarla perpendicular a las familias de fractura principales
Factor de carga	0,2 – 0,35 kg/m ³
Mallas Recomendada	Roca Competente <ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento: 2,8 m • Burden: 2,8 Profundidad: Mínima 3 m, Ideal 6 m.
	Zonas con Alteración <ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento: 4 m • Burden: 3,5 m Profundidad: Mínima 4 m, ideal 7 m.

En el caso del Tajo San Buena, la optimización pasará por el cumplimiento de las disposiciones técnicas resultantes de este trabajo, respetando las cotas de las bermas de producción y las rampas, con el fin de que siempre se tenga acceso a las zonas en donde el material es químicamente importante, de igual manera, la identificación de las zonas con mayor fracturación, permitirá variar las mallas de perforación y voladura con el fin tener una efectiva fracturación, reduciendo costos en cuanto al uso de martillo hidráulico para reducir granulometrías, además de que menores granulometrías optimizan volúmenes, mejorando procesos de carguío, transporte y quebrado. De igual manera se concluye con las condiciones necesarias para poder realizar una adecuada extracción por medio de explosivos

Extracción Mediante Explosivos	
Orientación mallas de perforación	Orientarla perpendicular a las familias de fractura principales
Factor de carga	0,15 – 0,30 kg/m ³
Mallas Recomendada	Roca Competente <ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento: 4 m (alto porcentaje calcio) • Burden: 3,5 Profundidad: Mínima 4 m, Ideal 7 m.
	Zonas fracturadas <ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento: 4,5 m • Burden: 4 Profundidad: Mínimo 5 ideal 7

En general ambos casos de estudio y aplicable a las canteras de todo el país, pueden ver una optimización en sus procesos de extracción, mejorando la fracturación de la roca. Esto se logra eligiendo una correcta malla de perforación, un correcto amarre de voladura, un adecuado uso de explosivos, un correcto cálculo de los kg de explosivo a utilizar por m³ a volar; todo esto en función de un completo conocimiento de la geología y demás condiciones de la zona a explotar. Aplicar las anteriores variables correctamente, desembocará en una óptima generación de granulometrías bajas, lo que inevitablemente genera una optimización en los procesos de carguío gracias a que se optimiza el volumen de carga por camión; y también una optimización en el procesado y molienda de la roca.

8. Recomendaciones Finales

Luego de desarrollar y cumplir los objetivos propuestos para el presente proyecto, se desprenden una serie de recomendaciones, las cuales pueden venir a completar aún más el conocimiento que se logró acumular en el presente proyecto. Muchas de estas contemplan la aplicación de estudios en diversas ramas de la geología.

- Realizar estudio mineralógico y petrológico de las manifestaciones mineralógicas y de alteración presentes en el tajo Las Cóncavas, esto con el fin de comprender las paragénesis presentes e identificar el potencial minero del proyecto, para comercializar otro tipo de productos.
- En el caso de los estudios geoquímicos realizados en el Tajo San Buena, si más adelante se deseará realizar un muestreo químico del macizo se recomienda utilizar una perforadora con recuperación de núcleo o una perforadora con martillo de fondo (DTH Down The Hole), las cuales no pudieron ser utilizadas en este proyecto por limitaciones económicas. Esto para tener una prospección de la química del cerro y no solo en superficie.
- Llevar un control más seguido de las litologías a medida que se continúe la explotación, con el fin de actualizar constantemente el modelo geológico de la cantera.
- Las bermas de un mismo nivel, deben de tener al menos dos accesos, en caso de atrapamiento por derrumbe o por avería de maquinaria. Esta recomendación es necesaria durante la etapa de operación del tajo, para el diseño propuesto se considera sólo un acceso, ya que este diseño es el que se debe de tener al cierre técnico del tajo, diseño que optimiza al máximo las reservas aprovechables en el área de concesión.
- Actualizar constantemente los estudios de estabilidad de taludes, ya que los mismos fueron diseñados tomando en cuenta el material más competente como material predominante y se evidenció que la aparición de grandes zonas de material alterado o fracturado, son ocurrentes en el frente de extracción y es seguro que no tengan el mismo comportamiento geomecánico que los materiales sobre los que se realizaron los estudios.
- Se plantea la realización de un estudio que incluya estas consideraciones y las desarrolle desde de punto de vista económico, en donde se puede visualizar realmente la optimización en términos de gastos y costos de operación.

9. Apéndices

Apéndice 1: Análisis Petrográfico Semi-Cuantitativo

Muestra M02-TC

Descripción Macroscópica: Textura afanítica porfirítica, con fenocristales de plagioclasa alterada o reemplazada y cristales de piroxenos en menor concentración, inmersos en una matriz gris clara, atravesada por vetillas de calcita. Presenta una pátina color café claro que no penetra más de 3 centímetros en la roca.

Descripción Microscópica: Textura hipocristalina hipidiomórfica porfirítica con matriz intersetal fluidal que presenta microlitos de plagioclasa en un 40%, piroxenos en un 10%, opacos y minerales de alteración; presenta un 70% vidrio. Presenta fenocristales de hipersteno de 0.5 a 1.8 mm, con inclusiones de calcita y epidota, plagioclasas de 1 a 2 mm, minerales de alteración clorita, epidota y una veta principal de calcita.

Campo: 10 **Nombre:** Andesita

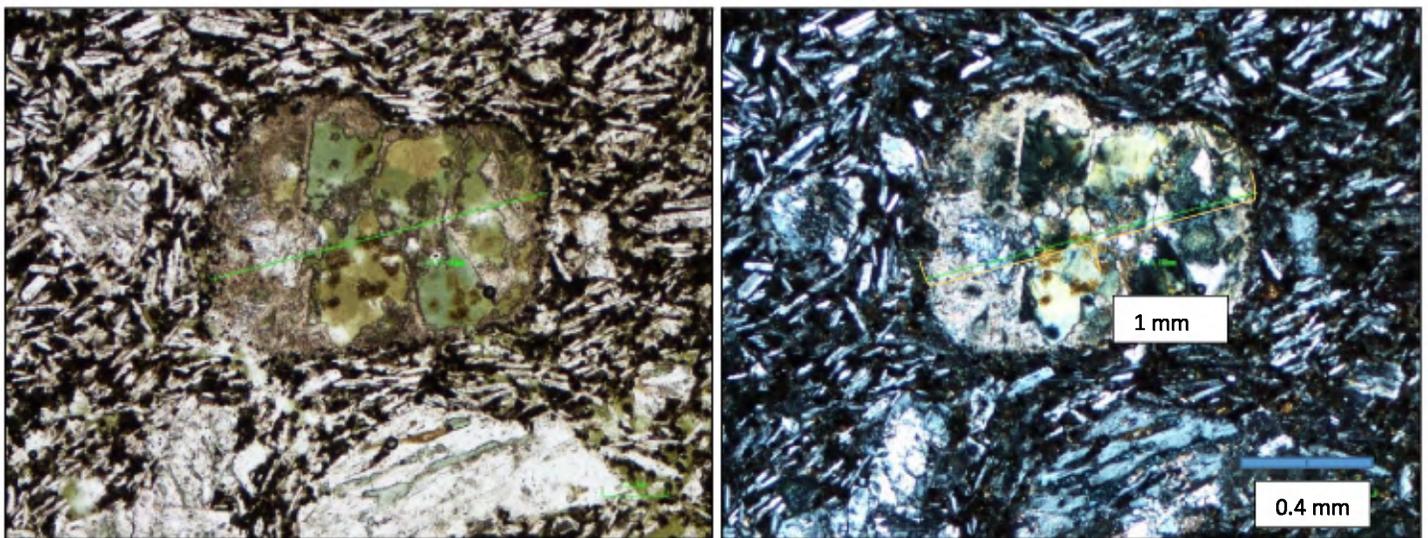


Figura a. Muestra un cristal de piroxeno con alteración a uralita, alrededor la matriz intersetal fluidal característica de la muestra, la imagen de la izquierda muestra una vista a nicols paralelos, mientras que en la imagen de la derecha se muestra una vista a nicols cruzados.

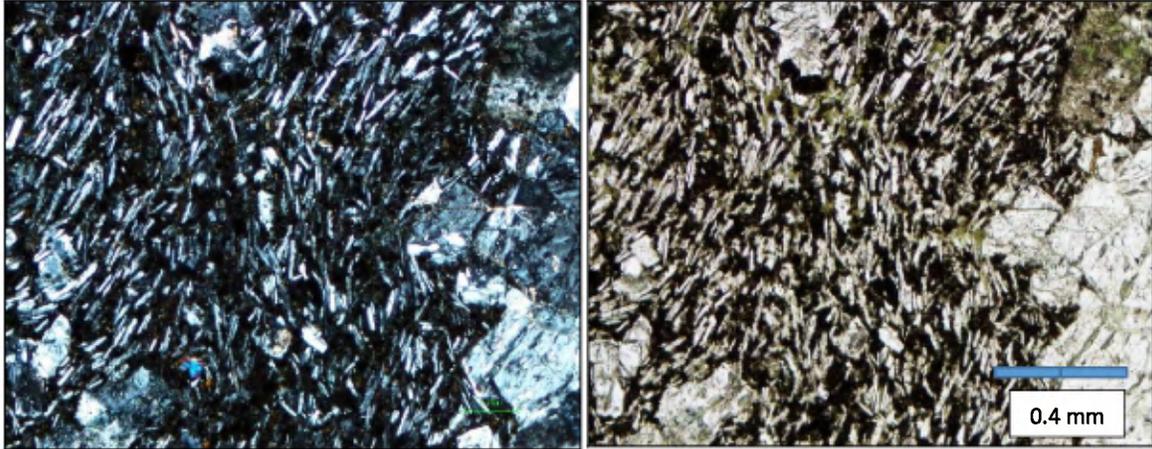


Figura b. Muestra la matriz intersetal fluidal, característica de la muestra, la imagen de la derecha muestra una vista a nicoles paralelos, mientras que en la imagen de la izquierda se muestra una vista a nicoles cruzados.



Figura c. Muestra un cristal de plagioclasa, a la izquierda de la imagen se observan piroxenos.



Figura d. Se observa la muestra macro de la roca analizada.

Muestra M01-TC

Descripción Macroscópica: Textura afanítica porfirítica, con clara alteración, con minerales observables de plagioclasa de hasta 5 mm, cristales de piroxenos indiferenciables, y cristales secundarios de calcita, adherencias de malaquita, en una matriz violácea.

Descripción Microscópica: Textura hipocristalina porfirítica, de matriz hialopilitica amigdaloida, compuesta por microlitos de piroxenos en un 10%, y vidrio en 45%, presenta fenocristales de augita de 0.5 a 1.12 mm, fantasmas de plagioclasa de 0.2 a 0.7 mm, hiperstenos de 1 mm y zeolitas acumuladas dentro de vesículas rellenas de plagioclasa de hasta 1.5 mm, se observan minerales de alteración como zeolitas en gran cantidad y opacos.

Nombre: Andesita **Campo:** 10

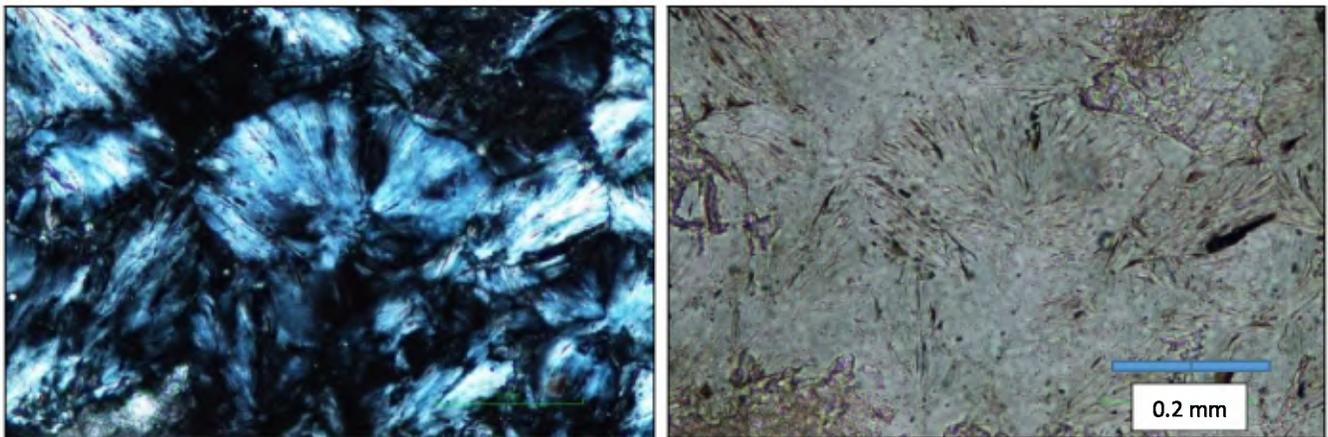


Figura e. Muestra cristales de zeolita en hábito acicular, la imagen de la derecha muestra una vista a nicols paralelos, mientras que en la imagen de la izquierda se muestra una vista a nicols cruzados.

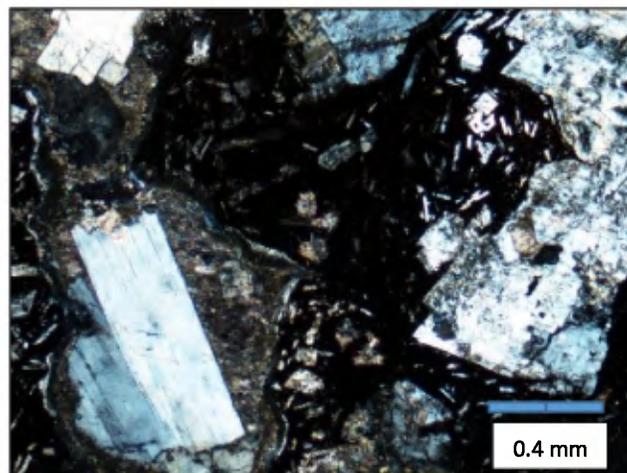


Figura f. Muestra cristales de augita hipidiomorfica, cristales de plagioclasa xenomorfica, en una matriz con microlitos de piroxenos y plagioclasa. Vista en nicoles cruzados



Figura g. Presenta la muestra macro de la roca analizada.

Sección M04-TC

Descripción Macroscópica: Textura afanítica porfírica, principalmente con cristales de zeolitas relleno cavidades en forma de adherencias de hasta 5 mm. Presenta una pátina color morada grisácea.

Descripción Microscópica: Textura hipocristalina porfírica con matriz intersetal fluidal que presenta microlitos de plagioclasa en un 40%, piroxenos en un 10%, opacos y minerales de alteración; presenta un 50% vidrio. Presenta fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 1.2 mm, con reemplazamiento por calcita, piroxenos de 0.1 a 1 mm, minerales de alteración clorita, epidota y una veta principal de calcita.

Nombre: Andesita **Campo:**10

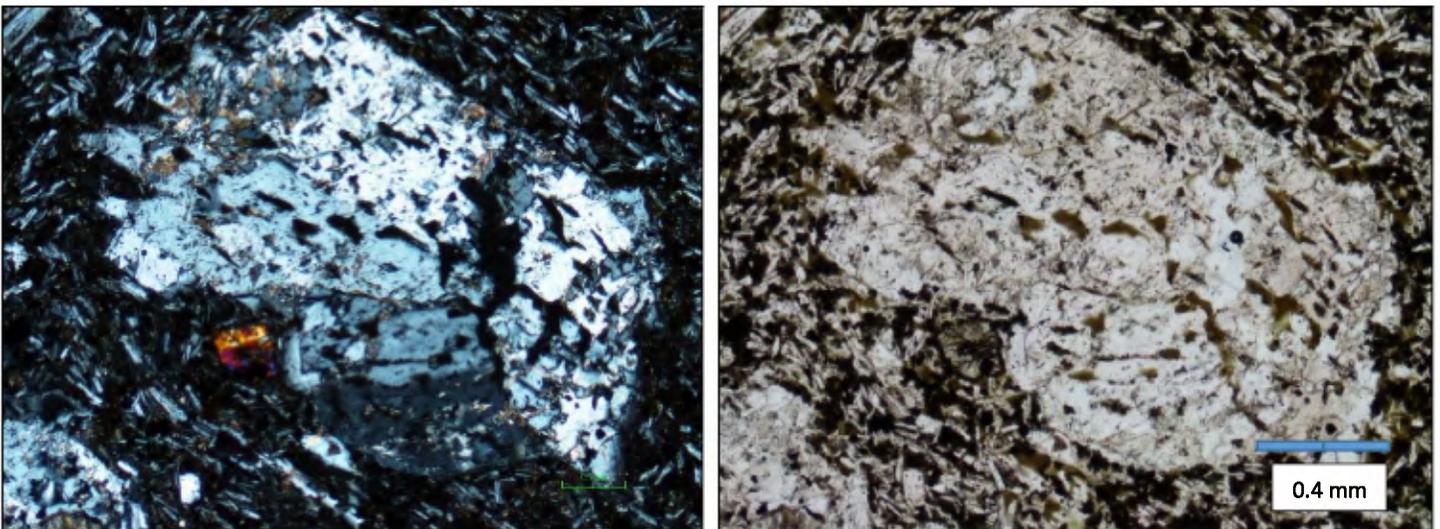


Figura H. Muestra una plagioclasa, con textura cribosa, rodeada de una matriz intersetal. En la imagen de la izquierda se muestra una vista en nicoles cruzados, en la imagen de la derecha se muestra la misma vista con nicoles paralelos.

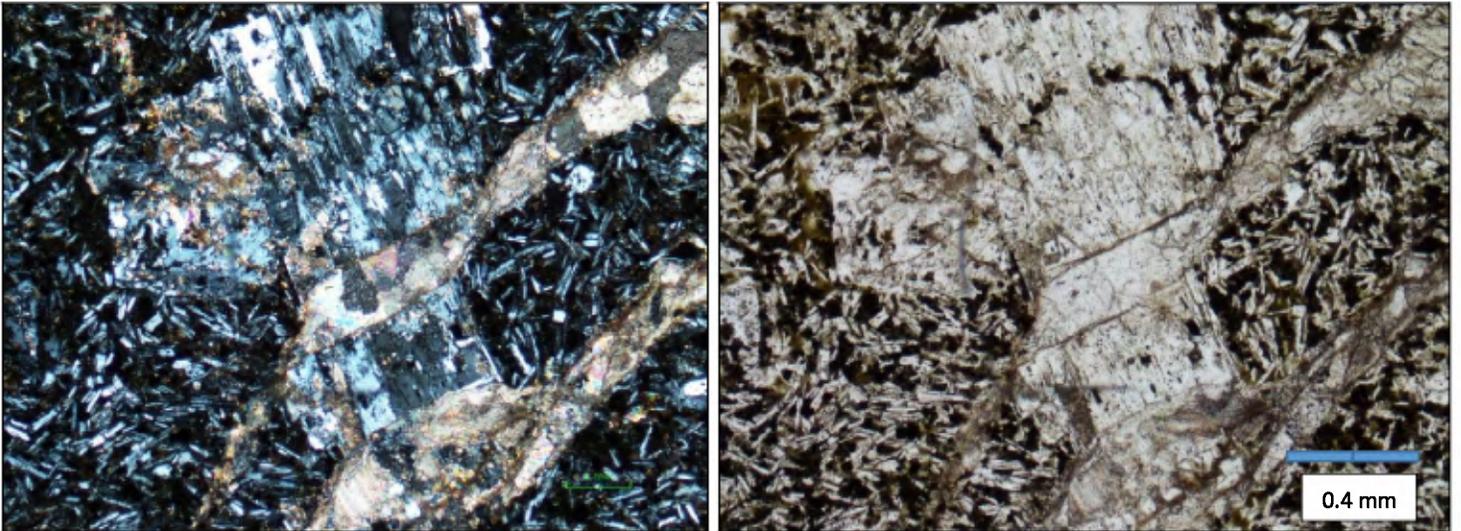


Figura i. Muestra una plagioclasa atravesada por vetas de calcita, en la imagen de la derecha se muestra una vista en nicoles paralelos, en la imagen de la izquierda se muestra la misma vista a nicoles cruzados.



Figura j. Presenta la muestra macro de la roca analizada

M03-TC

Descripción Macroscópica: Textura afanítica porfirítica, principalmente con cristales de fantasmas de plagioclasa de hasta 2 cm, cristales máficos milimétricos, en una matriz gris clara, afírica, presenta patina color marrón.

Descripción Microscópica: Textura hipocristalina porfirítica, de matriz intersetal amigdalioidea, compuesta por microlitos de piroxenos en un 10%, zeolitas en un 40% y vidrio en 45%, presenta fenocristales de augita de 0.5 a 1.12 mm, zeolitas de 0.2 a 0.7 mm, hiperstenos de 1 mm se observan minerales de alteración como calcita y clorita, así como opacos.

Nombre: Andesita **Campo:**10

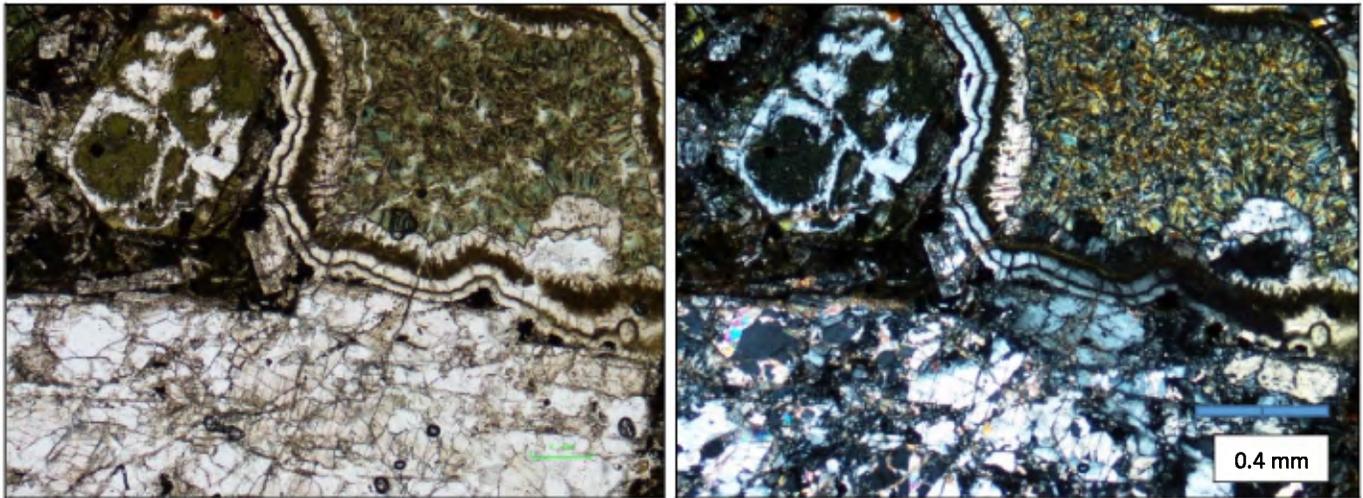


Figura k. Se observa un cristal totalmente reemplazado por clorita, en la esquina superior derecha de las imágenes, a la izquierda se observa la vista en nicoles paralelos, mientras que la vista de la derecha se toma a nicoles cruzados.

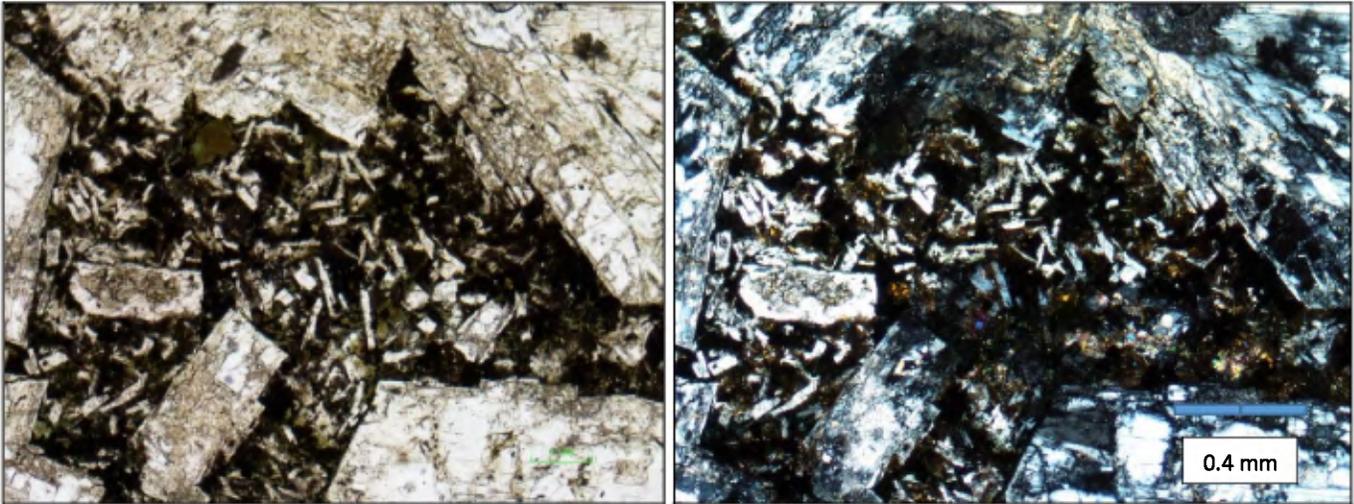


Figura m. Muestra cristales de plagioclasa y piroxenos, dentro de la matriz amigdaloides, característica de la roca, a la izquierda se observa la vista en nicols paralelos, mientras que la vista de la derecha se toma a nicols cruzados.



Figura m. Presenta la muestra macro de la roca analizada

Apéndice 2: Gráficos Tiempo-Distancia Tajo Cóncavas

Gráficos distancia tiempo, de los tendidos sísmicos analizados mediante la metodología de tomografía sísmica de refracción, para el tajo Las Cóncavas.

Tendido 1

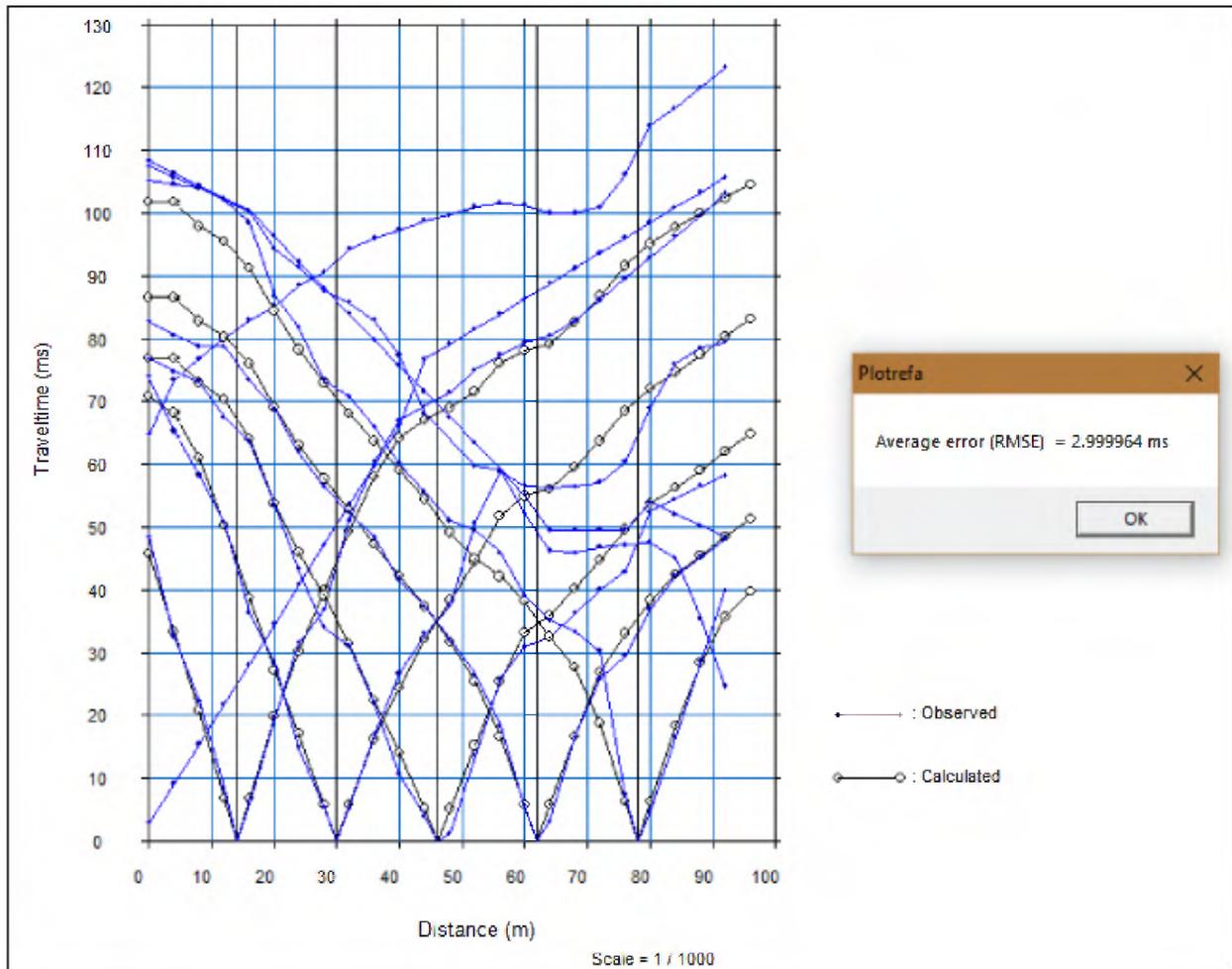


Figura n. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 1 del Tajo Las Cóncavas.

Tendido 2

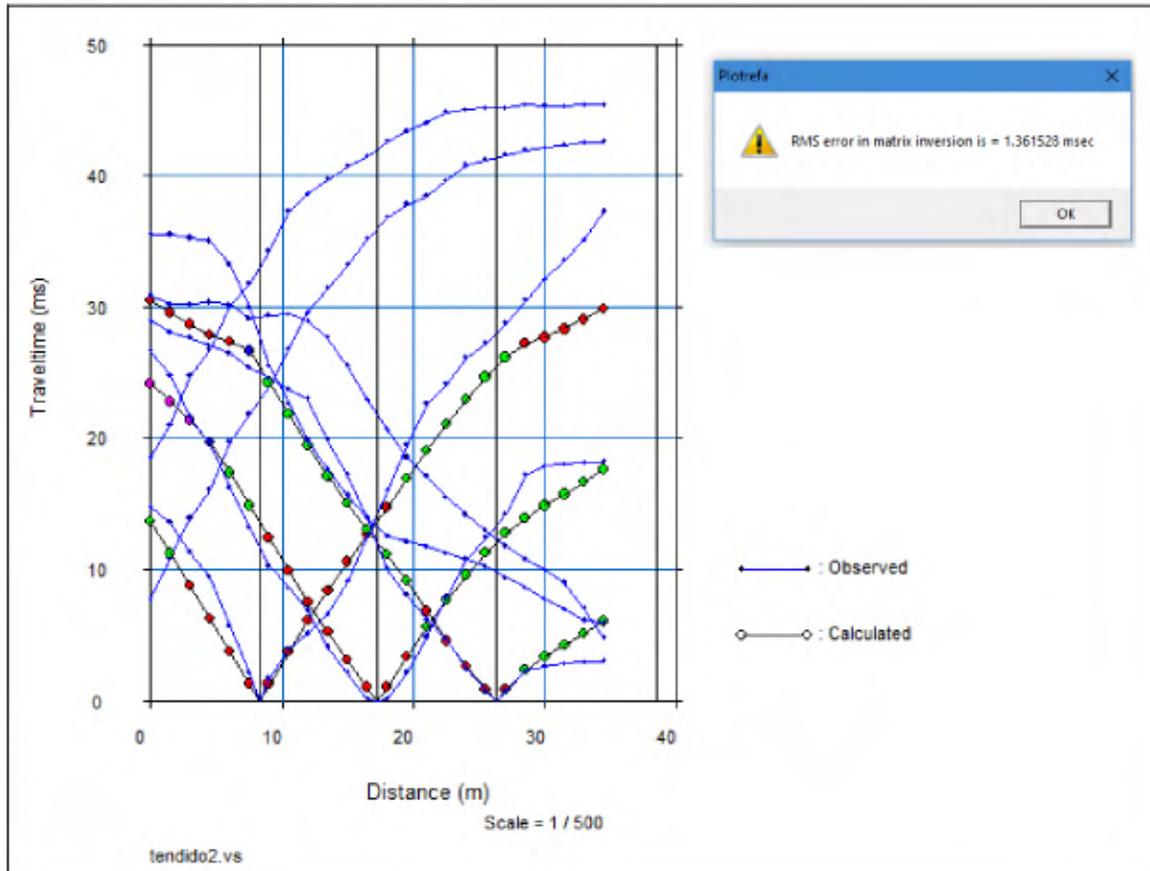


Figura o. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 2 del Tajo Las Cónnavas.

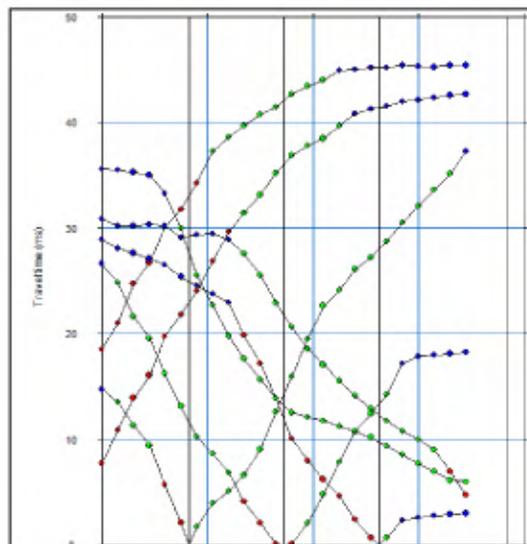


Figura p. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 2 del Tajo Las Cónnavas.

Tendido 3

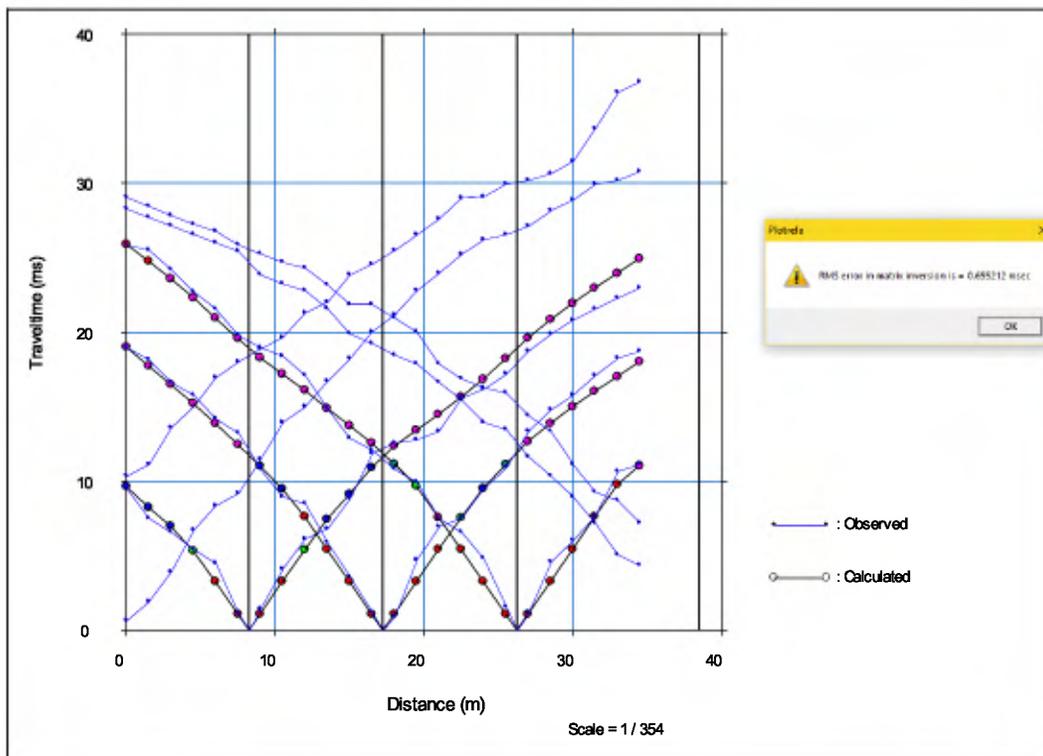


Figura q. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 3 del Tajo Las Cónavas.

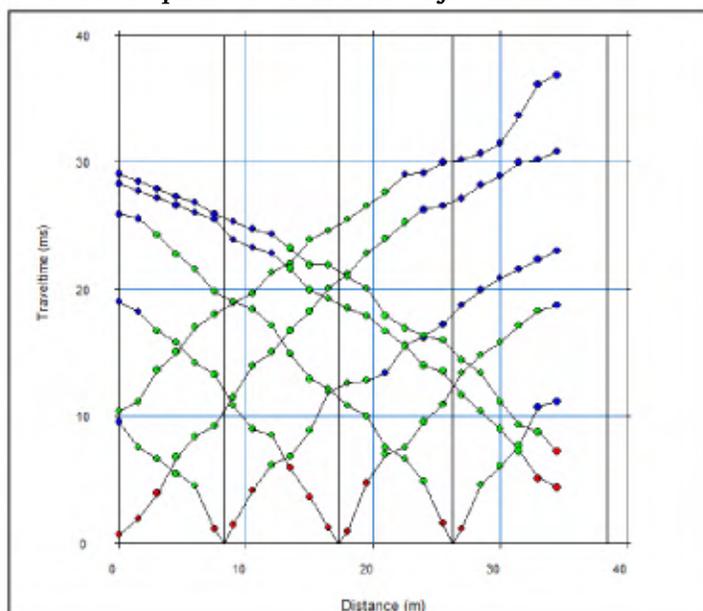


Figura r. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 2 del Tajo Las Cónavas.

Tendido 4

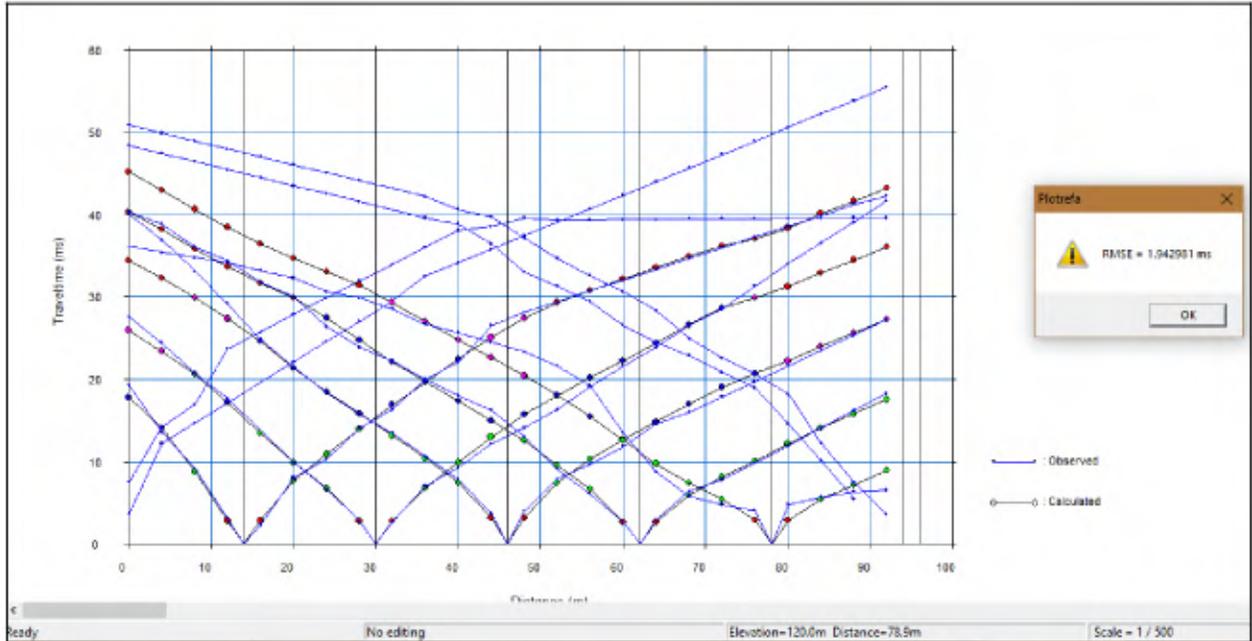


Figura t. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 4 del Tajo Las Cónavas.

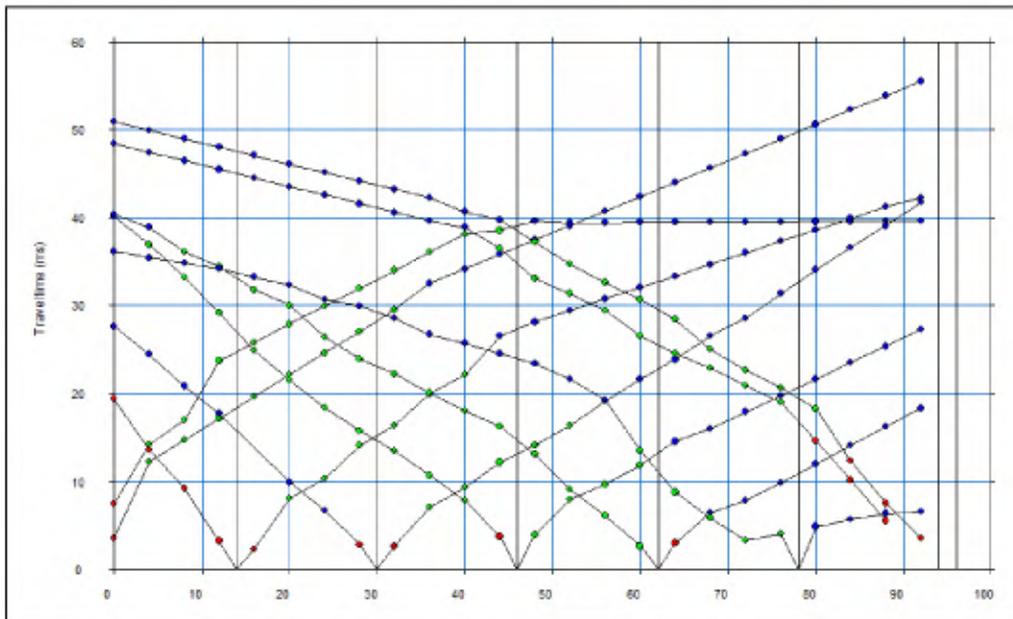


Figura u. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 2 del Tajo Las Cónavas.

Apéndice 3: Gráficos Tiempo-Distancia Tajo San Buena

Gráficos distancia tiempo, de los tendidos sísmicos analizados mediante la metodología de tomografía sísmica de refracción, para el tajo San Buena.

Tendido 1

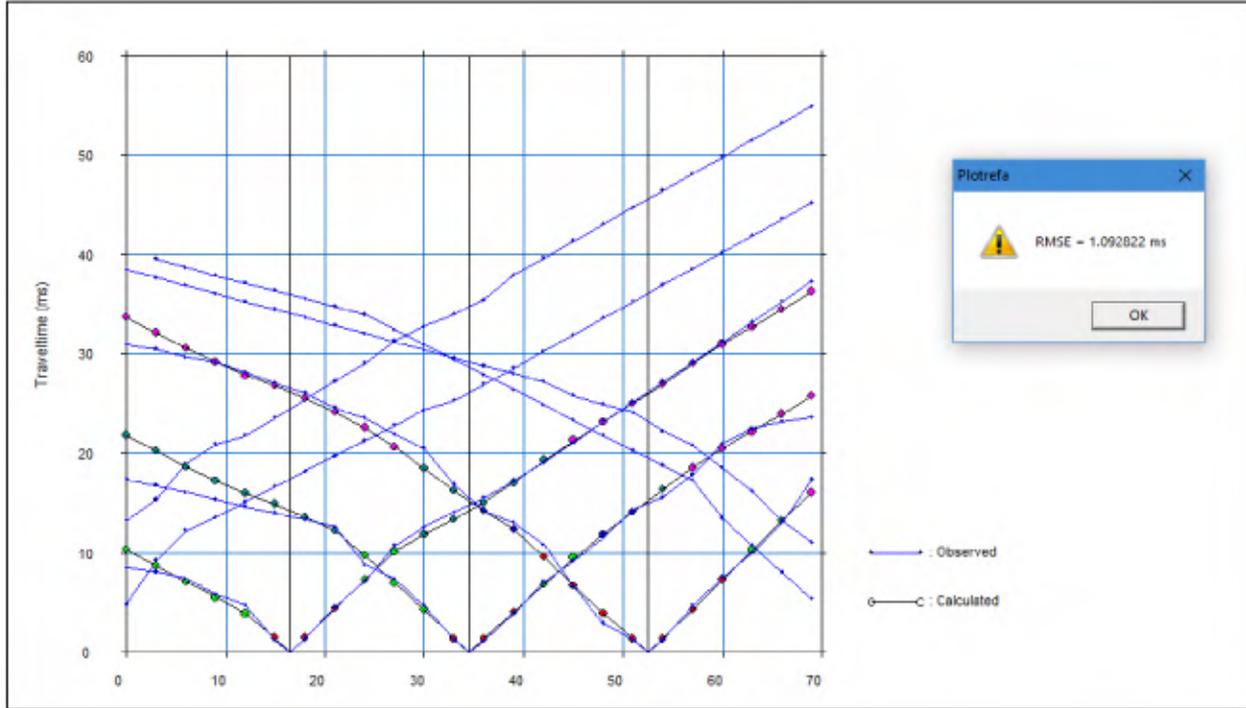


Figura v. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 1 del Tajo San Buena.

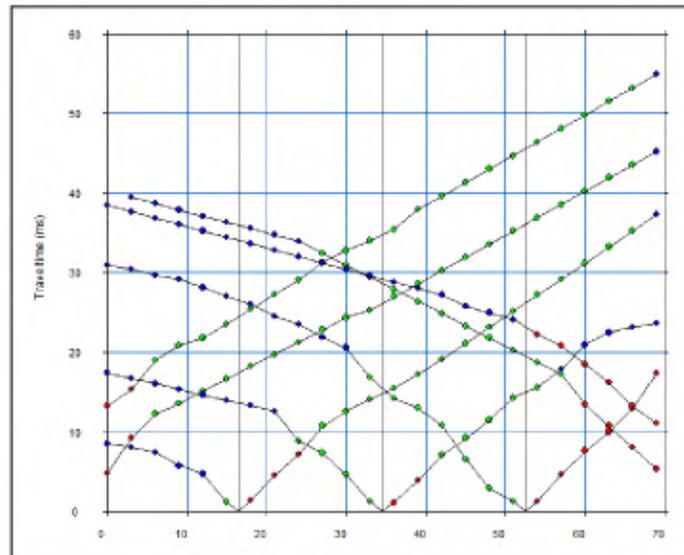


Figura w. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 1 del Tajo San Buena

Tendido 2

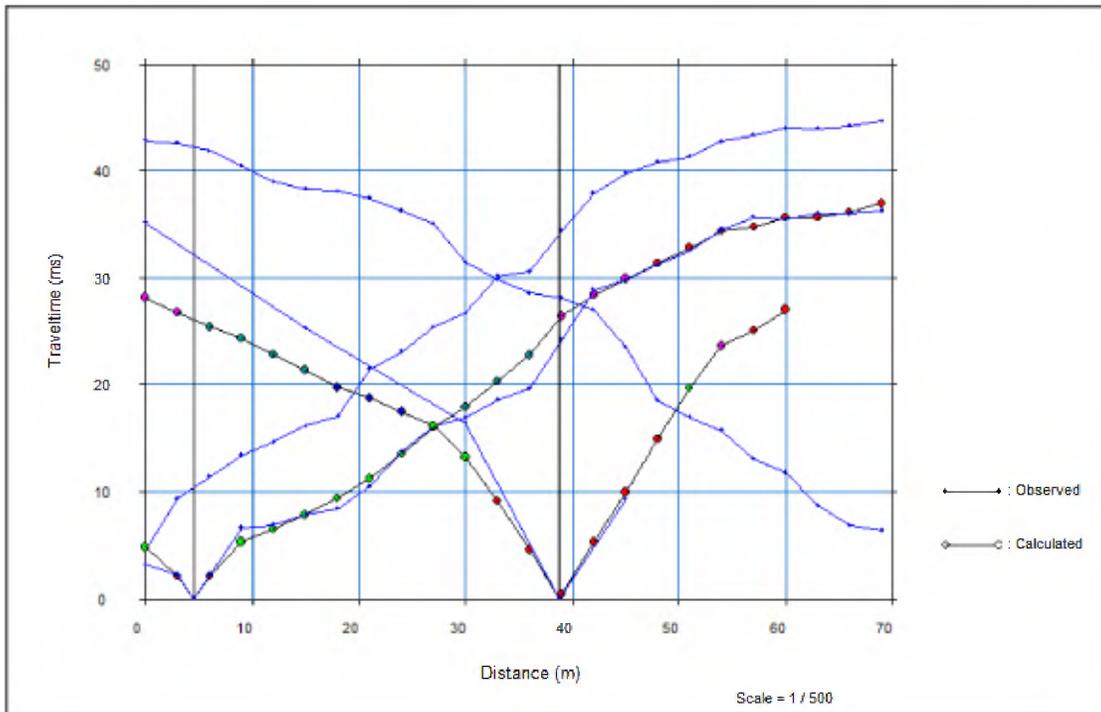


Figura x. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 2 del Tajo San Buena.

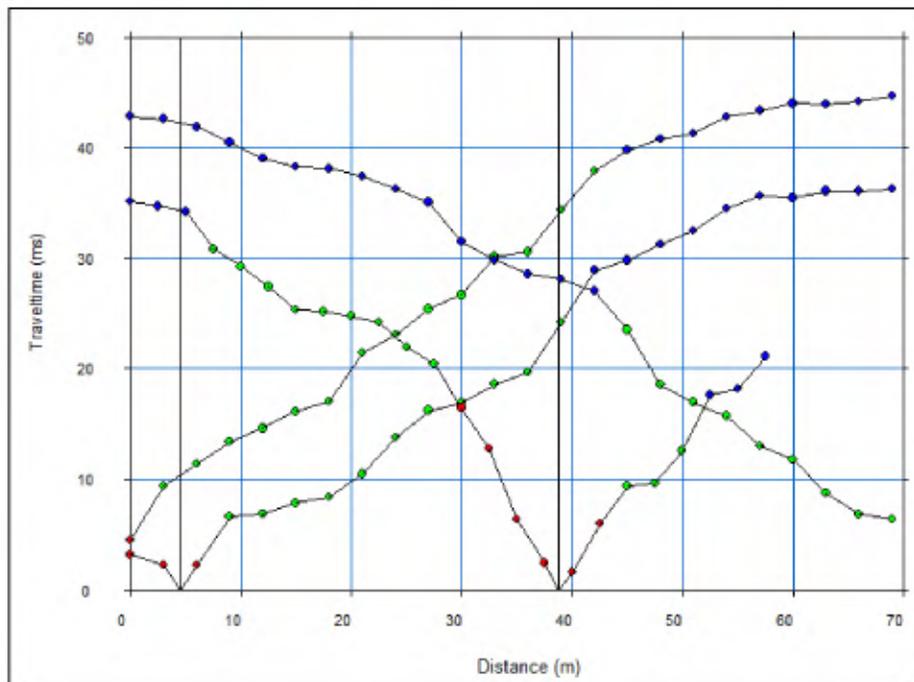


Figura y. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 2 del Tajo San Buena.

Tendido 3

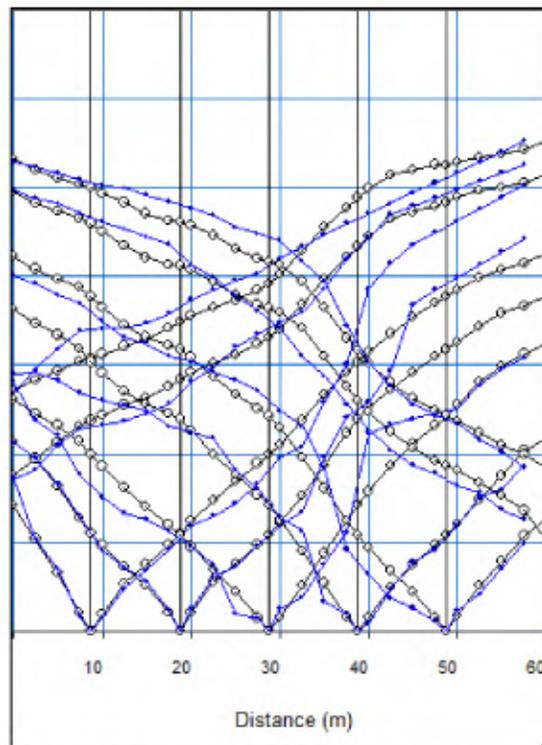


Figura z. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de la tomografía sísmica de refracción para el tendido 3 del Tajo San Buena.

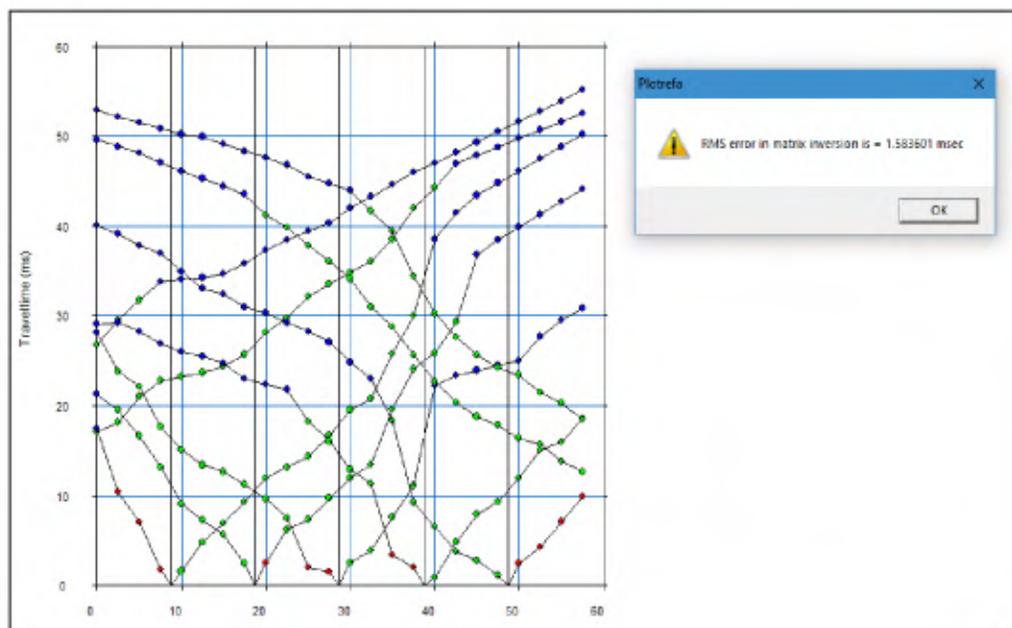


Figura aa. Muestra el gráfico distancia tiempo, utilizado para el cálculo de refracción sísmica para el tendido 3 del Tajo San Buena.

Referencias Bibliográficas

- ASTM, D.-0. (2011). Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation. PA, West Conshohocken: <https://doi.org/10.1520/D5777-00R11E01>.
- Astorga , A. (1987). El Creácico Superior y el paleógeno de la vertiente pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: Origen evolución y dinamica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamérica. Universidad de Costa Rica [Tesis Lic.].
- Azwin, I., Saad , R., & Nordiana, M. (2013). Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization. APCBEE Procedia, 5, 227-231. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.039>.
- Becerra Bayona, C. A. (2008). Tomografía sísmica para obtener modelos de velocidad del estrato somero aplicada a datos sintéticos y reales. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander [Tesis de Lic.].
- Beckhoff, B., Kanngieber, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff , H. (2007). Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. Berlin: Springer Science & Business Media .
- Bery, A. A. (2013). High Resolution in Seismic Refraction Tomography for Enviromental Study . International Journal of Geosciences , 4, 792-796.
- Carballo, M. (1978). La Formación San Miguel, Mioceno inferior, CR. RCG-UCR [Tesis Lic].
- Castillo , R. (1969). Geología de los mapas básicos de Abra y parte de río Grande, Costa Rica. Informes técnicos y notas geológicas, Ministerio de Industria y Comercio, dirección de Geología, Minas y Petróleo, 33, 1-40.
- Cavada, J. M. (2000). Guía de prospección sísmica por refracción. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Dengo, G. (1962). Estudio Geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. San José: Instituto Geográfico Nacional .
- Flores, K., Denyer, P., & Aguilar, T. (2003). Geología y Estratigrafía de la hoja Abangares Guanacaste, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, 29, 126-136.
- Geometrics. (2009). SeisImager2D 3.3. Geometrics.
- Gocht, W. R., Zantop, H., & Eggert , R. G. (1988). International Mineral Economics: Mineral Exploration, Mine Valuation, Mineral Markets, Internacional Mineral Policies (1 ed.). New York : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-73321-5
- Herrera Herbert, J. (2007). Diseño de Explotación de Canteras. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros De Minas, Universidad Politenica de Madrid.

- Herrera, Y., & Cooper, N. (2010). Manual para la Adquisición y Procesamiento de Sísmica Terrestre. (L. A. Vides, Ed.) Bogota, Colombia: Universidad de Colombia.
- Kaminsky, A. (2018). ZondST2D. Rusia: Zond Software.
- Krushensky, R. (1972). Geology of Istarú quadrangle, Costa Rica. U.S. Geological Survey Bulletin, 1358, 46.
- Legorburu Zuazua, V., & Sánchez Barbero, L. (2012). Evolución de los Explosivos Industriales. Madrid: Contretonline.
- Lo, T.-W., & Inderwiesen, P. (1994). Fundamentals of Seismic Tomography. (D. Fitterman, Ed.) United States of America: Society of Exploration Geophysicists. doi:10.1190/1.9781560802334
- López Jimeno, C., Pernia Llera, J. M., Lopez Jimeno, E., & Ortiz de Urbina, F. (1987). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Ministerio de Energía, T. y. (1985). Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. Madrid, España.
- Montero, W., Rojas, W., & Linkimer, L. (2013). Neotectónica de las fallas Ochomogo y Capellades y su relación con el sistema de falla Aguacaliente, falda sur macizo Irazú-Turrialba, Costa Rica. Revista Geológica de América Central, Volcán Irazú(48), 119-139.
- Palmer, D. (2011). Uncertainty in Refraction Inversion – A GRM Strategy. Sydney, Australia: The University of New South Wales .
- Pérez, C., Mateo, M., & Maciá, A. (2013). Aplicación de tomografía de refracción sísmica y análisis de microtemores como técnicas de prospección geofísicas en estudios geotécnicos de edificación. Informes de la Construcción, 65(530), 202-213. doi:10.3989/ic.11.112
- Redpath, B. (1973). Seismic Refraction Exploration for Engeneering site investigations. California: Explosive Excavation Research Laboratory Livermore.
- Ruiz Dioses, Y. P. (2015). Aplicación de software libre para la estimacion de recursos y para la evaluación tecnica económica de las reservas minerales. Universidad de Piura, Perú [Tesis Lic.].
- Servicio Nacional de Geología y Minería, M. d. (2002). Reglamento y Normativa de Seguridad Minera. Santiago, Chile.
- Sheehan, J. R., Doll, W. E., Watson, D. B., & Mandell, W. A. (2005). Application of Seismic Refraction Tomography to Karts Cavities. U.S. Geological Survey Karst Interest Group, Proceedings, Rapid City, South Dakota, 5160, 29-38.
- Singer, J. A., Link, C. A., & Iverson, R. S. (2009). High Resolution Seismic Refraction Tomography for Determining Depth of Blasts Induce Damage in a Mine Wall. Blasting and Fragmentation Journal, 3(2), 115-140.

- Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations. Université de Liège, Lieja, Belgica. [Tesis Ph.D].
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). Geostatistics for Enviromental Scientists (2nd ed.). Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Zeledón, L. A. (2004). Zeolitas del Valle Central de Costa Rica y sus alrededores. Revista Geológica de América Central, 31, 67-80.