



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

Modelización de una mina de plata en Sudamérica

Autor: Daniel Noguero Fernández

Tutor: Isidro Diego Álvarez

Oviedo, julio de 2020



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Resumen.....	12
1.2. Abstract.....	14
CAPÍTULO 2. ÁMBITO LOCAL.....	16
CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN.....	22
3.1. Concesiones mineras.....	25
3.2. Derechos de superficie.....	27
3.3. Derechos de aguas.....	28
3.4. Consideraciones ambientales.....	29
3.5. Permisos.....	30
3.6. Otras consideraciones.....	31
3.7. Estudios ambientales.....	32
3.7.1. Humedales.....	32
3.7.2. Especies en interés de conservación.....	32
3.7.3. Programas de monitoreo.....	33
3.8. Plan de cierre.....	34
3.9. Construcción y operaciones.....	35
3.10. Consideraciones sobre impacto social y comunitario.....	36
CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA.....	37
4.1. Geología general.....	37
4.2. Geología local.....	41
4.3. Estructura.....	49
4.4. Oxidación.....	50
4.5. Modelos geológicos.....	51
CAPÍTULO 5. TOPOGRAFÍA.....	53
CAPÍTULO 6. MINERÍA DE PLATA.....	54



6.1. Plata	54
6.2. Minería de plata en el mundo – Registro de las minas más grandes ..	57
6.3. Métodos de procesamiento	64
6.3.1. Lixiviación en pilas (<i>heap leaching</i> – <i>HL</i>).....	65
6.3.2. Método de lixiviación por agitación con cianuro (<i>mill</i>).....	72
6.4. Producción mundial de plata	76
6.5. Aplicaciones principales	81
6.6. Mercado	85
6.7. Costes típicos: minería/producción	88
CAPÍTULO 7. MODELIZACIÓN DEL YACIMIENTO	89
7.1. Introducción.....	89
7.2. Surpac.....	90
7.3. Planificación minera	92
7.4. Producción	93
7.5. Aplicaciones de Surpac.....	94
7.6. Interfaz de Surpac.....	95
7.7. Sondeos	96
7.7.1. Representación.....	96
7.7.2. Métodos de perforación	98
7.7.3. Collar	98
7.7.4. Survey	99
7.7.5. Sample	100
7.8. Representación de sondeos y superficie.....	102
7.9. Creación de los dominios	107
7.10. Modelo de bloques.....	114
7.11. Interpolación	118
7.12. Visualización de resultados.....	124



7.12.1. Estimación de los recursos minerales	132
7.13. Optimización	135
7.13.1. Creación del proyecto e importación de sondeos.....	135
7.13.2. Creación de modelo de bloques.....	138
7.13.3. Optimización: creación de cono óptimo.....	145
7.13.3.1. Cálculo de las reservas probadas	145
7.13.4. Estimación de las reservas.....	150
7.13.5. Estudio financiero simple.....	150
7.13.6. Estudio económico – Planificación a largo plazo.....	153
7.13.7. Exportación de la optimización a Surpac.....	159
CONCLUSIONES.....	164
REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS	167
PÁGINAS WEB CONSULTADAS	169
REFERENCIAS FOTOGRÁFICAS.....	170



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del depósito	15
Figura 2. Registros catastrales de Colquipucro sobre ortofoto	16
Figura 3. Localización del depósito sobre el mapa general de Perú	17
Figura 4. Mapa minero de la región central de Perú	18
Figura 5. Mapa de las zonas sísmicas de Perú	20
Figura 6. Ley General de Minería N° 014-92-EM	22
Figura 7. Mapa morfoestructural de Perú	37
Figura 8. Mapa geológico de Perú	39
Figura 9. Cuadrángulo geológico Yanahuanca (21-j)	41
Figura 10. Mapa geológico del depósito Colquipucro	42
Figura 11. Registro catastral minero del área circundante al depósito Colquipucro	46
Figura 12. Anatomía de un pórfido cuprífero	47
Figura 13. Mineralización según leyes de Colquipucro	52
Figura 14. Mapa topográfico de la zona con registro catastral de Colquipucro	53
Figura 15. Mina de Peñasquito (México)	57
Figura 16. Mina de Polkowice-Sieroszowice (Polonia)	58
Figura 17. Mina de San Cristóbal (Bolivia)	58
Figura 18. Mina Lubin (Polonia)	59
Figura 19. Mina Rudna (Polonia)	60
Figura 20. Mina Fresnillo (México)	61
Figura 21. Mina Antamina (Perú)	62
Figura 22. Jumbo operando en la mina Cannington (Australia)	62
Figura 23. Tendencia en el uso de la lixiviación desde los años 80	64
Figura 24. Proceso de lixiviación mediante pilas estáticas (multi-lift)	70
Figura 25. Proceso de lixiviación mediante pilas dinámicas (on/off)	71
Figura 26. Producción mundial de plata en el año 2018	76
Figura 27. Interfaz inicial de Surpac	95
Figura 28. Representación de la malla de sondeos	97
Figura 29. Representación de los sondeos sobre ortofoto de la zona	97
Figura 30. Vistas de la topografía	102
Figura 31. Vista planar de la superficie	103



Figura 32. Vista tridimensional de la superficie	103
Figura 33. Representación del color de la superficie en función de la altitud .	104
Figura 34. Importación de los sondeos sobre la superficie	104
Figura 35. Representación de los sondeos en función del contenido en plata	105
Figura 36. Representación de los sondeos en función del dominio que atraviesan	105
Figura 37. Leyenda de los dominios.....	106
Figura 38. Representación de un plano de corte del grupo de sondeos	107
Figura 39. Polilínea generada acotando los sondeos del dominio 50	108
Figura 40. Conjunto de las polilíneas que conformarán el sólido del dominio 50	108
Figura 41. Polilíneas tras el aplicado de "smoothing" o suavizado.....	109
Figura 42. Sólido generado correspondiente al dominio 50	109
Figura 43. Sólido correspondiente al dominio 51	110
Figura 44. Sólidos generados correspondientes a los dominios 101 (naranja), 111 (azul), 110 (gris) y los lentejones de alta ley (102 a 109) agrupados en un sólido (rosa).....	110
Figura 45. Representación de los lentejones de alta ley por separado	111
Figura 46. Ventana de reparación de sólidos, con las anomalías resaltadas.	111
Figura 47. Tablas informe de los volúmenes de cada cuerpo mineralizado del yacimiento	112
Figura 48. Conjunto de cuerpos mineralizados de Colquipucro, digitalizados en Surpac.....	113
Figura 49. Características del modelo de bloques creado	114
Figura 50. Diferentes vistas del modelo de bloques creado	115
Figura 51. Proceso de creación del filtrado de bloques de tipo 3DM	115
Figura 52. Modelo de bloques filtrado a los cuerpos mineralizados	116
Figura 53. Atributos creados para el modelo de bloques	117
Figura 54. Composites del contenido en plata de un grupo de sondeos.....	119
Figura 55. Interfaz de la interpolación.	120
Figura 56. Interfaz de introducción de la anisotropía del elipsoide de búsqueda	122
Figura 57. Elipsoides de búsqueda de cada cuerpo desplegados sobre sendo dominio de interpolación	123



Figura 58. Representación del modelo de bloques tras la interpolación	124
Figura 59. Interfaz para la realización del constraint	124
Figura 60. Representación de todos los bloques con contenido en plata	125
Figura 61. Representación de los bloques con color según contenido en plata	125
Figura 62. Representación de uno de los cortes de tipo easting realizados ..	126
Figura 63. Representación de sondeos y cuerpos mineralizados con color según el mismo rango de leyes de la leyenda (g/t)	127
Figura 64. Lentejones de alta ley representados sobre el modelo interpolado	127
Figura 65. Sección del modelo interpolado donde se puede ver cada valor del atributo para cada bloque.....	128
Figura 66. Modelo con color según el número de muestras tomadas para interpolar los bloques	128
Figura 67. Bloques con más de 9 muestras tomadas para las mediciones....	129
Figura 68. Color de bloques según la distancia anisotrópica a la muestra más cercana	130
Figura 69. Color de bloques según la media de la distancia anisotrópica a las muestras tomadas para cada medición.....	130
Figura 70. Ventana de introducción de nombre y formato del report.....	131
Figura 71. Ventanas de introducción de parámetros del report.....	131
Figura 72. Documento de texto con la salida de la información del report creado	132
Figura 73. Color de bloques dividiéndolos según coste de concentrado y recuperación.....	134
Figura 74. Color de bloques según dominio	134
Figura 75. Creación del proyecto en RecMin	135
Figura 76. Procedimiento para la interpolación de los sondeos en RecMin ...	135
Figura 77. Pantalla de carga del paquete de sondeos	136
Figura 78. Sondeos implementados en el módulo Dibujo	136
Figura 79. Superficie del terreno implementada en el módulo Dibujo	137
Figura 80. Color de sondeos según ley en plata (g/t)	137
Figura 81. Vista detallada de una sección de los sondeos.....	138



Figura 82. Superficie triangulada.....	138
Figura 83. Atributos del modelo de bloques que será enviado a RecMin.....	139
Figura 84. Características del modelo de bloques inicial	139
Figura 85. Implantación del nuevo tamaño de bloques	140
Figura 86. Atributos a añadir en el nuevo modelo de bloques	140
Figura 87. Comparativa del volumen de bloques entre el modelo de bloques nuevo (izquierda) y el modelo de bloques inicial (derecha).....	141
Figura 88. Interfaz de exportación y guardado del modelo de bloques a formato .csv.....	141
Figura 89. Características de la tabla de bloques creada	142
Figura 90. Importación del modelo de bloques.....	143
Figura 91. Interfaz de RecMin para cálculos y selección de bloques	143
Figura 92. Visualización del modelo de bloques en Surpac (izquierda) y RecMin (derecha).....	144
Figura 93. Precio de mercado de la plata (10/06/2020)	145
Figura 94. Fluctuación de los precios de la plata entre 2015 y 2020.....	145
Figura 95. Parámetros a introducir en la interfaz de optimización.....	147
Figura 96. Resultado de las cortas óptimas calculadas con RecMin.....	148
Figura 97. Distribución de la mena a lo largo de la corta creada	149
Figura 98. Corte transversal para mejor visualización de las cortas	149
Figura 99. Distribución de la plata a lo largo de las cortas	149
Figura 100. Distribución de los recursos y reservas en función de la precisión de los estudios	150
Figura 101. Ventana de introducción de datos de BLKs Planning.....	153
Figura 102. LTP óptimo con color de bloques según año de explotación	154
Figura 103. Planificación de la explotación del yacimiento mes a mes	154
Figura 104. Planificación mes a mes del primer año de explotación en módulo "Dibujo" de RecMin	155
Figura 105. Fecha de voladura de cada bloque del modelo optimizado	155
Figura 106. Vista frontal de la distribución de las labores de voladura durante un conjunto de días específicos	156
Figura 107. Interfaz de introducción de datos del informe.....	156
Figura 108. Planificación anual de la mena.....	157
Figura 109. Planificación anual del coste de concentrado	157



Figura 110. Planificación anual de la recuperación	158
Figura 111. Cálculo del VAN atendiendo a flujos de caja variables	158
Figura 112. Proceso de creación de archivo para importar a Surpac el modelo optimizado	159
Figura 113. Datos de importación	159
Figura 114. Modelo de bloques importado	160
Figura 115. Vista en planta de los cortes realizados a los bloques para conformar la corta	160
Figura 116. Polilíneas creadas alrededor de los bloques de interés para conformar la corta	160
Figura 117. Resultado final de la corta planteada para el modelo de bloques optimizado	161
Figura 118. Vista aérea de la corta proyectada con color según cota.....	162
Figura 119. Vista inferior de la corta proyectada con color según cota.....	162
Figura 120. Visualización de la corta óptima abierta junto con los dominios..	162



Tabla 1. Registro catastral de las concesiones mineras de Colquipucro	21
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas	65
Tabla 3. Velocidades de disolución en lixiviación en pilas	68
Tabla 4. Costes típicos de la zona de interés.....	88
Tabla 5. Valores de la tabla collar	98
Tabla 6. Valores de la tabla survey	99
Tabla 7. Métodos analíticos de los testigos de Colquipucro.....	100
Tabla 8. Valores de la tabla sample	101
Tabla 9. Estrategia de búsqueda de los lentejones de alta ley	121
Tabla 10. Estrategia de búsqueda de los dominios 101, 110 y 111	121
Tabla 11. Estrategia de búsqueda del dominio 50 de baja ley	121
Tabla 12. Estimación de los recursos minerales	133
Tabla 13. Estudio de las reservas obtenidas en la optimización	150
Tabla 14. Ingresos y gastos en función de la ley de la mena.....	151



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Resumen

En el siguiente trabajo fin de máster se desarrollará el diseño de una mina a cielo abierto de plata en la región de Cerro de Pasco (zona central de Perú). El depósito a estudiar se conoce como Colquipucro, propiedad de la empresa minera de origen canadiense Tinka Resources Limited (Ltd.) S.A.C, y los datos empleados para su diseño serán tomados a partir de varios grupos de sondeos, componiendo un total de 50.

El software utilizado para la modelización del yacimiento será el Geovia Surpac™, y la optimización será llevada a cabo con el RecMin.

Además, se realizará un estudio de viabilidad económica de la misma, atendiendo a los precios de mercado actuales y de futuro, en relación con los costes de producción y extracción del metal, teniendo en cuenta el carácter excepcional de esta explotación, al situarse alrededor de los 4000 metros de altitud sobre el nivel del mar, en la cordillera de los Andes.

Previamente al diseño de la explotación, se analizará la información geológica y geotécnica regional, así como la topografía de la zona para poder implementar una superficie con la que trabajar en el software y a partir de la cual se diseñe la corta.

Los proyectos llevados a cabo en esta zona de gran influencia minera, tanto histórica como actual, son llevados a cabo por Tinka, a través de su entidad subsidiaria de propiedad absoluta Tinka Resources Limited S.A.C. En la *figura 2*, correspondiente al catastro minero de esta zona específica de la región pueden observarse las diferentes zonas con concesión minera de la empresa. Dentro de este conglomerado de explotaciones mineras en los alrededores, el depósito de Colquipucro es el único verificado con presencia de plata.

Todas las unidades de medida utilizadas en este Proyecto son métricas a menos que se especifique lo contrario. La moneda a utilizar será el dólar estadounidense (USD). La moneda peruana es el Sol (PEN).



Los recursos y reservas minerales se reportan según los estándares del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia y Petróleo (*Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves – May 2014* y *CIM Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves Best Practice Guidelines – November 2003*).



1.2. Abstract

A design for an opencast mine in South America for the exploitation of silver will be done in the next thesis. The Project takes place in Cerro de Pasco region (central Peru). The deposit to evaluate is known as Colquipucro, property of Canadian based mining company Tinka Resources Limited (Ltd.) S.A.C. and the data used for its design comes from a pack of 50 boreholes.

The software used for modelling the deposit will be Geovia Surpac™, and the optimization will be made with RecMin.

In addition, an economic viability study for the mine will be done, according to current and future market prices, and production and extraction costs, keeping in mind the exceptional feature of this Project, since the deposit is situated at 4000 meters over the sea level, in the Andes Mountains chain.

Before the design of the exploitation, there will be an analysis of geological and geotechnical information for the zone, as of the entire Peruvian zone. There will also be a topographic study of the area of influence, in order to achieve a better way of understanding the zone, as it is the place where the open pit will be designed for its development.

The mining projects of this zone are being held by Tinka, by its subsidiary entity of absolute ownership Tinka Resources Limited S.A.C. In *figure 2*, related with the mining cadastral registers of the zone, different zones with mining activity can be seen apart from Colquipucro, which is the only one registered deposit with proved presence of silver.

All the measurements used in this thesis are metric unless otherwise noted. The currency used to the economic studies and annotations will be the United States dollar (USD). Peruvian currency is the *Sol* (PEN).



Mineral reserves and resources are reported according to the Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM), on its Definition Standards for Mineral Resources and Mineral Reserves – May 2014 y CIM Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves Best Practice Guidelines – November 2003.



© Tinka Resources Ltd.

Figura 1. Localización del depósito

CAPÍTULO 2. ÁMBITO LOCAL

El proyecto Colquipucro se localiza 200 km al norte – nordeste de Lima, capital de Perú, dentro de los distritos de Yanahuanca y San Pedro de Pillao, Provincia de Daniel Alcides Carrión, en el departamento de Pasco (centro de Perú).

El proyecto es accesible por carretera, a lo largo de una carretera de 380 km aproximadamente, desde Lima hasta San Pedro de Pillao, la localidad más cercana a la zona mineralizada. Desde San Pedro de Pillao hasta la zona del proyecto existen varias pistas de tierra, utilizadas para llegar a los pastos de zonas circundantes al terreno.

El proyecto Colquipucro se extiende, aproximadamente, a lo largo de una malla cuadrada de 1 km², con coordenadas 10°25'S, 76°31'W, como se observa en la *figura 2* (se desprecia el valor de los segundos dado que cualquier zona con estas coordenadas se encuentra dentro de la maya de interés)

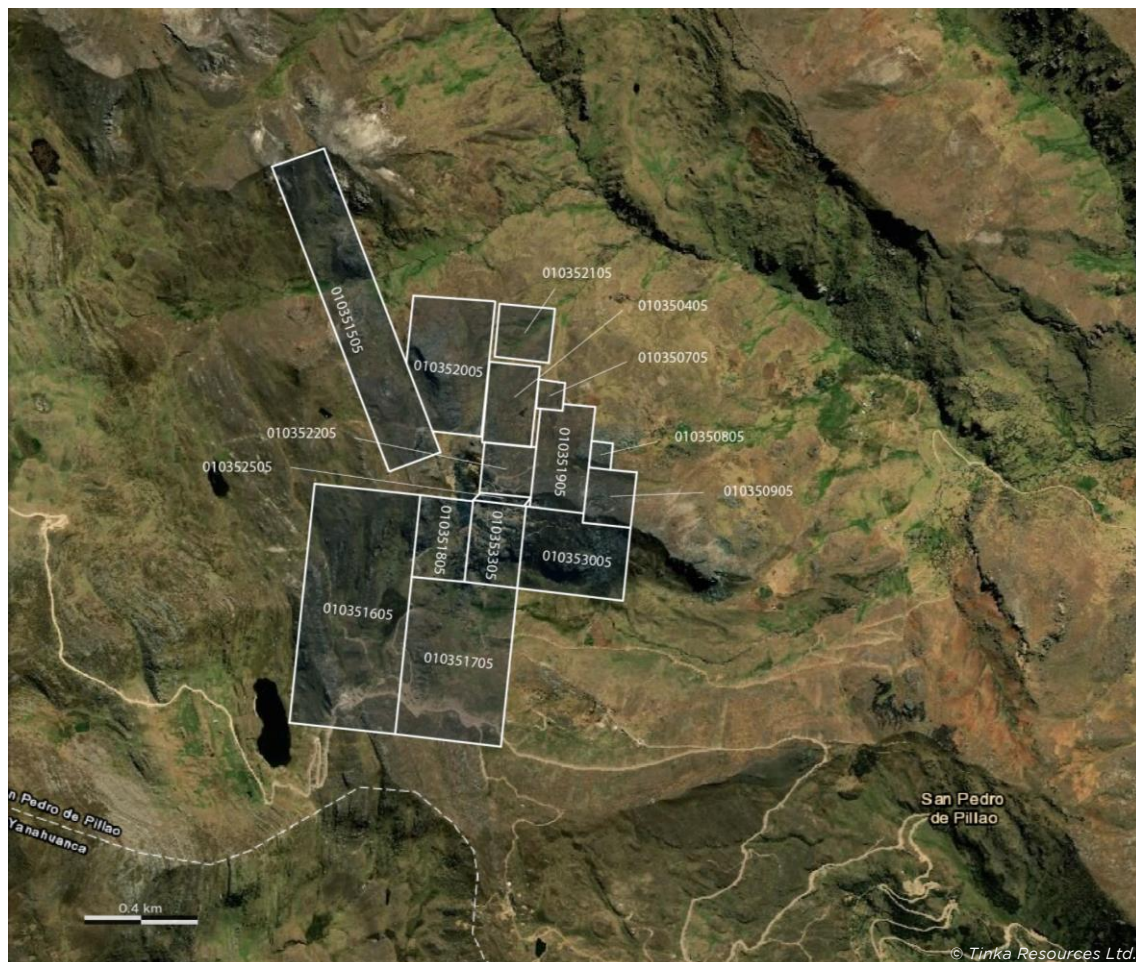


Figura 2. Registros catastrales de Colquipucro sobre ortofoto

La ruta que lleva hasta la zona desde Lima sería la Carretera Panamericana Norte hasta Huaral – Chancay – Oyón, y luego hasta Yanahuanca. En esta localidad se sitúa la bifurcación que conduce a Cerro de Pasco, dirección este, o a San Pedro de Pillao, dirección nordeste, por la PE-18. Estos últimos tramos del recorrido poseen zonas sin asfaltar, por lo que el tiempo de llegada a estos puntos se ve alargado pese a las cortas distancias que los separan.



Figura 3. Localización del depósito sobre el mapa general de Perú



El aeropuerto comercial más cercano se sitúa en Huánuco, capital de la Región de Huánuco, y de la provincia de nombre homónimo.

La temperatura media del área de incumbencia es de 15 °C durante el día. Sin embargo, las temperaturas pueden variar significativamente con la altitud y la estación del año. La época más lluviosa se extiende de octubre a marzo, y el invierno transcurre entre los meses de mayo a septiembre.

La ciudad de Cerro de Pasco, situada aproximadamente a 40 km de Colquipucro, es la capital regional y un importante centro de suministro minero.



Figura 4. Mapa minero de la región central de Perú

El depósito se encuentra en la cordillera de los Andes, en la zona centro-oeste de Perú. Las cotas se extienden desde los 3300 metros de altitud hasta un máximo de 4459 m en el Cerro San Lorenzo, situado al oeste de la zona mineralizada. En las cotas más altas, abundan los pastos y algunas especies de musgo y líquenes. Las cotas inferiores del proyecto se caracterizan por tener arbustos espinosos y cactus, ocasionalmente.



Existen evidencias en la zona de presencia minera a pequeña escala que se estima entre los años 1920 – 1950. En la zona pueden encontrarse vestigios de lo que fue un campamento minero, varias bocaminas de pequeño tamaño, una chimenea de piedra, así como galerías transversales, chimeneas y pozos en el subsuelo, además de un horno empleado para secar menas de plata.

Antes de que Tinka realizara exploraciones y prospecciones en la zona, otras compañías operaron en el lugar. En primer lugar, Compañía Minera Colquipucro s. a. se hizo con la propiedad del terreno (1950 – 1954), que fue la encargada de desarrollar una infraestructura de túneles en el subsuelo para la exploración de plata. A continuación, el área pasó a formar parte de Cerro de Pasco Corporation y, en 1960, Compañía Minera Buenaventura (Buenaventura) tomó las riendas de los proyectos mineros en esta zona. Estas empresas realizaron un cartografiado del terreno, obtuvieron muestras de suelo y roca, realizaron zanjas, sondeos y se encargaron de la extracción de plata mediante minería subterránea.

Entre 1960 y 2005 continuaron las labores de exploración de forma esporádica. Buenaventura perforó cuatro sondeos sobre el depósito de plata de Colquipucro, cartografió y tomó muestras de afloramientos de gossan.

Según los únicos registros antiguos accesibles, la producción pasada de plata en el depósito a estudiar fue de:

- 1924: 1397 kg
- 1930: 10.7 kg Ag / 7705 kg Au
- 1949: 97 kg Ag

En el año 2005 vencieron los derechos mineros de la compañía Buenaventura, haciéndose Tinka con ellos desde entonces hasta la actualidad. El plan de trabajo de Tinka en la zona incluyó el cartografiado geológico, muestreos de suelos, rocas y trabajos subterráneos, estudios geofísicos tales como magnéticos, polarización inducida (IP), resistivos, gravimétricos, magnéticos, electromagnéticos o aéreos, perforación con testigo, ensayos metalúrgicos y estimaciones de recursos minerales.

Los ensayos metalúrgicos preliminares del yacimiento de plata de Colquipucro se llevaron a cabo entre 2015 y 2018. El trabajo incluyó test de lixiviación con



varios tipos y concentraciones de agentes reactivos, y test de flotación de lotes de sulfuros a granel.

Junto a Colquipucro, se establecen ciertos depósitos mineralizados

Los diferentes ensayos realizados indicaron que podría darse un 50 % de la recuperación de plata a través de lixiviación, un 60 – 70 % a través de cianuración en tanques o flotación.

De acuerdo con la Regulación Técnica de Perú E.030 de Diseño Sismorresistente, la zona sobre la que se asienta la mineralización de Colquipucro se sitúa en la Zona Sísmica 3 (figura 5).



Figura 5. Mapa de las zonas sísmicas de Perú

El conjunto de operaciones llevadas a cabo para la exploración, prospección e investigación pertenecientes al proyecto de Colquipucro se llevan a cabo dentro de 15 concesiones minerales recogidas en el libro catastral minero de Perú. Son



accesibles a través de la página del Instituto de Geología, Minería y Metalurgia (INGEMMET), siendo las mostradas en la *tabla 1*:

Código	Derecho Minero	Superficie (ha)	Fecha de concesión
010350405	TK COL 4	5.9900	10/11/2005
01 0350705	TK COL 7	0.9354	11/04/2006
010350805	TK COL 8	0.9973	17/03/2006
010350905	TK COL 9	3.9931	23/02/2006
010351505	TK COL 15	23.9654	29/03/2006
010351605	TK COL 16	35.9489	10/03/2006
010351705	TK COL 17	23.9659	10/03/2006
010351805	TK COL 18	5.9916	06/03/2006
010351905	TK COL 19	7.0627	03/03/2006
010352005	TK COL 20	13.4187	31/05/2006
010352105	TK COL 21	3.3943	29/03/2006
010352205	TK COL 22	3.6600	10/11/2005
010352505	TK COL 25	0.7507	01/03/2006
010353005	TK COL 30	11.5095	10/03/2006
010353305	TK COL 33	5.9914	01/03/2006

Tabla 1. Registro catastral de las concesiones mineras de Colquipucro



CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN

Los derechos de explotación, procesamiento y/o producción de minerales en Perú está regulada, principalmente, por las leyes y regulaciones mineras decretadas en el Congreso de la República de Perú y el órgano ejecutivo del mismo, bajo la Ley General de Minería del año 1992.

Dicha ley regula nueve actividades mineras diferentes:

- Reconocimiento
- Prospección
- Exploración
- Explotación (minería)
- Labor general
- Beneficio
- Comercialización
- Transporte del mineral
- Almacenamiento del mineral fuera de zona minera

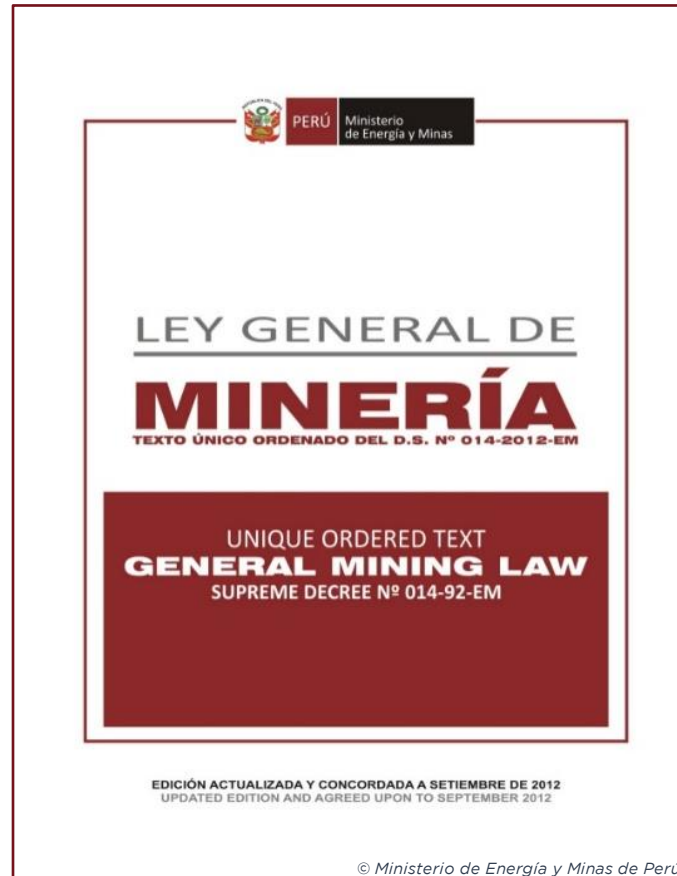


Figura 6. Ley General de Minería N° 014-92-EM



En resumen, los principales dispositivos legales aplicables a la actividad minera son:

- Ley General de Minería: Decreto Supremo N° 014-92-EM
- Ley de Canon Minero: Ley N° 27506 (10/07/2001)
- Ley que regula los Pasivos Ambientales: Ley N° 28271 (06/07/2004)
- Ley General del Ambiente: Ley N° 28611 (15/10/2005)
- Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental: Ley N° 27446 (23/04/2001)
- Ley que regula el Cierre de Minas: Ley N° 28090 (14/10/2003)
- Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM: Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental
- Decreto Supremo N° 040-2014-EM: Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero
- Decreto Supremo N° 018-92-EM: Reglamento de Procedimientos Mineros
- Decreto Supremo N° 033-2005-EM: Reglamento para el Cierre de Minas
- Decreto Supremo N° 013-2019-EM: Modificación del Reglamento para el Cierre de Minas
- Decreto Supremo N° 028-2008-EM: Reglamento de Participación Ciudadana en el Subsector Minero
- Resolución Ministerial N° 304-2008-MEM/DM: Normas que regulan el Proceso de Participación Ciudadana en el Subsector Minero

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) es la autoridad que regula las actividades mineras. Este ministerio también es el encargado de conceder las concesiones mineras a particulares, tanto locales como externos, o a entidades legales, a través de un organismo especializado llamado Instituto de Geología, Minería y Metalurgia (INGEMMET).

Otras autoridades reguladoras relevantes son el Ministerio del Ambiente (MINAM), el Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles (SENAM) y el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental



(OEFA) se encarga del monitoreo del cumplimiento de las exigencias medioambientales.



3.1. Concesiones mineras

Las concesiones mineras son otorgadas por separado, bien se trate de minerales metálicos o no metálicos.

Cada una de ellas deberá poseer, como mínimo, 100 ha de superficie, pudiendo alcanzarse un máximo de 1000 ha.

Una concesión mantendrá su validez siempre y cuando el titular:

- Pague las tasas anuales de la concesión o las cuotas de validez (derecho de vigencia), actualmente situado en 3 USD/ha. El impago de dicha tasa durante dos años consecutivos provocaría la cancelación de la concesión minera.
- Cumpla con los objetivos mínimos de la inversión o los niveles de producción. El mínimo se divide en dos clases:
 - Alcanzar la “producción mínima anual” para el primer semestre del año 11, contando desde al año próximo al comienzo de la concesión, o pagar una penalización por improductividad en una escala variable, como se define en el Decreto Administrativo N° 1320 (Ministerio del Ambiente), efectivo desde el 1 de enero de 2019. La “producción mínima anual” se define como una Unidad Impositiva Tributaria (UIT) por hectárea y año, estipulada en S/4200 en 2019 (aproximadamente 1200 USD).
 - Alternativamente, no hay posibilidad de pagar penalización si se hace una “inversión mínima anual” de al menos 10 veces el valor de la penalización.

La estructura penal muestra que cuando el titular del terreno es incapaz de alcanzar la producción mínima anual para el primer semestre del año 11 desde la toma de la concesión, este deberá abonar una penalización equivalente al 2 % de la producción mínima aplicable por año y hectárea hasta el año 15.

Si el titular no puede alcanzar la producción mínima anual para el primer semestre del año 16 tras el inicio de la concesión, este deberá abonar una penalización equivalente al 5 % de la producción mínima aplicable por año y hectárea hasta el año 20.



Si el titular no puede alcanzar la producción mínima anual para el primer semestre del año 20 tras la toma de la concesión, este deberá abonar una penalización equivalente al 10 % de la producción mínima aplicable por año y hectárea hasta el año 30.

Finalmente, si el titular es incapaz de alcanzar la producción mínima anual durante este periodo, la concesión minera expirará automáticamente.

La nueva legislación indica que los titulares de concesiones mineras, beneficiarios de estas antes de diciembre de 2008 estarán obligados a pagar la penalización de 2019 si estos no alcanzaron ni la producción mínima anual o si no cumplieron con la inversión mínima anual en el año 2018.

Las concesiones mineras expirarán automáticamente si alguno de los siguientes eventos tiene lugar:

- La tasa anual no es pagada durante dos años consecutivos
- La aplicación a pagar promulgada no es pagada durante dos años consecutivos
- La producción mínima anual objetada no es alcanzada en los 30 años consecutivos a la concesión

Las concesiones de beneficio siguen las mismas reglas que las de las mineras. Se debe abonar una tasa que refleje la capacidad nominal de la planta de procesado o el nivel de producción. El impago de sendas tasas durante dos años supondrá la pérdida completa de la concesión de beneficio.



3.2. Derechos de superficie

Las compañías mineras deben ser las encargadas de negociar los acuerdos con los dueños del terreno a explotar, o establecer derechos de acceso con los mismos. Cuando los derechos sobre el terreno pertenecen a comunidades, dichos derechos de acceso deberán ser aprobados por una mayoría cualificada de al menos dos tercios de los miembros registrados de la comunidad. En caso de que las tierras en propiedad de comunidades estén incluidas dentro de la base de datos de comunidades indígenas, a salvaguardo del Ministerio de Cultura, será necesaria la realización de un proceso de consultas previo a ningún acto administrativo, además de los permisos medioambientales. Para el titular de tierras en posesión del gobierno, se deberá llevar a cabo un proceso de adquisición con el estado de Perú a través de la Superintendencia Nacional de Bienes Estatales (SBN).

Se considerarán procedimientos de expropiación para casos en que los propietarios del terreno se posicionen reacios a permitir a las compañías mineras el acceso al depósito mineral. Una vez la decisión haya sido tomada por el Gobierno, la decisión administrativa puede ser únicamente apelada por el terrateniente original, al igual que la compensación pagada.



3.3. Derechos de aguas

Los derechos sobre las aguas se recogen en la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338), promulgada y puesta en vigencia en marzo de 2009. Dichos derechos se encuentran bajo administración de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), organismo que forma parte del Ministerio de Agricultura. Existen tres tipos de derechos sobre las aguas:

- **Licencia:** este derecho es otorgado para el uso del agua para darle al agua una labor específica en un lugar determinado. La licencia es válida hasta que la actividad para la que fue concedida haya terminado.
- **Permiso:** este derecho temporal se concede durante periodos en que existe superávit de agua.
- **Autorización:** este derecho se otorga para una cantidad y labor específica de agua. El periodo de la concesión es de dos años, el cual puede extenderse por un año adicional, por ejemplo, en labores de sondeos.

Para mantener la validez de los derechos sobre el agua, el titular deberá:

- Realizar todos los pagos estipulados, incluyendo las tarifas del agua.
- Atenerse a las condiciones del permiso de aguas en lo que se refiere a la tarea/s para la que este fue concedido.

Los derechos del agua no pueden ser transferidos o hipotecados. Sin embargo, en caso de cambio de acreedor en una concesión minera, o dueño de la superficie de extracción mineral, que sea también acreedor de derechos de agua, el nuevo acreedor o dueño podrá también obtener el derecho sobre las aguas.



3.4. Consideraciones ambientales

El Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM) es la autoridad medioambiental, aunque la autoridad administrativa es la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM), órgano perteneciente al Ministerio de Energía y Minas (MINEM). Las regulaciones medioambientales para actividades de explotaciones mineras fueron definidas en el Decreto Supremo N° 020-2008-EM – MINEM (2008). Las nuevas regulaciones para exploración fueron definidas en 2017, en el Decreto Supremo N° 042-2017-EM.

Una Ficha Técnica Ambiental (FTA) es un estudio preparado para la aprobación de actividades de exploración con escaso impacto ambiental y menos de 20 plataformas de sondeo. La autoridad medioambiental tendrá 10 días laborables para presentar observaciones al respecto.

Una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) debe ser presentada para actividades de exploración de la Categoría I, que posean un máximo de 40 plataformas de sondeo, o influencia en más de 10 ha de terreno. La autoridad medioambiental tendrá 45 días laborables para presentar observaciones al respecto.

Un Estudio de Impacto Ambiental Semi-Detallado (EIASd) debe ser presentado para programas de exploración de la Categoría II, que posean entre 40 y 700 plataformas de sondeo o influencia en más de 10 ha de terreno. La autoridad ambiental tendrá 96 días laborables para presentar observaciones al respecto. La totalidad del proyecto, incluyendo la preparación del estudio, realizada por una consultoría medioambiental especializada, puede llevar de 6 a 8 meses.

Un Estudio de Impacto Ambiental Detallado (EIAAd) debe ser presentado para la construcción de la mina. La preparación y autorización de tal estudio puede llegar a durar hasta dos años.



3.5. Permisos

Para comenzar con actividades de explotación minera, una compañía deberá cumplir los siguientes requerimientos y obtener un fallo con aprobación por parte del MINEM, como se define en el Decreto Supremo N° 020-2012-EM (06/06/2012):

- Resolución de autorización de la Declaración de Impacto Ambiental
- Programa de trabajo
- Declaración del acreedor de la concesión indicando que es el dueño del terreno a explotar o, en caso contrario, que posee la autorización del dueño/s para llevar a cabo labores mineras sobre el terreno especificado.
- Licencia, permiso o autorización que permita el uso de las aguas de la zona.
- Títulos de concesión minera
- Un certificado de inexistencia de vestigios arqueológicos (CIRA), a través del cual el Ministerio de Cultura certifica que no hay monumentos o restos dentro del área del proyecto a llevar a cabo. Sin embargo, aún en posesión de un CIRA, las compañías de exploración podrán únicamente llevar a cabo movimientos del terreno bajo la supervisión directa e in situ de un arqueólogo.



3.6. Otras consideraciones

Las compañías mineras deberán presentar, y recibir la subsiguiente aprobación de un estudio de impacto ambiental que incluya un plan social de regulaciones, un certificado de inexistencia de vestigios arqueológicos, y un borrador de cierre y clausura de la explotación minera. Los planes de clausura deben ir acompañados del pago de una fianza, que será devuelta una vez se cumpla con los criterios establecidos para la clausura y restauración de la explotación.

En abril de 2012, el Gobierno de Perú aprobó la Ley de Consulta Previa y sus regulaciones, aprobadas por el Decreto Supremo N° 001-2012-MC, por el que se requiere la consulta previa con cualquier comunidad indígena, determinada por el Ministerio de Cultura, antes de cualquier infraestructura o proyecto, en particular, proyectos mineros o energéticos.

Las compañías mineras también deberán obtener separadamente los derechos de aguas de la Autoridad Nacional del Agua, y derechos sobre la superficie por parte de dueños particulares.



3.7. Estudios ambientales

La compañía Tinka realizó siete estudios ambientales en la zona de interés con vistas a la realización de los sondeos empleados en este estudio; en el periodo 2013 – 2018.

La autorización por la cual se permitía el comienzo de actividades mineras fue la Resolución N° 0170-2017-MEM/DGM del 10 de febrero de 2017.

A su vez, se emitieron cinco certificados de existencia nula de vestigios arqueológicos (CIRA).

3.7.1. Humedales

La legislación peruana (Ley 28611-2005, Ley General del Medio Ambiente y la Resolución Ministerial N° 092-2014-MEM/DM) identifica los humedales (bofedales, en Sudamérica, cuando se localizan a altitudes notables) y lagos de montaña como ecosistemas de relevancia.

En la zona, hay humedales y dos lagos de montaña; Laguna Chaquicocha (331612.0E, 8846597.5N) y un lago sin nombre (331394.8E, 8847501.9N) en las inmediaciones del proyecto.

La infraestructura que se plantee para el proyecto minero deberá tener en cuenta la cercanía de estos emplazamientos en un futuro. La legislación peruana (Resolución Ministerial N° 398-2014-MINAM, Directrices de Compensación Medioambiental, MINAM 2014) exige la implementación de medidas de mitigación en caso de existencia de ecosistemas de relevancia en las inmediaciones, además de la posibilidad de exigencia de medidas compensatorias.

3.7.2. Especies en interés de conservación

Los estudios base iniciales identificaron la existencia de cierto número de especies de flora y fauna en la zona del proyecto, listadas como especies en peligro de extinción (*critically endangered – CR*), bajo peligro (*endangered – EN*) o vulnerables (*vulnerable – VU*), bajo la legislación peruana (S.D. N° 043-2006-AG y S.D. N° 004-2014-MINAGRI) o están listadas en los Apéndices de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna



y Flora Silvestres (CITES) o en el estudio de La Lista Roja de Especies Amenazadas de la UICN.

En un futuro, se deberían realizar estudios adicionales para tener una mejor y más amplia documentación de las especies a tener en cuenta para el desarrollo de la actividad de interés, para obtener la probabilidad del impacto que supondría la implantación del proyecto para ellas, y para desarrollar las medidas de mitigación adecuadas cuando estas sean requeridas.

3.7.3. Programas de monitoreo

Los programas de monitoreo se deben llevar a cabo para proceder a las aprobaciones de los estudios de impacto ambiental (EIA_{sd} y MEIA_{sd}).

Se deberán recolectar datos, tanto de calidad del agua, como de la calidad del aire y ruido ambiental.

También podría monitorearse la flora, fauna y los suelos pertenecientes al área del proyecto.



3.8. Plan de cierre

El estudio de impacto ambiental (EIA) del proyecto debe incluir un plan de cierre conceptual para obtener la aprobación medioambiental. Dicho estudio debe ser emitido antes del paso de un año desde la aprobación del EIA.

Se deberá depositar la garantía financiera correspondiente al cierre antes del comienzo de la producción, y dentro de los primeros 20 días laborables del año consiguiente a la aprobación de la concesión o al comienzo de la actividad, como se especifica en las Regulaciones para el Cierre de Minas.

El plan final de cierre debe ser entregado para aprobación dos años antes del comienzo de las actividades de cierre.



3.9. Construcción y operaciones

Una vez los estudios de impacto ambiental y social se aprueban por las autoridades peruanas concernientes, se requerirán una variedad de licencias, permisos y autorizaciones para proceder a la construcción del proyecto y operaciones. Los requerimientos principales incluirían:

- Aprobación del plan de cierre de mina
- CIRAs
- Autorizaciones de uso de aguas y licencia final
- Autorización sanitaria, aprobación del tratamiento de aguas residuales y descarga
- Autorización sanitaria para el sistema de tratamiento de agua potable
- Registro de consumidor directo de combustibles fósiles (instalaciones fijas o móviles)
- Autorización de almacenamiento de explosivos (anual)
- Certificado de usuario para el control de sustancias y productos químicos
- Concesión de beneficio
- Comienzo de actividades (incluye la explotación de materiales de construcción y exploración minera)

Los CIRAs concedidos no cubren todas las áreas de infraestructura previstas en el PEA. Las áreas principales previstas de requerimiento adicional de CIRAs son:

- Instalaciones de uso minero
- Planta de relleno para minería
- Planta de procesado
- Triturador primario
- Líneas de suministro eléctrico
- Subestación eléctrica
- Carretera de acceso
- Escombrera y planta de almacenamiento de residuos



3.10. Consideraciones sobre impacto social y comunitario

Como en todo proyecto minero, es recomendable la realización de reuniones de ámbito social con las comunidades circundantes.

Debe tenerse en cuenta que la localización del proyecto y su implantación afectaría a, al menos, una comunidad incluida en la lista de comunidades indígenas del Ministerio de Cultura.

La compañía consultora Wood Plc., que se trata de una empresa que opera principalmente en los sectores de energía eléctrica, petróleo y gas, minería y metales e infraestructura, llevó a cabo una revisión del potencial social y comunitario como parte del PEA realizado, basado en información disponible por parte de Tinka, que realizó un informe de cumplimiento en 2017 – 2018.

Los principales riesgos identificados incluyen:

- Potencial de conflictos sobre el uso de aguas
- Potencial impacto sobre los humedales existentes y lagos de montaña
- Localizaciones de infraestructura propuestas que solapen con las ya existentes, como carreteras
- Presencia de material arqueológico en las áreas propuestas para mantener la infraestructura minera
- Habilidad de obtener permisos sobre tierras para proporcionar acceso a áreas del proyecto, de desarrollo, de construcción y de operaciones
- Interpretación clara sobre el área de influencia del proyecto, incluyendo las comunidades que puedan estar potencialmente afectadas por este, y los tipos de impactos a tener en cuenta
- La capacidad del proyecto y la compañía para cumplir con los compromisos establecidos con las comunidades



CAPÍTULO 4. GEOLOGÍA

4.1. Geología general

Pfiffner, O. A. y González, L. (2013) indican que la geología de Perú, desde la Zanja de Perú-Chile en la placa Pacífico-Brasil, se define como tres regiones paralelas principales; de oeste a este: el Antearco Andino, los Altos Andes y el Promontorio Andino. Estas tres regiones se formaron durante la evolución Meso-Cenozoica de los Andes Centrales. La Propiedad se encuentra dentro de la región de los Altos Andes y es subyacente a la estratigrafía sedimentaria y volcánica formada entre las edades Proterozoica y Bajo Cretácico. Se puede ver un mapa morfoestructural de la región en la siguiente figura.



Figura 7. Mapa morfoestructural de Perú

Los Altos Andes se pueden dividir en tres secciones, de oeste a este:



- La Cordillera Oeste, formada por rocas de la era mesozoica pero también del periodo terciario del Cenozoico, dominadas por el Batolito Costero Peruano, que consiste en múltiples intrusiones con edades comprendidas desde el Bajo Jurásico hasta el Eoceno Superior. El cinturón posee aproximadamente 65 km de ancho por 1600 km de largo, manteniéndose sub paralelo a la costa pacífica, extendiéndose dentro de Ecuador y Chile.
- El Altiplano es una llanura alta, de drenaje interno con una elevación media de 4000 m, ligeramente por debajo de las altitudes medias de las Cordilleras Este y Oeste. Posee 150 km de ancho y 1500 km de largo, extendiéndose desde la zona septentrional de Argentina a la meridional de Perú.
- La Cordillera Este forma una meseta de 4000 m de altitud y 150 km de ancho. Durante la era cenozoica, el arco se elevó, formando la Cordillera Este.

Estratigráficamente, la zona de los Altos Andes consiste en, de oeste a este; un intra-arco que atraviesa una cuenca profunda, una plataforma continental (lugar donde se ubica el depósito a estudiar), y el complejo metamórfico Marañón. En general, las formaciones más antiguas se sitúan, en orden creciente, de oeste a este, abarcando desde mediados del periodo terciario hasta el Neoproterozoico-Paleozoico.

El pliegue y cabalgamiento de Marañón (MFTB – *Marañón Fold and Thrust Belt*) se formó durante el Eoceno en respuesta a la acreción y subducción directa en dirección estenordeste. Los pliegues verticales se forman sobre un horizonte de separación somero hacia el oeste, mientras que los pliegues más abiertos fueron formados sobre un horizonte de separación más profundo hacia el este. En la zona de los proyectos mencionados, junto con Colquipucro, se observa un pliegue de este último tipo. Más lejos, hacia el este, el estilo de la deformación es diferente con fallas inversas de grandes buzamientos y pliegues abiertos que afectan el basamento cristalino de la Cordillera Este (Pfiffner, 2013). El pliegue y cabalgamiento de Marañón ha sido cartografiado a lo largo, al menos, de 200 km, de noreste a sudoeste.



El depósito mineral del centro de Perú consiste en una variedad de depósitos metálicos base en rocas huésped con edades variables desde el Pérmico al Mioceno; sin embargo, la edad de la mayoría de los depósitos minerales en general se relaciona con intrusiones de 5 a 7 millones de años (Mioceno). Los tipos de depósitos existentes son polimetálicos de reemplazo de carbonatos (CRDs), filones polimetálicos, skarns de zinc-cobre, skarns de cobre-zinc y pórfidos cupríferos. Todos los depósitos masivos de zinc se albergan en las rocas carbonatadas del Mesozoico.



Figura 8. Mapa geológico de Perú

El mayor depósito con alta presencia en zinc es el de Cerro de Pasco. Los depósitos de zinc de Colquijirca y San Gregorio, localizados aproximadamente

10 kilómetros al sur de Cerro de Pasco, son también grandes depósitos CRDs ricos en zinc y cobre.



4.2. Geología local

El mapa geológico local (*figura 9*) muestra que el proyecto es subyacente a una estratigrafía sedimentaria y metasedimentaria de tiempos variables entre finales del Proterozoico al Terciario.

Toda la secuencia se ha visto sometida bajo fuerzas de pliegue y empuje a lo largo de una tendencia norte a norte-noroeste en las fallas andinas (compresión este-oeste), con posteriores fallas transtensionales orientadas al nordeste o este-oeste.

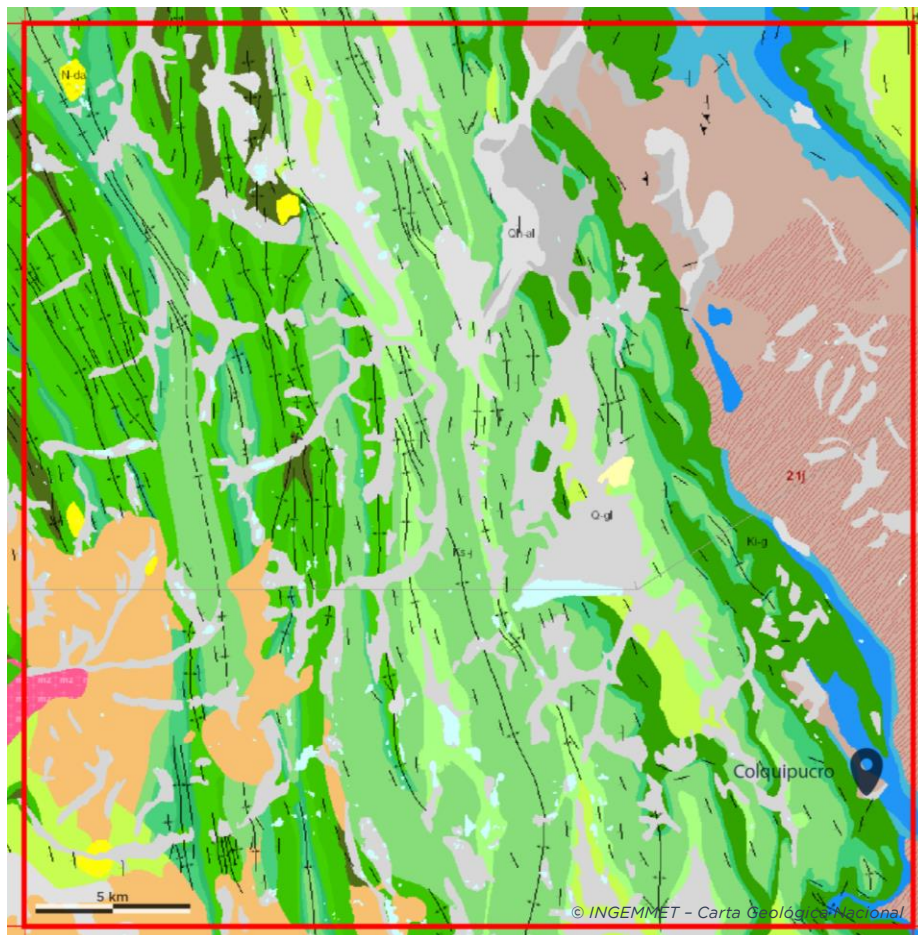


Figura 9. Cuadrángulo geológico Yanahuanca (21-j)



Figura 10. Mapa geológico del depósito Colquipucro

Las rocas más antiguas documentadas en la zona pertenecen al complejo Marañón y consisten en esquistos, gneis y rocas metaintrusivas. La filita que aflora en el área involucrada en el proyecto son parte del *Excelsior Group* (Grupo Excelsior), una unidad del Devónico suprayacente al complejo Marañón. Los sedimentos rojizos de la zona se corresponden con el conocido Grupo Mitu, perteneciente a edades comprendidas entre el Pérmico al Triásico Inferior. Estos sedimentos contienen arenisca, conglomerados y arcillas intercaladas. También pueden ser encontradas evidencias de roca volcánica en las zonas superiores del Grupo Mitu en otras zonas de la región. EL Grupo Mitu podría llegar a tener un grosor de 100 metros en algunos lugares; sin embargo, este grosor varía a lo largo del mismo, sin mostrar constancia evidente.

La caliza del Triásico Superior al Jurásico Inferior del grupo Pucará es el principal componente para las mineralizaciones de zinc y estaño del área del proyecto, y es un componente importante de las formaciones de zinc en otros lugares del cinturón.

La caliza del Grupo Pucará se divide regionalmente en tres unidades principales:

- Formación Chambará

Consiste en una sucesión de calizas bioesparfíticas, biomicritas y dolomías, alcanzando la potencia de 2500 metros. Se distinguen tres unidades litológicas. La base de la unidad inferior está en contacto subvertical con el Grupo Mitu, tiene 800 metros de grosor y comienza con bioesparita gris en bancos de 0.30 – 0.50 m de grosor, compactos y duros, afectados por un stock granodiorítico de 230 metros de ancho, silicificando y marmolizando parcialmente a la caja.

Esta unidad hacia el tope pasa gradualmente a biomicrita y dolomías en bancos medianos y delgados, de color gris claro con estructuras estiolíticas, laminaciones subparalelas, ondulaciones, venillas de calcitas, microcalciesferas, algunos bancos presentan aspectos moteados por la orientación de manchas oscuras milimétricas según la estratificación; ocasionalmente se intercalan bancos de intraesparitas de aspecto brechoide.

La unidad intermedia tiene 1000 metros de grosor, presenta estratificación rítmica de biomicrita lutita, siendo más conspicua en su parte central, disminuyendo el contenido lutáceo hacia el tope. Las calizas ocurren en bancos medianos y delgados de color gris oscuro, con olor fétido al fracturarse. Tienen venillas de calcita, laminaciones subparalelas, abundante microcalciesferas blancas, algunas con núcleos negros, ocasionalmente aparecen bancos calcáreos con poco peso descalcificados por el agua meteórica. Las lutitas se presentan en lechos centimétricos, de color negro, carbonoso; propias de ambiente reductor.

La unidad superior tiene 250 metros de potencia. Consiste principalmente en una sucesión de biomicrita gris clara a gris con concentraciones de chert, laminaciones subparalelas, venillas de calcitas y estructuras estilolíticas, alternándose con niveles de intraesparita con clastos de carbonatos angulosos. La edad de la formación Chambará es del Noriense-Triásico, datada en los Andes Centrales.



- Formación Aramachay

Aflora en el río Huallaga, consiste en una sucesión de bancos de biomicritas gris oscura a negra, intercaladas con niveles de bioesparita, margas limolíticas y lutitas carbonosas con un espesor de 400 metros.

En la parte inferior de la formación, los bancos de biomicritas tienen 0.50 – 0.80 metros de grosor, con laminaciones subparalelas, abundantes microcalciesferas, trazas de pirita, concentraciones de chert, venillas de calcita, manchas oscuras centimétricas alargadas según la estratificación y expelen olor a hidrocarburos al fracturarse.

En la parte superior de la formación, los carbonatos y dolomías son lajosas, piritosas y carbonosas. Contienen arietites del Sinemuriense – Jurásico Inferior, que se observan sobre un suelo marrón claro en los últimos 100 metros hacia el tope, con indicios de alteraciones hidrotermales en bandas oscuras y grises claras de tipo “cebra”, más visibles aguas abajo.

- Formación Condorsinga

Su base se inicia con una sucesión de bancos de biomicritas de color gris oscuro, haciéndose hacia arriba gris a gris clara, rematando en el tope con un horizonte de breccas con elementos angulosos de calizas en matriz clara, totalizando un grosor de 650 m.

Los bancos de calizas biomicríticas presentan laminaciones subparalelas, venillas de calcita, alternándose con lechos de lutitas grises. El tope de esta formación está en contacto subparalelo con la formación Sarayaquillo del Jurásico Superior.

El Grupo Goyllarasquizga del Cretácico Inferior (comúnmente abreviado como areniscas de Goyllar o Grupo Goyllar) yace de forma discontinua sobre las rocas del grupo Pucará. El Grupo Goyllar consiste en cuatro formaciones regionales; de más profunda a más somera: Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMMET) clasificó estas formaciones como “indiferenciadas” en la zona, sin embargo, la descripción de la formación Chimú (arenisca de cuarzo lechoso, esquistos negros y pequeñas capas de carbón) es la que más se corresponde con lo que se encontró en las prospecciones del área del proyecto. En general, al este de la Falla de Colquipcro



las areniscas de Goyllar buzanan suavemente (a menos de 10°) hacia el sudeste. Al oeste de la Falla de Colquipucro las areniscas de Goyllar buzanan suavemente al oeste. Se han dado pliegues cerca de las fallas regionales con tendencia noroeste, y las buzamientos de las areniscas son subverticales.

La cartografía regional enfatiza el cinturón de pliegue y empuje como la formación predominante en la zona (Cobbing and Sanchez, 1996). El área al oeste del proyecto consiste en rocas cretácicas en una sucesión de pliegues y cabalgamientos intrincados y un conjunto de rocas volcánicas calc-alcálinas deformadas en menor medida, propias de comienzos a mediados del Terciario (Coney, 1971).

El depósito de óxidos de plata de Colquipucro se encuentra principalmente en la Formación Goyllarisquiza de areniscas de cuarzo del Cretácico, situada inmediatamente sobre las calizas del Grupo Pucará. La minería histórica de la zona se centró en una serie de en-echelon orientadas este-oeste, con fallas y venas acusadas hacia el norte. En 2006, el mapeo y muestreo de Tinka mostró mineralizaciones de baja ley en fracturas estrechas entre las vetas de alta ley. El depósito se modelizó con vistas a incluir diez zonas de alta ley con buzamiento norte, una zona basal de buzamiento leve, y un halo de baja ley que engloba las zonas de ley alta. En general, el depósito se compone de 550 metros en dirección norte-sur y 380 m en dirección este-oeste, con un grosor de 75 metros.

La mineralización de plata se sitúa en areniscas y se encuentra junto con abundantes óxidos de hierro (goetita, jarosita) y de manganeso en fracturas y diseminaciones de los espacios de poro de la arenisca.

Rodeando al depósito de Colquipucro, la compañía Tinka identificó un grupo de áreas con potencial de exploración de cara a futuros proyectos mineros, conocidas como Chaucha, Valley, Yanapizgo, Pucarumi y Tambillo. Fuera de las zonas ricas en zinc y estaño del depósito de Ayawilca (sureste de Colquipucro) se encontraron varias anomalías magnéticas que, junto con el depósito de plata de Colquipucro, se consideran objetivos de alta prioridad de exploración.



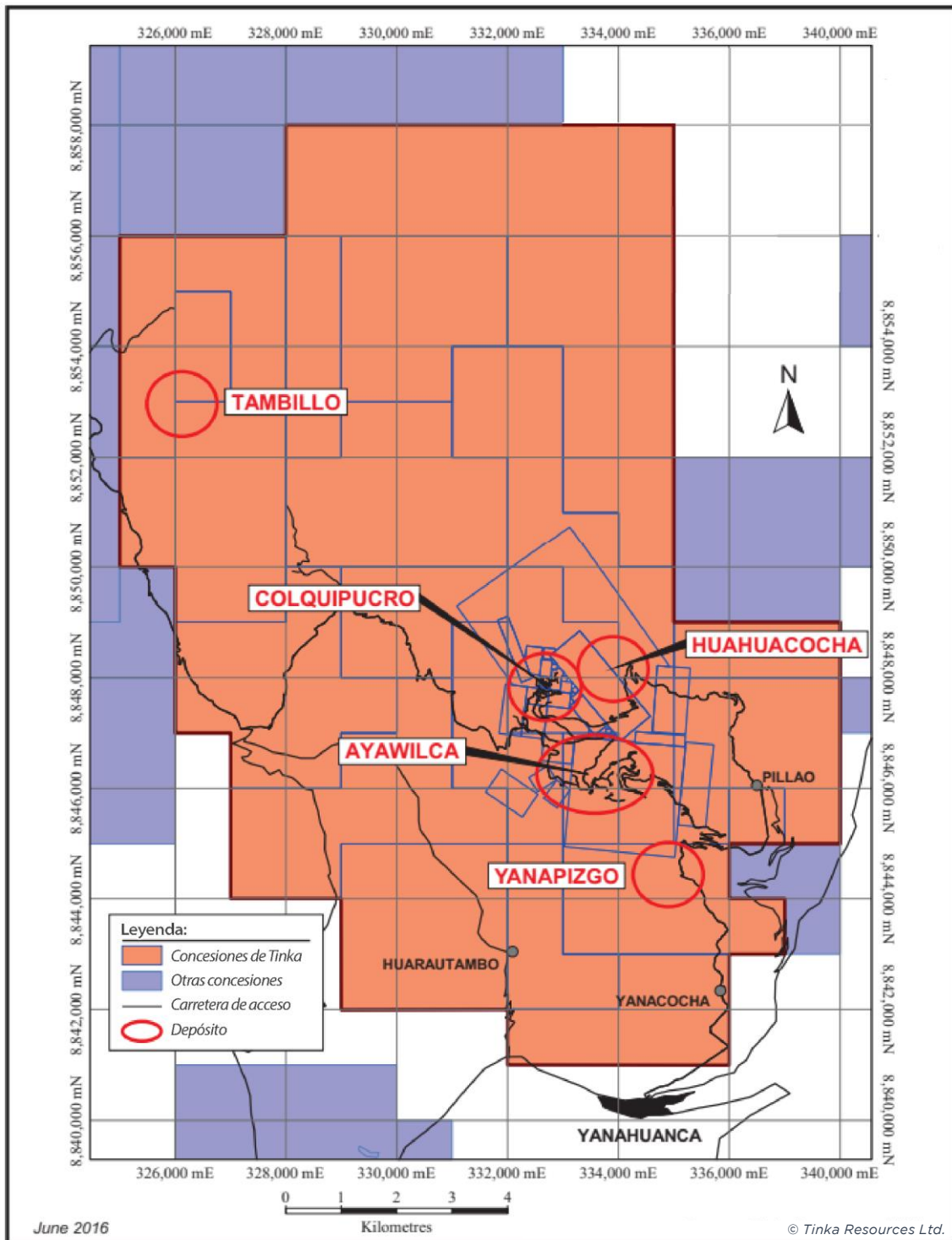


Figura 11. Registro catastral minero del área circundante al depósito Colquipucro

La meteorización en Colquipucro es notable. Las pruebas metalúrgicas preliminares indican que la mineralización es susceptible de métodos de recuperación basados en lixiviación. Colquipucro es el único depósito conocido y documentado de óxidos de plata de Perú. En un principio, se clasificó a



Colquipucro como un depósito diseminado, de sulfuración epitermal intermedia (hoy en día oxidado) que yace sobre el margen del depósito rico en sulfuros.

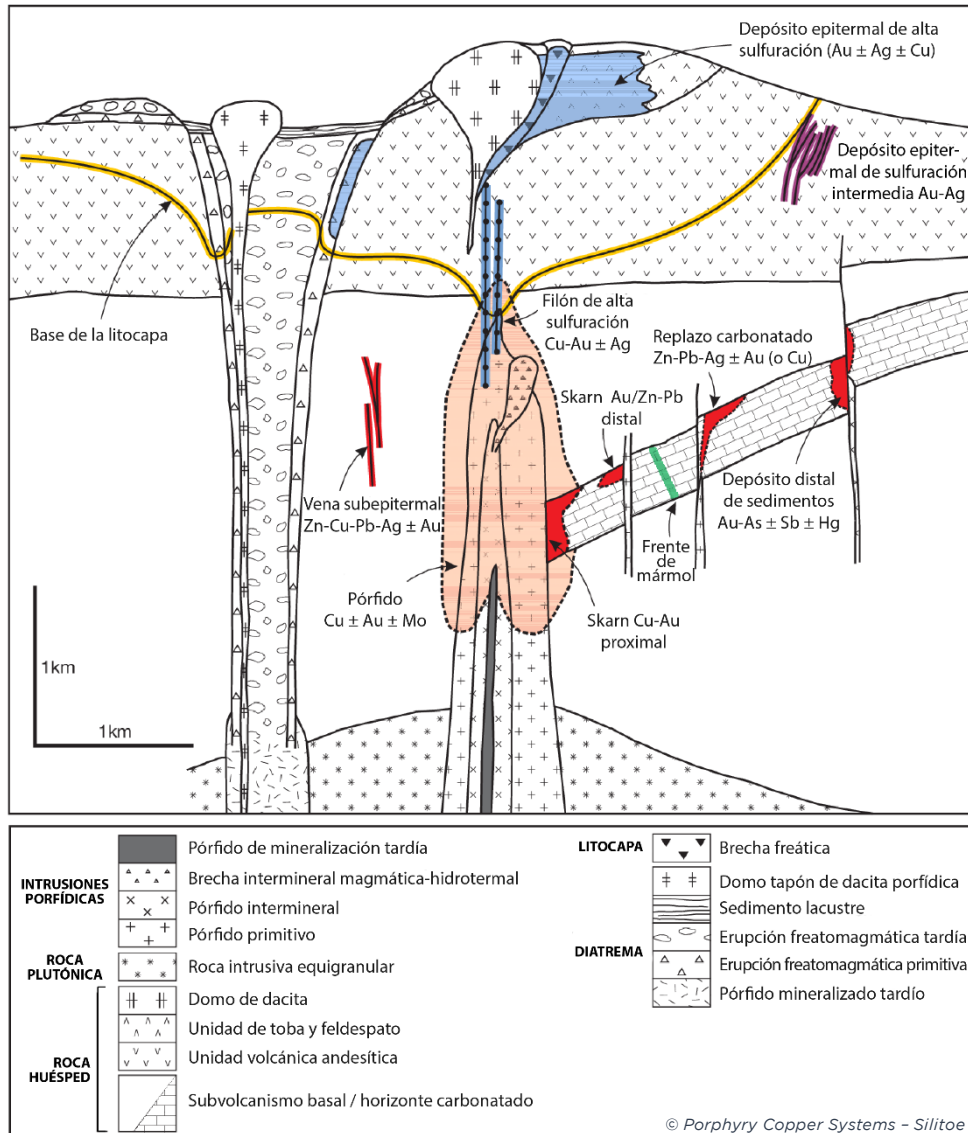


Figura 12. Anatomía de un pórfido cuprífero

Como se muestra en la *figura 12* (modificado de Silitoe, 1995b, 199b, 2000, en la versión original de 2010), la anatomía de un pórfido cuprífero muestra interrelaciones espaciales de un pórfido central de $\text{Cu} \pm \text{Au} \pm \text{Mo}$ en un pórfido multifase y la roca huésped inmediata; un skarn periférico, proximal y distal, una unidad carbonatada y venas subepitermales en rocas no carbonatadas; y depósitos epitermales suprayacentes e intermedios de alta y media sulfuración dentro y a lo largo del entorno de la litocapa. La leyenda, a su vez, explica la secuencia temporal de cada tipo de roca, con el stock de pórfidos precediendo una maar-diatrema, que se superpone a la litocapa y a la brecha freática.

Únicamente y de forma poco común, los sistemas individuales contienen algunos de los tipos de depósito ilustrados.



4.3. Estructura

Dos fallas sub-paralelas con tendencia norte-noroeste cortan el área del proyecto. La situada más al oeste de las dos es la falla de Colquipucro, que produjo la intrusión de rocas cretácicas sobre el basamento bien definido por el afloramiento de filita de la formación conocida como *Excelsior Formation* (Grupo Excélsior). Se interpreta que esta falla ha sido reactivada varias veces con movimientos normales e inversos, respectivamente. La falla sub-paralela situada aproximadamente 2 km al este de esta se conoce como Chaucha, y define el límite al este del basamento. Al este de la falla de Chaucha, la secuencia Pucará/Goyllar se pliega en un sinclinal tumbado. En el extremo este de este sinclinal, el Grupo Pucará es notablemente ancho (>500 m).

En los estudios preliminares de la zona a través de sondeos se han registrado varios cabalgamientos de buzamiento bajo hacia el este. Una zona principal de cizalladura de bajo buzamiento define el límite entre las rocas carbonatada de Pucará y el Grupo Excélsior. A el sur y el oeste del terreno en propiedad de Tinka (catastro minero) se observan varias capas sometidas a fuerzas de empuje que han hecho disminuir el grosor de la secuencia Pucará/Goyllar, llegando, en algunas zonas, a producir la repetición de la secuencia. Se cree que estas fallas en cabalgadura han sido, en parte, las chimeneas que permitieron la formación de las mineralizaciones de zinc de las zonas al sur de Colquipucro.

Las fallas con tendencia nordeste cortan los sistemas de fallas con orientaciones noroeste, y generalmente se alinean con la tendencia de la mineralización de Ayawilca (depósito al sur de Colquipucro). Se han interpretado fallas con tendencia nordeste a través de imágenes satelitales y drones, identificándolas particularmente al sur del depósito de Ayawilca. Se estima que, tanto las fallas nordeste como las fallas de bajo buzamiento han sido importantes afluentes para las mineralizaciones de esta zona.

La secuencia sedimentaria se presenta en un pliegue anticlinal y asimétrico al lado del extremo oeste del bloque basal citado anteriormente. El eje del pliegue es aproximadamente paralelo a la traza de la falla de Colquipucro, con el extremo oeste presentando buzamientos escalonados hacia el oeste mientras que el extremo este tiene bajos buzamientos (5 – 10°) hacia el sudeste.



4.4. Oxidación

La oxidación por aguas ácidas, ocasionada por la ruptura de los sulfuros causó meteorizaciones profundas en el depósito de Colquipucro, llegando hasta los 150 metros de profundidad. Justo al norte del depósito de Colquipucro, por ejemplo, se observan afloramientos de la zona Clinker, compuesta por gossan ferruginoso de colores marrones y negros, ferruginoso y con contenido en manganeso, bajo el arenisca que podría haber sido originalmente un sulfuro en las calizas.



4.5. Modelos geológicos

Para la modelización del yacimiento, se establecieron previamente varios modelos de diferente mineralización, con diferentes leyes, en vista a los resultados de los sondeos ejecutados en la concesión. La empresa subsidiaria fue la encargada de interpretar y ejecutar esta información, construyendo modelos usando una ley de corte nominal de 15 g/t de plata, con una longitud mínima de testigo de 2 metros para la toma de datos. Para los lentejones de alta mineralización de plata que posteriormente se podrán visualizar (figura 13), la ley mínima establecida fue de 60 g/t.

En total, se modelizaron 13 zonas mineralizadas; tratándose 11 de ellas de lentejones de alta ley en plata, y dos zonas de baja mineralización (zona basal y halo de baja ley). En total, y como se puede observar en las coordenadas de los diferentes mapas expuestos, la zona posee dimensiones alrededor de los 550 metros en dirección norte-sur, por 380 m en la dirección este-oeste, con una profundidad aproximada de 75 metros.

La mineralización se localiza a cotas entre los 4160 y los 4360 metros de altitud. Los modelos geológicos creados incluyen litologías pertenecientes a las areniscas del grupo Goyllar, la Formación Pucará, los materiales coluviales y la Formación Excelsior. El dominio coluvial se incluyó en el halo de baja ley ya que contienen, normalmente, materiales mineralizados. Los dominios/lentejones con los que se trabajará en Surpac a la hora de modelizar la formación incluyen:

- Ocho lentejones similares de alta ley, nombrados de 102 a 109, localizados hacia el borde sur de la zona mineralizada. El buzamiento es de 35 - 45° hacia el norte. Todos poseen dimensiones comunes de 200 metros de longitud y 100 m de profundidad, con grosores variantes entre los 2 y los 20 metros, con una media de 6 m.

En conjunto, las ocho zonas se encuentran intersecadas por 17 sondeos. La totalidad de este grupo de lentejones se encuentran en las areniscas de Goyllar.

- El dominio 110 se encuentra inmediatamente al norte del dominio 105 y también se encuentra en el grupo de areniscas de Goyllar. Se trata de una



formación con un buzamiento superficial, cuyas medidas son 150 metros de largo por 100 metros de profundidad, con una anchura de 30 metros. Este dominio se encuentra intersecado por siete sondeos.

- El dominio 111 es una formación horizontal, gruesa y de alta ley, situada en el borde norte de la zona. Mide 160 metros de norte a sur, y 60 m de este a oeste, con un grosor medio de 40 metros, y también se localiza dentro del grupo de areniscas de Goyllar.

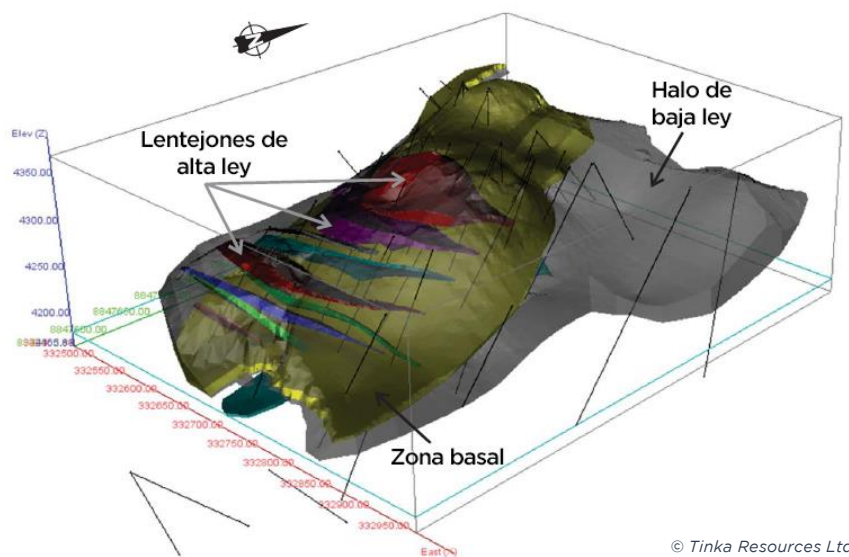
Este dominio es intersecado por siete sondeos.

- El dominio 101, con buzamiento superficial, se trata de una zona basal de alta ley, situada junto al fondo de las areniscas de Goyllar. Mide 500 metros en dirección norte sur, por 300 metros en dirección este oeste, con rangos de 2 a 20 metros de grosor, en 7 metros de media.

Se encuentra intersecado por 39 sondeos, debido a que abarca una amplia zona del área de sondeos.

- El dominio 50 es un gran halo de baja ley, que se supone situado rodeando los dominios de alta ley. Mide 550 metros en dirección norte sur, por 380 metros en la dirección este oeste, con un grosor de 75 m. la mayoría de su volumen se sitúa dentro de las areniscas de Goyllar; sin embargo, se extiende bajo la Formación Pucará hacia su mitad este.

- El dominio 51 se trata de una formación de baja ley con buzamiento superficial localizada en su totalidad en las rocas carbonatadas de la Formación Pucará.



© Tinka Resources Ltd.

Figura 13. Mineralización según leyes de Colquipucro

CAPÍTULO 5. TOPOGRAFÍA

Situada a 4380 metros sobre el nivel del mar, Cerro de Pasco, capital del departamento sobre el que yace el depósito Colquipucro, se sitúa entre las 20 ciudades más altas del planeta.

San Pedro de Pillao, la localidad más cercana al depósito se encuentra a 3629 metros de altitud, en plena cordillera de los Andes. La zona del depósito se encuentra entre los 4000 y los 4380 metros de altitud. Como se puede observar, el hecho de situarse en la cordillera andina hace que las cotas varíen notablemente a lo largo del terreno.

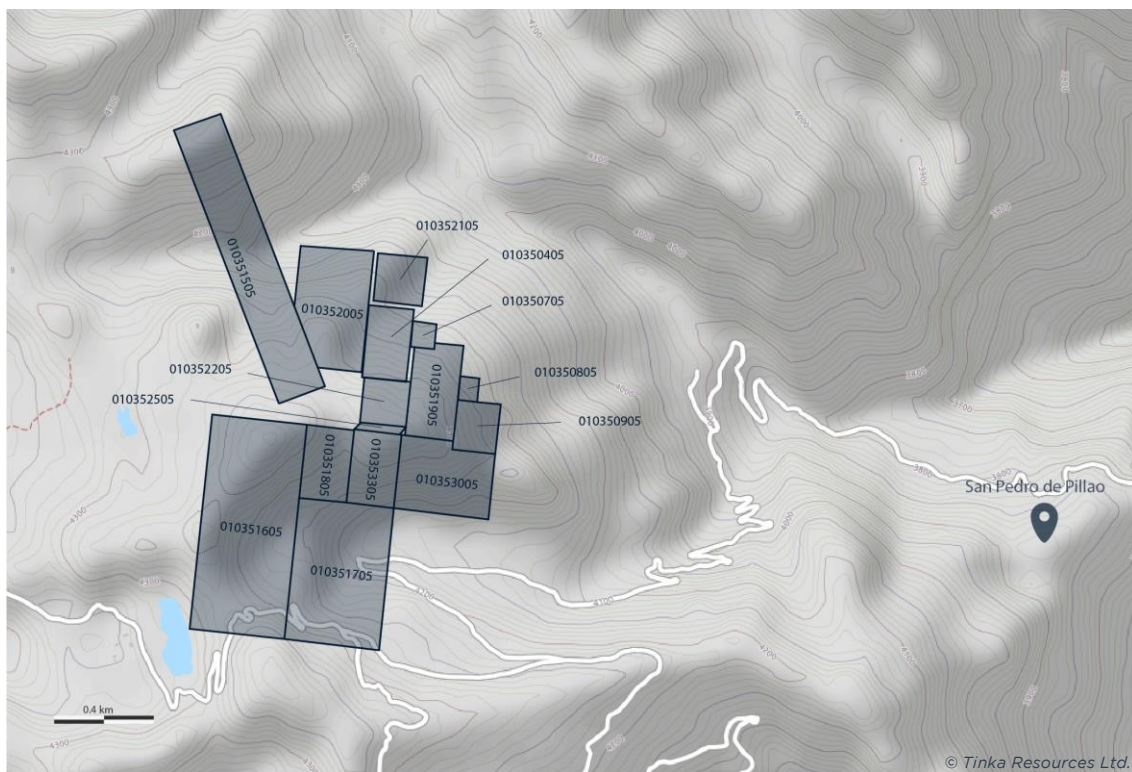


Figura 14. Mapa topográfico de la zona con registro catastral de Colquipucro

Las concesiones sobre el terreno se sitúan al oeste de San Pedro Pillao, como se muestra en los siguientes mapas. En primer lugar, se observará el mapa topográfico, con las cotas de las zonas de interés. A continuación, una ortofoto con el mallado correspondiente al catastro minero, y en último lugar, la tabla que posee el listado de la totalidad de estas concesiones en posesión de Tinka para la exploración y explotación mineral.

CAPÍTULO 6. MINERÍA DE PLATA

6.1. Plata

Según Fowler, B. y Nordberg, G., (1986), la plata es un elemento químico, de símbolo Ag (procede del latín: argentum, “blanco o “brillante”) con número atómico 47 y de masa atómica 107.870. Se trata de un metal lustroso de color blanco-grisáceo, de naturaleza dúctil. Algunos componentes de la plata son extremadamente fotosensibles, estables en aire y agua, excepto cuando son expuestos a sulfuros, donde pierden con facilidad su brillo característico.

La plata metálica es insoluble en agua, pero muchas sales de plata, como el nitrato de plata (AgNO_3) son solubles. En el entorno natural, la plata aparece fundamentalmente en forma de sulfato (Ag_2S) o íntimamente asociada con otros sulfuros metálicos; especialmente de plomo, cobre, hierro y oro, los cuales son prácticamente insolubles. La fase coloidal, compuesta de materiales orgánicos e inorgánicos, es el componente más importante de la plata acuosa.

El ion monovalente de plata (Ag^+) raramente se encuentra en el entorno natural. Asimismo, la plata forma compuestos fácilmente con antimonio, arsénico, selenio y telurio. Posee dos isótopos estables (^{107}Ag y ^{109}Ag), y 20 radioisótopos; de los cuales ninguno de ellos se forma de forma natural. Varios compuestos de plata poseen un notable peligro de explosión, como el oxalato de plata ($\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$), que se degrada y explota al calentarse, o el acetiluro de plata (Ag_2C_2), que detona espontáneamente bajo ciertas circunstancias.

Desde el punto de vista químico, es uno de los metales pesados y nobles, desde el punto de vista comercial, se trata de un metal precioso. Existen 25 isótopos de la plata. Sus masas atómicas van de 102 a 117.

En la mayoría de sus usos (tres cuartas partes) se emplea como aleación con uno o varios metales más. Suele encontrarse en la naturaleza como elemento libre (plata nativa) o en conjunto con otros metales (mena). Los principales minerales de plata son la argentita, la cerargirita o cuerno de plata y varios minerales en los que el sulfuro de plata está combinado con los sulfuros de otros metales. Para separar la plata cuando se tiene argentita, se emplea la reducción de cianuro o zinc, o procesos electrolíticos.



Normalmente se recupera como subproducto procedente de la fundición de menas de níquel en Canadá, de menas de zinc-plomo, o pórfidos cupríferos en EE. UU., y de depósitos de platino y oro en Sudáfrica. Alrededor de un 12 – 14 % de la producción de plata doméstica procede de recuperación en mena de plomo, y sobre un 4 % de mena de zinc. Una de las fuentes secundarias para la obtención de plata es la chatarra remanente de la producción de productos que contienen este elemento; monedas y lingotes, así como chatarra antigua de componentes electrónicos, de láminas y productos de fotografía antigua, baterías, joyería, cubertería y rodamientos, entre otros.

Las emisiones de las operaciones de fundición, procesado y vertidos, quema de carbón y siembra de nubes (generación de estas de forma antropogénica, mediante la emisión a la atmósfera de yoduro de plata) son algunas de las fuentes principales de la presencia antropogénica de plata en la biosfera. Las repercusiones de la emisión de yoduros de plata (AgI) a la atmósfera para la generación de nubes no siempre se traduce en precipitaciones regionales, sino que, en ocasiones, se han detectado trazas residuales de plata cientos de kilómetros a sotavento del foco de la emisión.

La plata pura es un metal moderadamente suave (2.5-3 en la escala Mohs), de color blanco, y un poco más duro que el oro. Al pulirse, adquiere un lustre brillante, llegando a reflejar el 95 % de la luz que incide sobre ella. Su densidad es 10.5 veces la del agua. La plata comercial posee una pureza del 999 (ley 0.999).

Aunque la plata es el metal noble más activo químicamente, no es muy activa comparada con la mayor parte de los otros metales. No se oxida fácilmente, pero reacciona con el azufre o con el sulfuro de hidrógeno para formar la plata deslustrada. El galvanizado de la plata con rodio puede prevenir esta decoloración. La plata no reacciona con ácidos diluidos no oxidantes (ácidos clorhídricos o sulfúrico) ni con bases fuertes (hidróxido de sodio). Sin embargo, los ácidos oxidantes (ácido nítrico o ácido sulfúrico concentrado) la disuelven al reaccionar para formar el ion positivo de la plata, Ag^+ . Este ion, que está presente en todas las soluciones simples de compuestos de plata solubles, se reduce fácilmente a metal libre, como sucede en la deposición de espejos de plata por agentes reductores orgánicos. La plata casi siempre es monovalente



en sus compuestos, pero se conocen óxidos, fluoruro y sulfuro divalentes. Algunos compuestos de coordinación de la plata contienen plata divalente y trivalente. Aunque la plata no se oxida cuando se calienta, puede ser oxidada química o electrolíticamente para formar óxido o peróxido de plata, un agente oxidante poderoso. Por esta actividad, se utiliza mucho como catalizador oxidante en la producción de ciertos materiales orgánicos.

La mayoría de la plata que se emite al medio ambiente penetra en ecosistemas terrestres, donde se ve inmovilizada, formando nuevos minerales, metales o aleaciones (Smith, I., Carson, B., 1977).

La plata lleva destinándose a uso ornamental y utensilios desde hace más de 5000 años, y como metal precioso, medio monetario o base de riqueza desde hace más de 2000.

Gracias a sus propiedades bacteriostáticas, los componentes de plata se usan en filtros y otros equipamientos para la purificación de agua de piscinas o de consumo personal, y en el procesado de comidas, medicamentos y bebidas.

El nitrato de plata lleva usándose durante muchos años como colirio para la prevención de la conjuntivitis neonatal. También se han usado varios fármacos con contenidos variables en plata para tratar quemaduras en piel o membranas mucosas de pacientes y para combatir úlceras. Algunas medicinas orales que llevan plata son las pastillas antitabaco, que contienen acetato de plata ($\text{AgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$), pastillas para el aliento recubiertas de plata y soluciones de nitrato de plata para tratar enfermedades periodontales. Estos usos, tanto externos en la piel como internos, han ido cayendo en la obsolescencia esta última década, debido al miedo a la argiria o al desarrollo de sulfonamida y microbios antibióticos.



6.2. Minería de plata en el mundo – Registro de las minas más grandes

- Peñasquito, México

Peñasquito, situada en el noreste del estado de Zacatecas, es la mayor mina de plata del mundo en reservas. Las reservas probadas, a diciembre de 2012 se situaban en 911.8 millones de onzas (Moz). La plata producto de planta de concentrado se situaba en 869.52 Moz mientras que la procedente de lixiviación en vertedero fue de 42.28 Moz.

La mina polimetálica, con reservas de oro, plata, zinc y plomo es propiedad y bajo operación de Goldcorp. La mina comenzó su producción comercial en el año 2010. Consiste en dos cortas, llamadas Peñasco y Chile Colorado, que en conjunto se sitúan como la mayor



Figura 15. Mina de Peñasquito (México)

explotación a cielo abierto de México. La capacidad de procesado de mena se sitúa en 130000 toneladas diarias. Se estimó una producción de 20 Moz para el año 2013, y una continuación progresiva de hasta 22 años.

- Polkowice-Sieroszowice, Polonia

La mina de Polkowice-Sieroszowice, situada en el Cinturón de Cobre de Polonia, es la segunda mina de plata más grande del mundo. La mina, con producción de cobre y plata, propiedad y bajo operación de la empresa estatal KGHM, produjo más de 14 Moz de plata en 2012. Las reservas probadas se estiman en 545 Moz (diciembre de 2011).

Se trata de una mina subterránea que extrae la mena por perforación y voladura de los depósitos de Polowice, Sierosowice y Radwanice. La mena extraída se procesa en la planta Polkowice-Sierosowice desde el año 1996. Las reservas

totales de la mina ascienden a 775 moz, incluyendo el cupo de reservas en el depósito Deep Glogów, localizado al lado de esta mina. Los planes de KGHM son la extracción del 50 % de Deep Glogów a través de la operación de Polkowice-Sierosowice.



Figura 16. Mina de Polkowice-Sierosowice (Polonia)

- San Cristóbal, Bolivia

La mina de San Cristóbal, con producción de plata, plomo y zinc, y localizada 500 km al sur de La Paz, contiene unas reservas de 533.38 Moz de plata (diciembre 2011), haciéndola la tercera mayor mina de plata del mundo. Se encuentra en propiedad y operación de la empresa Minera San Cristóbal (MSC), subsidiaria de la empresa japonesa Sumitomo Corporation.

San Cristóbal es una corta en operación que extrae mena del mineral de los depósitos de Jayula, Tesorera y Animas, en el suroeste del cinturón de plata-zinc de Bolivia. La mena extraída se transporta por medio de camiones a la planta de trituración primaria



Figura 17. Mina de San Cristóbal (Bolivia)

la planta de concentrado, con un rendimiento de 40000 toneladas diarias. La producción anual total (plata, plomo y zinc) puede llegar a las 600000 toneladas.

- Pitarrilla, México

La mina de Pitarrilla se encuentra en el Estado de Durango, México. Las reservas probables de plata en diciembre de 2012 se establecían en 478.7 Moz. El estudio de viabilidad para el proyecto de minería de plata se completó en diciembre de 2012. Sin embargo, la decisión de cuando comenzar las operaciones seguía pendiente en noviembre de 2013. La compañía con sede en Vancouver Silver Standard es la dueña de la Mina Pitarrilla.

Los costes totales de construcción de la mina se estiman en 741 millones de dólares. El desarrollo incluye una corta optimizada para el uso de excavadoras de cables y dumperes mineros. Para el tratamiento de la mena se emplearán los métodos de flotación y lixiviación. Se espera que la mina llegue a producir 15 Moz de plata anuales durante los primeros 18 años de producción. La vida estimada de la mina es de 32 años.

- Lubin, Polonia

La mina de Lubin, situada 247 km al suroeste de Varsovia, se sitúa como la quinta mayor mina de plata del mundo. Se estima que contiene 442.4 Moz de plata, incluyendo 254.8 Moz de reservas probadas y 187.6 Moz probables en diciembre de 2011. La mina, de plata y cobre, es una de las tres minas propiedad y bajo operación de KGHM en la cuenca cuprífera Legnica-Glogow de Polonia.



Figura 18. Mina Lubin (Polonia)

La mina Lubin ha estado en funcionamiento y operación desde 1968. Se trata de una mina subterránea que extrae mena mineralizada del depósito Lubin-Malomice, descubierto en 1957. Se compone de nueve áreas de labores a una profundidad de 610 a 850 m. Para la extracción del mineral se emplea el método de cámaras y pilares con relleno hidráulico. La mena se envía a las plantas de concentrado. La mina produce aproximadamente 13 Moz de plata anuales.

- Rudna, Polonia

Rudna, otra mina propiedad de KGHM en el cinturón de cobre Legnica-Glogow, se sitúa en el sexto puesto de las mayores minas de plata del mundo. Se estimaron unas reservas de plata de 357 Moz en esta mina de cobre y plata, incluyendo 242.8 Moz probadas y 114.2 Moz probables (diciembre de 2011). Ha estado en funcionamiento desde 1974 y produjo más de 21 Moz de plata en 2011.

La mina extrae la plata del depósito Rudna. Se trata de una mina subterránea compuesta de 11 pozos y 13 áreas de explotación con profundidades de 950 a 1150 metros. Emplea el método de cámaras y pilares con relleno hidráulico. La mena extraída se envía al Concentrador Rudna para su procesado y concentración. KGHM planea explotar la mitad del depósito adyacente de Deep Glogow a partir de Rudna. Las reservas de Rudna y el 50 % de Deep Glogow, en conjunto, son de 587 Moz, constituyendo la tercera mayor mina de plata del mundo.



Figura 19. Mina Rudna (Polonia)

- Gumuskoy, Turquía

La mina de plata de Gumuskoy, localizada en la provincia de Kutahya, en el este de Turquía, ocupa la octava posición de las minas de plata más grandes del



mundo en reservas. La mina, también conocida como la mina de plata de Eti Gumus, se estima que contine alrededor de 335 Moz de plata (con 100 Mt con una ley de 95 g/t).

La mina es propiedad y se encuentra en operación bajo la empresa estatal turca Eti Mine Works. La mena extraída se envía a la plata de concentrado Gumuskoy, con un rendimiento de 12 Mt anuales. La mina produjo 11.2 Moz de plata en 2010. El metal se produce en forma de lingotes y granallado en la planta Gumuskoy.

- Fresnillo, México

La mina Fresnillo, situada 60 km al noroeste de Zacatecas en México, es actualmente la octava mayor mina de plata del mundo. Se estima que contiene 308.47 Moz de plata, incluyendo 78.81 Moz de reservas probadas, y 229.65 Moz probables en diciembre de 2012. Históricamente, se llevaron a cabo operaciones mineras en la zona mineralizada en el año 1554.

Las operaciones de minería modernas incluyen una mina subterránea y una planta de flotación. La capacidad de molienda del complejo es de 8000 toneladas diarias. También se considera a Fresnillo como la



Figura 20. Mina Fresnillo (México)

mayor mina de producción primaria de plata. Se produjeron 6224 Moz de plata y 29.573 Moz de oro en 2012. La vida de la mina Fresnillo se estima de 12 años.

- Antamina, Perú

La mina Antamina, novena más grande en extracción de plata del mundo, se localiza a 200 km de la ciudad de Huaraz, en los Andes. La mina, aunque de cobre y zinc, produce plomo y plata como subproductos. Las reservas probadas y probables en diciembre de 2012 fueron de 285.7 Moz. La Compañía Minera

Antamina, empresa conjunta de BHP Billiton (33.75 %), Xstrata (33.75 %), Teck (22.5 %) y Mitsubishi Corporation (10 %), es la propietaria de la mina y se encarga de llevar a cabo la operación minera.

Antamina comenzó su producción comercial en 2001. Incluye una corta, en la que trabajan excavadoras de cables y dumperes mineros. La mena extraída se envía para su procesado a la planta concentradora en el Campamento Yanacancha. La capacidad de molienda de la planta se incrementó a 130000 toneladas diarias en 2011. La mina había producido 11.7 Moz de plata al final del año financiero en junio de 2013. Se estima una vida de la mina de 14 años.



Figura 21. Mina Antamina (Perú)

- Cannington, Australia

La mina de Cannington, al noroeste de Queensland, se sitúa como la décima mayor mina de plata del mundo en reservas. La reservas de plata de la mina, de explotación subterránea, se estimaron en 217.9 Moz en



Figura 22. Jumbo operando en la mina Cannington (Australia)

junio de 2013. Incluyen 193.23 Moz probadas y 24.7 probables.

La mina, operada y en propiedad de BHP Billiton, fue descubierta en 1990. La producción comercial comenzó en 1997. Cannington también produce plomo y zinc.

La mena de sulfuro extraída de la mina subterránea se envía a una planta adyacente donde los concentrados de plata, el plomo y el zinc son extraídos. La mina produjo 213.4 t de plomo y 56.3 t de zinc en el año 2013. La vida de la mina Connington se estima en 11 años.

Recuperado de <https://www.mining-technology.com>



6.3. Métodos de procesamiento

Según los estudios realizados por la empresa subsidiaria Tinka Resources Ltd., atendiendo a las leyes que se presentan en la mineralización Colquipucro, se estima que los procesos metalúrgicos óptimos a llevar a cabo para su tratamiento serían la lixiviación en pilas (*heap leaching – HL*) y la lixiviación por agitación con cianuro (*mill*).

Se proponen dos métodos diferentes, dado que este método de tratamiento, comúnmente utilizado en minería, es más versátil y permite tratar menas de diferentes leyes. De este modo, en el estudio de optimización, realizado con RecMin, que se mostrará en las páginas consiguientes, se implementarán ambos tratamientos a la hora de analizar la evolución de la mina atendiendo a diferentes escenarios económicos y de mercado.

De este modo, y atendiendo a los estudios previamente mencionados, realizados por Tinka, se estimará una alta ley por encima de 60 g/t, que será tratada por el método de agitación con cianuro (*mill*), con una recuperación del 80 %. Por el contrario, ante menas con leyes inferiores a 60 g/t, el tratamiento será el de lixiviación en pilas (*HL*), con una recuperación establecida del 50 %.

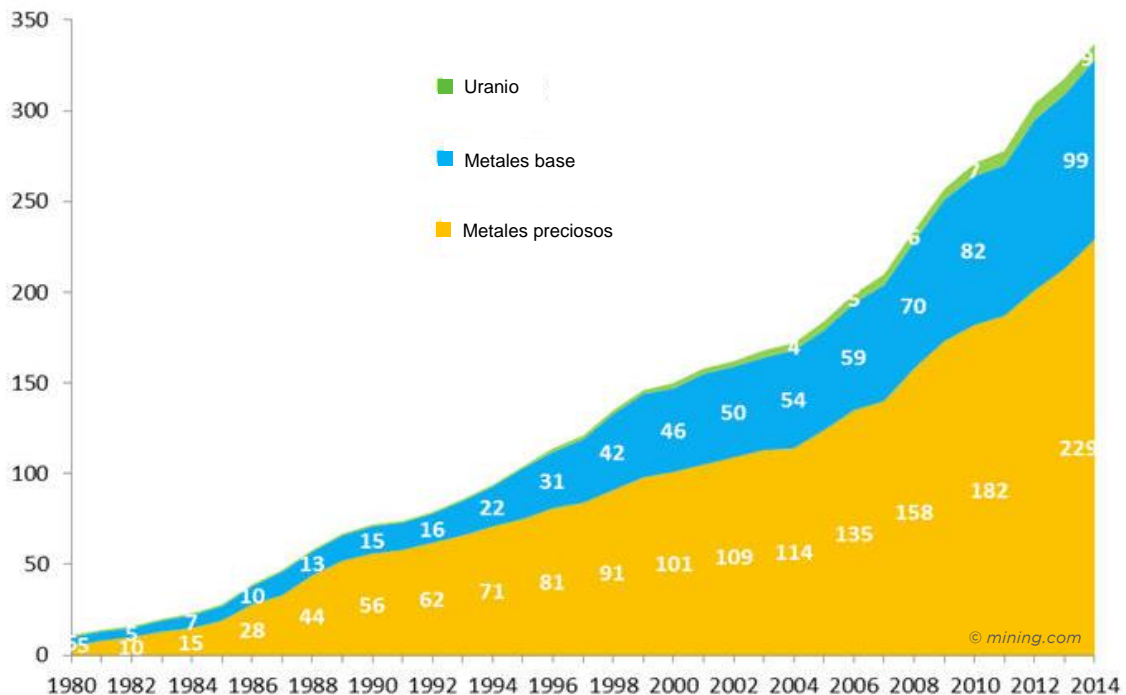


Figura 23. Tendencia en el uso de la lixiviación desde los años 80



6.3.1. Lixiviación en pilas (*heap leaching – HL*)

La lixiviación en pilas se trata de un método hidrometalúrgico, utilizado principalmente en el procesamiento del cobre. El método consiste en el apilado de la mena, formando pilas que suelen superar los 7 metros de altura, con superficies entre 0.1 y 1 km².

El elemento que conforma la solución lixivante, con altas presencias en ácido sulfúrico (H₂SO₄), es aplicado sobre la superficie de la pila, donde se produce la percolación a través del lecho mineral poroso, disolviendo el mineral de interés, y llevando a la producción de una solución enriquecida del mismo, que es recogida uniformemente en una superficie ligeramente inclinada e impermeable, que se encargará de conducir el fluido hacia una serie de tuberías que lo llevarán hasta la balsa de soluciones ricas, y posteriormente, a los circuitos de extracción por solventes.

Las principales ventajas y desventajas de este método, frente a otros similares empleados en el enriquecimiento de este tipo de metales son los siguientes:

Ventajas	Desventajas
Bajo capital y costes de operación	Largos ciclos de lixiviación y retención de soluciones
Puede usarse en leyes más bajas, ganga y pequeños yacimientos	Menores recuperaciones que los procesos con molienda previa (flotación) – molienda (lixiviación)
La ausencia de etapas de separación sólido – líquido permite operar a contracorriente	Extensos programas de pruebas de pilotaje
Puede alcanzarse el contenido metálico deseado mediante recirculación de soluciones en las pilas	Largos ciclos de lixiviación y retención de soluciones
Simplicidad de equipos y operación	Impactos económicos y ambientales de largo plazo
Tiempos de arranque breves	Posibles emisiones al medio ambiente de sustancias nocivas empleadas en las soluciones
Regulaciones ambientales menos intensivas	

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas



En el proceso de lixiviación en pilas, existen ciertas variables de las que puede depender el grado de extracción, como pueden ser cambios físicos, químicos y biológicos que tengan lugar en el lecho mineral bajo irrigación. Las principales variables involucradas en la correcta lixiviación de la mena son las siguientes:

- **Tamaño de partícula.** El tamaño y la forma son factores que determinan el área superficial del que se compone una partícula. Las reacciones que tienen lugar durante la disolución del mineral son de carácter heterogéneas, donde la velocidad de reacción es dependiente del área interfacial de los materiales. Debido a esto, la cinética de lixiviación es afectada por el tamaño de partículas del mineral, donde un tamaño de partícula inferior producirá una disolución rápida, debido a que puede que se produzcan reacciones galvánicas que aceleren la velocidad de disolución.
- **Concentración de ácido en la solución lixivante.** Optimizar la concentración de ácido será un ejercicio importante en este método para disminuir su consumo, dado que se trata del reactivo más caro de los agentes empleados. Si la concentración en ácido es inferior a la óptima, se comprometerá la recuperación del metal de interés, mientras que un alto uso de ácido en las soluciones llevará a alcanzar mayores recuperaciones.
- **Flujo específico de soluciones.** El flujo de solución lixivante determinará la velocidad de transporte de los reactivos y de los productos hacia la pila y desde ella. Usualmente, este flujo puede variar entre los 5 y los 30 l/m², dependiendo del tamaño de partícula y la altura de la pila. Normalmente, la combinación del flujo específico y la altura de la pila se optimizarán, para que las soluciones ricas no se diluyan.
- **Altura de pila.** La altura de las pilas que contengan la mena se verá afectada en función de la permeabilidad (líquida en el caso de los óxidos y gaseosa en el caso de los sulfuros, debido a la necesidad de oxígeno). La presencia de arcillas (bentonita), la formación de precipitados y el exceso de finos puede llevar a una disminución de la permeabilidad, dando lugar a posibles canalizaciones de flujo preferencial y una eventual acumulación de soluciones en la superficie, restringiendo el acceso



uniforme de ácido y aire. Por norma general, no se suelen superar alturas de 8 metros por cada nueva capa apilada de mena a tratar.

- Tiempo de lixiviación. Los ciclos de lixiviación pueden variar en función de la mineralogía de la mena; para óxidos se usan entre 30 y 60 días, para sulfuros depende en gran medida de la granulometría y la mineralogía. Por ejemplo, los sulfuros secundarios precisan de entre 6 y 9 meses, mientras que aquellos a los que únicamente se les aplicó molienda primaria (trituradoras de mandíbulas), pueden necesitarse años. Existen casos extremos, de tratamientos de menas con presencia de calcopiritas, en que el ciclo puede llegar a durar 10 años.
- Consumo de agua. Normalmente se requiere de poca agua para la puesta en funcionamiento de este método de enriquecimiento. En el caso de la lixiviación en pilas se corresponde con la humedad residual del escombros restante que se deja de regar al término del proceso de lixiviación, y a las pérdidas de evaporación y arrastre físico con el viento. Lo habitual es que se requieran menos de 0.5 m³ de agua por tonelada de mena. En casos de escasez de agua, puede recurrirse al uso de goteros, haciendo que la cifra de consumo se reduzca en casi el 50 %, al minimizar pérdidas por evaporación y arrastre físico del viento.
- Influencia mineralógica en la lixiviación en pilas. Las propiedades de interés pueden clasificarse en dos grupos principales; aquellas relacionadas con la naturaleza química del mineral (velocidad de disolución, consumo de reactivos), y las relacionadas con la estructura mineralógica (estructura cristalográfica, imperfecciones, porosidad, entre otras).
- Velocidad de disolución. Las especies mineralógicas procedentes de cada sector de un yacimiento pueden presentar diferencias notables en cuanto a la velocidad relativa de disolución. La velocidad de disolución podría clasificarse en grupos, como se muestra en la siguiente tabla:



Cinética relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales
Muy rápida (A temperatura ambiente)	Segundos a minutos <i>Disolución completa</i>	Carbonatos, sulfatos y cloruros
Rápida (Requiere mayor acidez)	Horas <i>Disolución completa</i>	Óxidos cúpricos y silicatos
Moderada Requiere un agente oxidante	Días a semanas <i>La disolución puede que no sea completa</i>	Cobre nativo, óxidos cuprosos y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso
Lenta Requiere un agente oxidante	Semanas a meses <i>La disolución puede no ser completa</i>	Sulfuros simples
Muy lenta Requiere un agente oxidante	Años <i>La disolución es incompleta</i>	Sulfuros complejos

Tabla 3. Velocidades de disolución en lixiviación en pilas

- Consumo de reactivos. Las especies minerales de la ganga presentan reactividades al ácido que dependen en gran medida de su composición. Es posible clasificar a la ganga según su reactividad en:
 - Ganga altamente reactiva: esta categoría incluye especies minerales carbonatadas que reaccionan con el ácido con rapidez.
 - Ganga medianamente reactiva: esta categoría significa la probable existencia de cantidades significativas de hornblenda, piroxenos y plagioclasa cálcica. Estas especies se disuelven relativamente rápido comparadas con otros silicatos, las soluciones van perdiendo el ácido contenido y su oxidante, es decir, aumenta el pH y disminuye el eH.
 - Ganga moderadamente reactiva: en esta categoría se encuentran la ortoclasa, la biotita, la albita y el cuarzo.
 - Ganga no reactiva: las areniscas cuarcíferas son casi inertes a las soluciones de lixiviación.
- Estructura cristalográfica. Dado que las superficies cristalinas no son del todo lisas, aun cuando son formadas bajo condiciones ideales de equilibrio, estas poseerán características micro-topográficas irregulares,



que originarán la presencia de superficies más reactivas y menos reactivas en el mineral. Para sistemas heterogéneos, las velocidades de reacción se relacionan tanto con la superficie total como con el número de sitios reactivos por unidad de área que están disponibles para la reacción.

- Imperfecciones mecánicas. La actividad bacteriana inicial en la superficie de los sulfuros minerales ocurre a lo largo de las grietas, fracturas, alineaciones, límites de grano y zonas de contacto del mineral. Las imperfecciones mecánicas son desviaciones de la estructura cristalográfica del sulfuro. Dichos defectos contienen normalmente grandes cantidades de tensión angular debido a los ángulos de enlace moleculares. La energía relacionada con la tensión del cristal puede ser usada por las bacterias durante los procesos de oxidación mineral.
- Distribución de granos minerales y superficies libres. Los granos minerales pueden clasificarse de acuerdo con su accesibilidad a las soluciones lixiviantes en cinco clases (A, B, C, D y E). los tipos D y E no contribuyen a la velocidad de disolución, al menos en las primeras etapas de la lixiviación, pero pueden llegar a ser importantes para el proceso, si como resultado del contacto prolongado con las soluciones de lixiviación, nuevos poros y fisuras son generados en la ganga, haciendo entonces accesible las soluciones de lixiviación.
- Porosidad. La velocidad de reacción de una partícula con un reactivo en la fase fluida, en la que se encuentra inmersa, es usualmente controlada por la difusión molecular a través de una capa límite del fluido o por la reacción en la superficie. Si la partícula contiene fracturas o agujeros abiertos al fluido, el reactivo se difunde hacia el interior de la partícula y termina reaccionando con un grano mineral, por lo tanto, el área sobre la cual la reacción toma lugar no es solo el área externa sino el área total incluyendo todos los poros abiertos, siendo la porosidad un factor importante en la velocidad de reacción mineral.
- Influencia del método de conminución. La distribución de fracturas en la partícula juega un papel importante en la exposición parcial de los granos minerales. Esto relaciona el comportamiento durante la lixiviación con el método de molienda aplicado. En el caso de las trituradoras de rodillos de alta presión (*high pressure grinding Rolls – HPGR*), se ha demostrado que



pueden llegar a ser de un 20 a un 50 % más eficientes en el uso de la energía que las trituradoras convencionales, llegando a obtener productos con mayor cantidad de fracturas en los límites de grano, dando un mejor acceso a las soluciones lixiviantes a llegar dentro de la partícula.

Las pilas de lixiviación pueden ser implementadas de dos formas:

- Pilas estáticas (*multi-lift*). Consisten en un apilamiento secuencial de un nivel inicial sobre una superficie impermeable y con cierto ángulo de inclinación. Una vez ese nivel se ha lixiviado, se procede a aplicar una nueva capa (nivel) de mena sobre el anterior. Cada nivel suele tener una altura entre los 5 y 8 metros, como se explicó con anterioridad, y la altura total de la pila final puede llegar a los 200 metros de altitud.



Figura 24. Proceso de lixiviación mediante pilas estáticas (*multi-lift*)

- Pilas dinámicas (*on/off*). El mineral se apila en un único nivel, de altura aproximada entre 7 y 8 metros, construidos sobre una superficie impermeable e inclinada. El material es extraído una vez ha sido lixiviado y se reemplaza por nuevo material para empezar el proceso de cero.



Figura 25. Proceso de lixiviación mediante pilas dinámicas (on/off)

- Apilamiento del mineral. El mineral es apilado progresivamente sobre la base impermeable a través de sistemas que varían de acuerdo con el tamaño de la instalación donde se realizan las labores mineras. En casos de operaciones menores (200 – 300 t/día) se usan camiones y apiladores de cinta. Para operaciones de mayores volúmenes (10000 – 50000 t/día) se emplean cintas modulares articuladas, que terminan en un apilador. En el caso de grandes operaciones mineras (75000 – 150000 t/día), se recurre a sistemas de apiladores sobre orugas alimentados con cintas transportadoras estacionarias y móviles. En pilas dinámicas es necesario remover el material ya lixiviado, por lo que normalmente se recurre a recolectores de gran tamaño como rotopalas.
- Aireación. A las pilas en proceso de lixiviación se les debe aplicar una correcta aireación, ya que la lixiviación requiere la presencia de agentes oxidantes, tales como el oxígeno. Esto se realiza a través de tuberías perforadas (normalmente plásticas), colocadas aproximadamente 1 metro por encima de la base de la pila, e introduciendo aire a baja presión a través de bombeo.
- Irrigación de la pila. La solución lixivante es suministrado a través de una red de tuberías distribuidas regularmente, con goteros o aspersores extendidos a lo largo de la superficie de la pila.
- Recolección de soluciones. El lixiviado acumulado en la base de la pila fluye por acción de la gravedad a través de tuberías plásticas de drenaje (10 cm de diámetro) hacia el foso de recolección de soluciones, que

conduce a la balsa de recolección, para ser posteriormente enviado al circuito de extracción por solventes, a través de bombeo o gravedad.

6.3.2. Método de lixiviación por agitación con cianuro (*mill*)

Se trata del método de lixiviación más comúnmente utilizado para extraer oro y plata de su mena. Esto puede atribuirse a su temprano desarrollo, en Sudáfrica (1890), y por sus altas tasas de recuperación (hasta un 80 % en el caso de Colquipucro, como se citó anteriormente). Además, este tipo de operación con el cianuro como agente lixivante, posee mayor eficiencia de laboreo que en el caso de utilización de cloro o bromo.

A través de este método, se obtendrá el producto final en forma de metal prácticamente puro. La base del proceso de cianuración se basa en el hecho de que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial por las partículas de oro metálico y plata que, sobre la mayoría de otros materiales, normalmente encontrados en menas de estos dos metales.

El cianuro es el término descriptivo generalmente aplicado al cianuro de sodio (NaCN). Cabe destacar que el radical del cianógeno (CN) realmente tiene el poder de la disolución, y la base alcalina del calcio, potasio o sodio dan una estabilidad química a los compuestos.

- Densidad de las soluciones de lixiviación. Para mantener la capacidad máxima y mínima pérdida del material valioso en solución, generalmente es aconsejable mantener la mayor densidad en los circuitos del molino. Debe tenerse en cuenta que, por cada tonelada de agua añadida al molino del circuito, una tonelada de agua deberá ser retirada para mantener el equilibrio. Esta solución que es descargada no solo contiene reactivos, como la cal y el cianuro, sino que también lleva consigo plata disuelta, aunque en cantidades ínfimas.

Cuanto mayor sea la densidad del alimento para el agitador, mayor será la capacidad del agitador.

- Aireación en el proceso de cianuración. Otro de los principales requisitos de un proceso de cianuración exitoso es el oxígeno. Dados los altos costes del oxígeno puro, en este tipo de procesos se utiliza normalmente aire atmosférico como fuente de oxígeno. Para una disolución eficiente,



es necesario que el aire entre en contacto físico con las partículas de plata- como estas partículas se encuentran generalmente muy distribuidas en la pulpa, las burbujas de aire deben estar completamente dispersas a lo largo de la misma.

- Agentes oxidantes. Pueden ser peróxido de sodio, permanganato de potasio o dióxido de manganeso. En algunas plantas, debido a los excesos de tonelaje, debe recurrirse a aireaciones secundarias, como puede ser al colocación de anillos de inyección de aire alrededor de los agitadores.
- Efecto del pH en la cianuración de oro y plata. Para reducir la cantidad de cianuro destruido, se agrega cal a la solución para mantener una “alcalinidad protectora”, normalmente entre 0.25 a 1 kg por cada tonelada de solución. La cal tiene un efecto de aceleramiento de la sedimentación de la pulpa en el espesador, además de favorecer la precipitación de determinadas sustancias indeseables.

Con el fin de que la cal pueda comenzar su acción protectora tan pronto como sea posible, habitualmente se añade junto con el mineral en las etapas previas de molienda, en estado seco o como leche de cal.

- Molienda y tamaño de partícula. Debe prestarse especial atención a este proceso, dado que puede llegar a conformar de un 40 a un 70 % de los costes totales del procesamiento.

La molienda se realiza, normalmente, en molino de bolas para lograr una conminución notable, para que las partículas de los metales preciosos que se extraerán puedan ser expuestas a la acción de la disolución por la acción de la solución de cianuro. Dicha disolución puede dar comienzo en el molino de bolas o, por el contrario, una vez llega a los agitadores. En el primer caso, la molienda se realiza en presencia de una solución de cianuro.

- Control del tamaño de molienda. El objetivo del cribado es controlar el tamaño de partículas a la hora de alimentar la disolución o el circuito de agitación. La descarga del molino de bolas se envía a un clasificador donde se divide en una fracción gruesa y otra fina; las partículas gruesas retornan al molino de bolas, mientras que el la fracción de finos se envía



al circuito de lixiviación. Mediante esta etapa se puede aumentar notablemente la eficiencia de todo el circuito de molienda.

- Espesamiento de la pulpa lixiviada. El espesamiento puede definirse como el proceso mediante el cual se elimina el exceso de solución de la pulpa. Normalmente, el rebose del clasificador contiene más agua de la deseable en el circuito de lixiviación en tanques, por lo tanto, el exceso de solución rica es eliminado por el espesamiento y enviado a la etapa de precipitación o adsorción. Para determinar la capacidad requerida, es necesario realizar pruebas de sedimentación.
- Efecto de la agitación en la disolución de oro y plata. La agitación puede ser considerada como el método mecánico de mezclar la pulpa con un exceso de aire en tanques circulares de capacidad suficiente para permitir el equilibrio de la disolución de oro en una solución de cianuro. Estos agitadores pueden ser de varios tipos; siendo dos los más comunes: los que dependen totalmente de inyección de aire para agitar la pulpa, y los que dependen de una combinación de aire y agitación mecánica. En el caso de los primeros, el depósito tiene que poseer una altura de tres veces su diámetro.

La agitación depende en su totalidad de una columna de aire que se eleva desde la parte inferior del tanque.

Los agitadores mecánicos usan un exceso de aire en un lado o en sistemas elevadores de pulpa, los cuales efectúan una aireación de la pulpa, mientras que los dispositivos mecánicos dependen del movimiento de agitación en el fondo del tanque.

- Clarificación de la solución rica en oro y plata. Una vez la solución rica se retira de los espesadores y previamente a su envío al tanque de precipitado, es necesario que las impurezas y los sólidos suspendidos deban eliminarse. Esto se realiza mediante el proceso de clarificación y sobre la eficiencia de este paso depende la eficiencia de la precipitación con polvo de zinc.

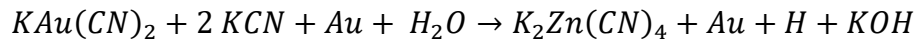
Principalmente, el fundamento de esta fase es el tratamiento de las soluciones a través de un medio filtrante, el cual está frecuentemente



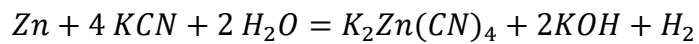
recubierto con material inorgánico para ayudar en el proceso de filtrado y que se produzca una sencilla extracción del limo fino.

- Precipitación de oro y plata con polvo de zinc. Este proceso se denomina Merrill-Crowe y consiste básicamente en la eliminación del aire y la filtración de la solución antes de efectuar la precipitación con polvo de zinc.

El método se basa en que el oro y la plata son electronegativos con respecto al zinc, además de que se produce la siguiente reacción en el proceso de precipitación:



Es posible que también tenga lugar la siguiente reacción, debiendo tenerse en cuenta por el exceso de consumo de zinc sobre las necesidades teóricas preestablecidas:

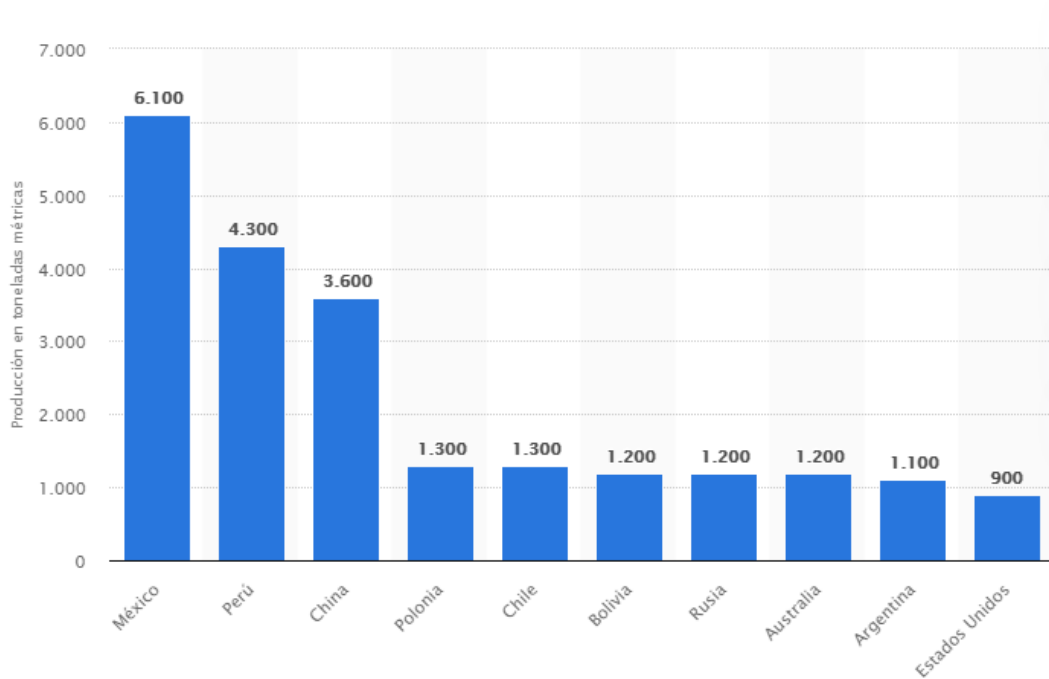


Recuperado de <https://www.911metallurgist.com> y <https://cyt-ar.com.ar>



6.4. Producción mundial de plata

En el año 2018, los principales países extractores y productores de plata fueron los siguientes:



© Statista (2010)

Figura 26. Producción mundial de plata en el año 2018

Como puede observarse, dichos países concuerdan con aquellos que poseen las mayores minas de plata, al tratarse de un mineral escaso en la corteza terrestre y muy localizado.

México fue el principal productor, con alrededor de 6,100 toneladas métricas, seguido de Perú y China. Años atrás, el principal productor era Perú.

La compañía estadounidense Coeur d'Alene Mines cuenta con explotaciones operativas en los principales países productores: en EE. UU. posee Kensington (Alaska) y Rochester (Nevada). En México Palmarejo, San Bartolomé en Bolivia y Endeavor en Australia. Además, poseen proyectos en puesta en ejecución en La Preciosa (México) y Joaquín (Argentina).

Hay muchos factores a considerar cuando se dirige la mirada hacia la plata como producto de inversión, desde los precios de los metales hasta la demanda y la



administración. Sin embargo, los inversionistas deben comenzar con algún conocimiento del panorama de la producción de plata global.

Saber qué países producen la mayor cantidad de plata puede ayudar a los inversores a comprender la lógica detrás de las decisiones de exploración y desarrollo que toman las empresas.

En 2018, la producción mundial de plata aumentó marginalmente a 27,000 toneladas debido a un crecimiento en la producción de minas en Argentina, China y Rusia. Por su parte, México fue una vez más el principal país productor de plata del mundo.

Según las estadísticas de producción de plata basadas en los últimos datos del *US Geological Survey* los diez países con mayor producción de plata del mundo son, por este orden: México, Perú, China, Polonia, Chile, Rusia, Australia, Bolivia, Argentina y Estados Unidos. México y sus 6,100 toneladas, Perú con 4,300 y China 3,600

México fue, una vez más, el mayor productor de plata pura del mundo el pasado año. Si bien su producción bajó comparándola con 2017 a 6,100 toneladas, aún se mantiene en la cima. El país norteamericano alberga la mina de Fresnillo, la compañía de plata más grande del mundo, que estableció récords en 2018 cuando su producción aumentó un 5.3 % con respecto a 2017.

A pesar de los problemas derivados de eventos como las huelgas y la participación del gobierno, se espera que la industria minera en México crezca un 3.3 % por año y se valore en 17.8 mil millones de dólares para 2020.

Sin embargo, Andrés Manuel López Obrador y el partido del Movimiento de Regeneración Nacional actualmente al frente del gobierno, están modificando las regulaciones mineras de la nación para hacerlas más estrictas. Esto no significa necesariamente que los impactos en el sector minero de México serán negativos a largo plazo, pero los mineros estarán esperando para ver qué decide hacer el gobierno con respecto a la plata.

Perú fue el segundo mayor productor de plata del mundo en 2018, alimentando el suministro de plata con una producción de 4,300 toneladas, a la par del año anterior. Perú también cuenta con las reservas de plata más grandes del mundo,



con 110,000 toneladas. El país tiene una enorme cantidad de potencial argénteo sin explotar que podría permitirle ascender en el ranking en el futuro.

La mayoría de la producción física de plata en Perú proviene de la mina Antamina, una empresa conjunta entre BHP, Glencore, Teck Resources y Mitsubishi. Si bien la mina produce más lingotes de plata que cualquier otro en el país, se extrae principalmente cobre, y la plata se produce como un subproducto.

Fortuna Silver Mines está creciendo rápidamente su producción de plata con dos minas operativas en el mercado, una de las cuales se encuentra en Perú. Esa mina produjo 0.9 millones de onzas de plata en 2018.

El puesto número 3 del ranking lo ocupa China, con una producción de 3,600 toneladas. El Instituto de la Plata atribuye una gran parte del aumento de China en el mercado de lingotes en los últimos años al desarrollo de otras operaciones mineras en el país. A partir de 2012, casi el 95 % de la producción de plata china fue producto de otros proyectos mineros.

Muchas empresas en China son de propiedad privada, pero Silvercorp Metals se considera a sí misma como el mayor productor de plata primaria del país. Tiene una cartera de producción de minas de plata, plomo y zinc en China, que incluyen el distrito multi minero Ying y la mina GC.

Polonia subió desde el quinto puesto en 2017 hasta alcanzar el cuarto lugar en 2018. La producción de plata el pasado año creció en 10 toneladas en comparación con el año anterior, llegando a 1,300 toneladas, superando a Rusia y emparejándose con Chile.

KGHM Polska Miedz, con sede en Lubin, es una de las principales compañías productoras de plata del mundo según el Silver Institute, que podría expandirse para hacerse más grande. Polonia está empatada con Australia por tener la segunda reserva de plata más grande del mundo después de Perú.

Chile produjo la misma cantidad de plata el año pasado que Polonia, con una cantidad de 1,300 toneladas.



Algunos creen que el país aún se está recuperando de una huelga de 2017 en la mina Escondida de BHP. El ministerio de minerales del país, conocido como COCHILCO, también sugirió que la caída se debió en parte a la falta absoluta de plata encontrada como un subproducto del oro. Esta noticia se produjo a pesar del hecho de que las reservas del país se estiman en 26,000 toneladas.

La producción de plata de Rusia aumentó en 80 toneladas en 2018, cayendo por debajo de Chile y Polonia, pero alineándose con Bolivia y Australia. Las reservas de plata del país son de 45,000 toneladas, y sigue siendo el segundo productor de plata en Europa.

La mayor compañía rusa es Polymetal International que domina la producción y opera en cuatro de las cinco principales minas de plata en el país.

En el séptimo lugar del ranking mundial se sitúa Australia, con una producción minera de 1,200 toneladas de plata en 2018, a la par con lo que produjeron el año anterior. Hoy, South32 opera la mina Cannington, en Queensland, que produce más plata que cualquier otra mina en el país. La compañía afirma producir el 6 % de la plata del mundo.

La producción de plata de Bolivia cayó de 1,240 TM en 2017 a 1,200 TM en 2018. Sin embargo, hay espacio para que la industria argentífera del país se expanda. Según los informes, Bolivia vendió más de 2,300 millones de dólares en minerales a China en 2017, lo que podría dar resultados en cualquier momento.

Bolivia es el hogar de varias minas de plata, particularmente en su región de Potosí. La mina San Cristóbal, operada por Sumitomo, presenta la tercera reserva de plata más grande de todas las minas. Además, Pan American Silver opera una mina subterránea de plata-zinc llamada San Vicente.

Argentina reemplaza a Kazajstán en la lista de los principales productores de plata. Con una cantidad de 1,100 toneladas, su producción está apenas por debajo de los principales actores, y según el Servicio Geológico de los Estados Unidos, las reservas de plata en Argentina son actualmente desconocidas.

En junio de 2018, Yamana Gold, comenzó la producción comercial en Cerro Moro, una mina de oro y plata de alta ley en el país. Argentina también alberga



las minas Chinchillas y Pirquitas, administradas por una empresa conjunta entre SSR Mining y Golden Arrow Resources.

El décimo lugar de los posicionamientos lo ocupa Estados Unidos con una producción de 900 toneladas, por debajo de las 1,030 toneladas que produjo en 2017. El metal se produjo en cuatro minas de plata y como un subproducto en 36 minas de base y metales preciosos. Las reservas de plata del país se sitúan en 25,000 toneladas.

El mayor productor de plata primaria con sede en Estados Unidos es Coeur Minin.

En general, en 2018, se estimó que el consumo mundial de plata había disminuido ligeramente respecto al de 2017. Se proyectó que el consumo de monedas y barras disminuyera significativamente por segundo año consecutivo. Esto se produce después de un récord de ventas en 2015. También se estimó que la joyería y la plata, la fotografía y la energía fotovoltaica disminuirían en 2018. De los usos industriales, se esperaba que el consumo de plata para soldadura fuerte y aleaciones, y la electrónica aumentara en 2018. La plata refinada continuó aumentando y se proyectó que alcanzaría un máximo de 10 años por tercer año consecutivo debido a una reducción del consumo de plata física.

Según el informe anual de la US Geological Survey la producción mundial de minas de plata aumentó ligeramente en 2018 a un estimado de 27,000 toneladas, principalmente como resultado del aumento de la producción de minas en Argentina, China y Rusia. Las principales empresas productoras de plata del mundo experimentaron reducciones en la producción debido a problemas gubernamentales con licencias, operaciones de minería ilegal, aumentos de aranceles, leyes de mineral reducido y huelgas de trabajadores en diversos proyectos.

Recuperado de <https://www.statista.com/statistics/264640/silver-production-by-country/>



6.5. Aplicaciones principales

Como se especifica en la web *oro.bullionvault.es*, el uso de la plata puede darse en ciertos escenarios, tales como:

- La demanda industrial de plata

La plata tiene muchos usos industriales responsables de la mitad de la demanda anual global en los últimos cinco años.

Esto implica que el crecimiento económico puede afectar los precios de la plata mucho más de lo que afecta al oro. Solo un 10-15 % de la demanda anual de oro proviene de su uso industrial, el resto se utiliza para joyería e inversión.

Gracias a las características físicas de la plata: fuerza, brillo, maleabilidad y ductilidad (puede ser aplastada o estirada en cualquier forma), se ha utilizado también en joyería, vajillas y artes plásticas durante miles de años. Las aplicaciones industriales se aprovechan de la conductividad de la plata (la mayor entre todos los elementos para electricidad y calor) así como de su sensibilidad a la luz y de sus propiedades antibacterianas.

Actualmente, la plata tiene un gran valor en las aleaciones y soldaduras, fabricación de baterías, la odontología, los recubrimientos de vidrio, chips LED, reactores nucleares, la fotografía, energía fotovoltaica (o solar), chips RFID (para el seguimiento de paquetes), semiconductores, pantallas táctiles, purificación de agua y conservantes de madera, entre muchos otros. Por su gran utilidad el Silver Institute lo denomina "el metal indispensable".

Los mayores consumidores de metal para uso en aplicaciones industriales en la última década han sido Estados Unidos, Canadá, China, India, Japón, Corea del Sur, Alemania y Rusia. Durante ese periodo, la demanda de plata de las industrias más tradicionales se ha ido desvaneciendo, pero ha conseguido ser reemplazada por los usos tecnológicos más modernos.

Cabe analizar brevemente los tres principales usos de la plata: la fotografía, la energía solar y la medicina y valorar cómo están cambiando gracias a las nuevas tecnologías.



- Uso fotográfico de la plata

La fotografía solía generar la principal demanda de plata, al necesitar el nitrato de plata para crear cristales de haluro sensibles a la luz. Este sector abarca la fotografía, las artes gráficas y el sector de la radiografía (rayos X), tanto para la medicina como para la inspección de maquinaria pesada.

La demanda fotográfica de plata alcanzó su pico en 1999, cuando suponía el 25 % de la fabricación total. El mercado audiovisual de Estados Unidos utilizó más de 93 millones de onzas ese año, más de una onza por cada diez vendidas a nivel mundial. Sin embargo, en los siguientes cinco años, la demanda fotográfica de plata cayó a un 20 % de la demanda total y en 2013 era de tan solo un 9 %.

La fotografía digital es la gran responsable de este declive en la demanda de plata. La fotografía utilizada para rayos X sigue siendo una gran consumidora de plata, pero la demanda fotográfica se ha contraído un 70 % en peso desde su pico.

- Demanda fotovoltaica de la plata (energía solar)

La sensibilidad de la plata a la luz ha es de gran uso en la creciente industria fotovoltaica (o de energía solar). Al utilizar la plata como una tinta conductora, las células fotovoltaicas logran transformar la luz solar en electricidad.

El uso fotovoltaico de la plata tuvo un impacto por primera vez sobre la demanda en el año 2000, al tiempo que la industria fotográfica tradicional comenzaba su declive. Se consumieron un millón de onzas ese año. Esta cantidad no era ni una décima parte de la cantidad utilizada por la industria electrónica. En 2008 el sector fotovoltaico ya estaba consumiendo 19 millones de onzas al año, gracias a los subsidios gubernamentales que promovieron el crecimiento de la industria en Estados Unidos, Europa Occidental y, especialmente, China.

La demanda fotovoltaica de plata explotó a partir de ahí, creciendo a una tasa anual del 50% y empezando a llenar el hueco dejado por la industria fotográfica en declive. Pero los subsidios empezaron a recortarse con la crisis y los precios de la plata se duplicaron hasta tocar casi los 50 USD/oz (el récord histórico alcanzado en enero de 1980). La demanda industrial empezó entonces a caer y lo hizo durante tres años consecutivos.



Los precios más altos del metal provocaron la necesidad de usar menos plata en la producción de la misma cantidad de energía solar. Este ahorro de metal consiguió recortar en un 80 % la cantidad de plata utilizada en una célula solar. Así que, a pesar de una subida general en la producción total de paneles solares, la demanda fotovoltaica estadounidense de plata ha caído en los últimos años. En Europa, los subsidios habían llevado a la superproducción y el exceso de capacidad en la industria tuvo como consecuencia la desaparición de muchas empresas de producción de células solares, afectadas también por China como importante competidor.

- La plata y su uso en la medicina

De entre todos los elementos químicos, la plata tiene la acción antibacteriana más fuerte con la menor toxicidad en las células animales. Porque, al igual que otros metales preciosos más caros, interrumpe la habilidad de las células bacterianas de formar ciertos enlaces químicos esenciales para su supervivencia.

Al añadirla al agua, la plata suelta iones de plata. Estos iones también matan y previenen el crecimiento biológico, inhabilitando al metabolismo de gérmenes y dificultando la función de sus membranas.

Este gran valor de la plata no fue descubierto en este siglo. Los antiguos fenicios descubrieron que podían mantener frescos el agua y otros líquidos al conservarlos en botellas revestidas en plata. 3000 años más tarde, los pioneros americanos prevenían la disentería, los resfriados y las gripes introduciendo monedas de plata en las botellas de leche. Los biocidas de plata se encuentran hoy en día en los sistemas de purificación de agua, catéteres, mobiliario de hospital y casi todo el instrumental en el quirófano. La ionización cobre plata también ha sido aprobada como tratamiento primario para el control a largo plazo de la legionela en los sistemas de aire acondicionado.

El nitrato de plata se utilizó a finales del siglo XIX para curar a los recién nacidos de infecciones en los ojos y los doctores encontraron que las heridas se curaban antes con vendajes que contenían plata. El metal se utilizaba en suturas sobre heridas quirúrgicas y para curar úlceras con vendas con contenido de plata, uso



que sigue aplicándose en la actualidad. Estas vendas son especialmente efectivas para curar quemaduras.

Durante los años 20, Estados Unidos expidió más de tres millones de recetas para medicamentos con contenido en plata. Sin embargo, a causa de la introducción de la penicilina en los años 40, los antibióticos se convirtieron en el tratamiento estándar para las infecciones bacterianas e, inevitablemente, el uso de la plata en medicamentos pasó a un segundo plano. No obstante, nuevos avances científicos han seguido estudiando los beneficios de la plata en la industria médica.

La nanotecnología utiliza la plata como un antimicrobiano, reduciendo el metal a partículas medidas en milmillonésimas de metro. Esta nanoplata actúa como un catalizador para la oxidación, generando oxígeno del aire o del agua que destruye las membranas celulares de las bacterias unicelulares. Puesto que solo activa esta reacción, no contamina el entorno a su alrededor.

En resumen, hay mucho más en la historia de la plata que su uso como metal monetario o su interés para la industria de la joyería o la inversión. Los usos industriales y tecnológicos de la plata son responsables de más de la mitad de la demanda anual y esa demanda juega un papel importante y transformador en los precios del metal a largo plazo.



6.6. Mercado

La información de estos párrafos fue extraída de la web *bnamericas.com*, con un claro enfoque en el mercado latinoamericano, dado la localización del depósito a modelizar.

Los costes de producción entre las principales empresas mineras de plata de Latinoamérica aumentaron en el año 2019, impulsados principalmente por los menores precios de zinc y plomo como subproductos, y a una caída notable de la producción.

Sin embargo, se espera que todas las empresas mineras puedan generar flujos de caja libres en los próximos años, con el metal cotizándose en torno a 18 USD/oz (0.58 USD/g), su nivel máximo en dos años.

Los costes sostenidos todo incluido (AISC) sin ponderar entre siete productores de plata promediaron los 12,86 USD/oz (0.41 USD/g), siendo un 16 % más que los 11,10 USD/oz (0.36 USD/g) del 2018, según cálculos de BNamericas.

La cifra de 2019 se ubica por debajo de los 13,20 USD/oz (0.42 USD/g) registrados en el año 2017.

Las compañías de la lista produjeron al menos 5 millones de onzas de plata a partir de sus operaciones en Latinoamérica en 2018. Se excluyen aquellas que no divulgaron datos de AISC. Las cifras se basan en subproductos, en caso de estar disponibles.

- Menores costes

Pan American Silver se ubicó entre las mineras de plata de menores costes a pesar de que los AISC se duplicaron hasta los 10,67 USD/oz (0.34 USD/g) (las cifras corresponden al segmento de plata de la empresa, que excluye los activos de oro asumidos en la adquisición de Tahoe Resources).

Los costos aumentaron en las operaciones de La Colorada y Dolores en México, Morococha en Perú y Manantial Espejo en Argentina, debido a factores tales como menores créditos por subproductos de oro, plomo y zinc, y menores volúmenes de venta, junto con la reintroducción de impuestos a la exportación en Argentina a fines del año 2018.



Los AISC se pronosticaron entre los 9,75 y los 11,25 USD/oz (0.31 – 0.36 USD/g) para el año 2019.

Coeur Mining reportó costos de producción de su mina Palmarejo en México como costes ajustados aplicables a las ventas (CAS), que no son directamente comparables con los AISC.

La cifra de 9,17 USD/oz (0.29 USD/g) es superior a los 7,05 USD/oz (0.23 USD/g) correspondientes al año 2018.

- Rango medio

Fortuna Silver, Hochschild Mining y Fresnillo registraron AISC en el rango de 11 a 12 USD/oz (0.35 – 0.39 USD/g), y todas observaron un aumento de los costes.

La cifra de Fortuna, de 11,26 USD/oz (0.36 USD/g), fue mayor que los 10,03 USD/oz (0.32 USD/g) del año 2018, debido en parte a los precios más bajos del plomo y el zinc, así como los menores volúmenes de venta de plomo y oro. Fortuna tiene en propiedad las minas de San José en México y Caylloma en Perú.

Los AISC de Hochschild aumentaron marginalmente hasta los 11,40 USD/oz (0.37 USD/g) y los mayores gastos de su trío de operaciones peruanas fueron compensados en parte por una disminución de San José en Argentina (las cifras corresponden al primer semestre de 2018 frente al primer semestre de 2019, ya que la compañía informa de los AISC cada seis meses).

Los AISC se pronostican entre 11,8 y 12,3 USD/oz (0.38 – 0.39 USD/g) en 2019, y se esperan mayores gastos en la mina peruana Inmaculada en el segundo semestre de 2019.

La minera mexicana Fresnillo, que también reporta AISC cada seis meses, experimentó un aumento desde los 11,39 USD/oz (0.37 USD/g) a 11,83 USD/oz (0.38 USD/g), debido a mayores costos en los activos Fresnillo, Saucito, Ciénega, San Julián y Herradura, como consecuencia de menores créditos por subproductos de oro, plomo y zinc, mayores costos de extracción por tonelada y mayores gastos de capital sostenido en algunas minas.



- Mayores costes

Endeavour Silver experimentó un aumento en sus AISC de 17,28 USD/oz (0.55 USD/t) hasta los 20,90 USD/oz (0.67 USD/g) en sus cuatro minas mexicanas, debido a los mayores gastos operativos, lo que se vio en parte compensado por menores gastos de exploración, generales y administrativos, y menor gasto de capital.

La compañía pronostica AISC en el rango de 17 a 18 USD/oz (0.55 – 0.58 USD/g) para 2019, cifra superior a los 15 – 16 USD/oz (0.48 – 0.51 USD/g) proyectados originalmente.

La nueva proyección implica una cifra de 15 a 16 USD/oz (0.48 – 0.51 USD/g) en el 2S19, una mejora importante respecto del 2019.

First Majestic Silver, que concentra la totalidad de sus operaciones en México, fue la única minera del grupo cuyos AISC se vieron afectados negativamente, de los 16,43/oz (0.53 USD/g) hasta los 14,76/oz (0.47 USD/g).

El retroceso se atribuyó en parte a la decisión de suspender la mina La Guitarra, de coste superior, y rebajar los gastos de la operación La Encantada, lo que se vio en parte contrarrestado por mayores gastos en todos los demás activos.

Los AISC llegarían a 12,98 – 13,94 USD/oz (0.42 – 0.45 USD/g) el pasado año 2019.



6.7. Costes típicos: minería/producción

En el apartado anterior se analizaron los costes de mercado de la plata en términos de AISC (*All-in sustaining costs*), que es una medida introducida por el *World Gold Council* (Consejo Mundial del Oro) en junio de 2013 para incluir todos los costes directos, más los necesarios para mantener la mina funcionando con los mismos niveles de producción de plata.

Según lo establecido por el informe de Tinka Resources Ltd. Del año 2019, donde se recogen los estudios de mercado de las zonas mineras circundantes a Colquipucro, se establecen los precios que aparecen en la siguiente tabla:

Actividad	Coste (USD/t)
Minería	2.6
Lixiviación en pilas	3.74
Lixiviación por cianuración	21.65
G&A (gastos generales y administrativos)	4.48

Tabla 4. Costes típicos de la zona de interés



CAPÍTULO 7. MODELIZACIÓN DEL YACIMIENTO

7.1. Introducción

En este capítulo se procederá a modelizar el yacimiento, mediante la introducción de datos procedente de la empresa titular de los terrenos (Tinka Resources Ltd.) y su estudio mediante el uso de dos programas informáticos de modelización minera y control de leyes, el GEOVIA Surpac™ y el RecMin.

Dado que no se conoce la litología interna del yacimiento Colquipucro, la modelización de los cuerpos mineralizados será llevada a cabo a partir de la información geológica de los sondeos proporcionados por la empresa minera, que muestran las leyes en plata, y los diferentes dominios mineralizados del yacimiento.

El objetivo de la modelización será la creación de los distintos cuerpos que conforman el yacimiento, su estudio e interpretación en Surpac, mediante la aplicación de métodos geoestadísticos para dar con una aproximación lógica de la distribución de la plata a lo largo del yacimiento y, posteriormente, la optimización de la corta en RecMin, atendiendo a diferentes costes, gastos y variables de mercado que puedan influir tras la implantación de la explotación minera en el yacimiento.



7.2. Surpac

El software GEOVIA Surpac™ será el software con el que se realizará la modelización del yacimiento. Se trata de un conjunto de paquetes de programas de planificación de extracción y geología. Ofrece tanto capacidades de modelización de labores subterráneas como a cielo abierto. El software ofrece la posibilidad de evaluar y cuantificar los depósitos minerales para poder realizar una planificación eficiente de la extracción de las reservas.

MODELADO GEOLÓGICO Y DE RECURSOS

Permite determinar las características físicas de un depósito con información procedente de gráficos 3D, geoestadística y un entorno integrado para la modelización.

Administración de datos

- Posee herramientas de bases de datos para el almacenamiento, gestión y revisión de datos de sondeos.
- Capacidad de comunicación con cualquier producto de gestión de bases de datos y trabajo en tiempo real en conexión íntegra con esos datos.
- Rápido visionado y salida de secciones mediante el uso de sondeos o datos topográficos o pre-modelizados.
- Trabajo con objetos modelizados procedentes de escaneo o fuentes fotogramétricas para permitir el cartografiado directo de contactos, fronteras y superficies.

Estimación y modelización

- El programa contiene herramientas para la composición de muestras y la geoestadística.
- El modelado de variogramas incluye abanicos de variogramas e intervalos de ajuste para ayudar a la identificación del mejor variograma.
- Las herramientas de estimación incluyen una interfaz GSLIB para tanto *kriging* como opciones de simulación condicionales.
- Herramientas integrales de triangulación que permiten el desarrollo de un modelo muy representativo de cualquier cuerpo mineralizado.



- Las herramientas de modelos de bloques de Surpac cubren un amplio rango de funcionalidades, y son sencillas de utilizar. Con varios núcleos, validar un modelo de bloques y generar cualquier tipo de reporte se realizan de una forma notablemente rápida.
 - El modelo de bloques permitirá calcular el volumen (cubicar) y la calidad de los materiales con extensiones del área sometida a investigación.
 - Permite la generación de bloques volumétricos, además de realizar análisis geoestadísticos.
 - Evalúa los recursos minerales
 - Produce salidas para informes normativos y decisiones de viabilidad de las inversiones.

Paquete estructural

Permite la extracción y visualización directa de las orientaciones a través de los sondeos, el análisis de los gradientes superficiales, así como la creación de planos de visualización a través de nubes de puntos o mallados texturizados, permitiendo su visualización a través de una proyección estereográfica.



7.3. Planificación minera

Tanto en la creación de proyectos y diseños para cielo abierto como para operaciones subterráneas, será posible la maximización de la recuperación de mena, así como el ajuste del diseño a largo plazo teniendo en cuenta restricciones como pueden ser las diferentes leyes de corte, límites económicos y la estabilidad del suelo.



7.4. Producción

El software administra sondeos, voladuras y cálculos de información, mientras se mantiene vinculado con otras bases de datos empleadas en operaciones mineras.

Prospección minera y control de menas

- Calcula y valida volúmenes de una forma óptima y rápida.
- Compara modelos de *kriging* contra datos brutos de sondeos para optimizar la extracción de reservas.
- Produce mapas a escala de alta calidad de cualquier información relevante para un proyecto.
- Posee la capacidad de realizar control de flotas mediante el diseño de cortas y carreteras.



7.5. Aplicaciones de Surpac

- Base de datos geológicos
- Visualización de sondeos
- Gestión y procesado de datos de muestras
- Diseño y modelización geológica
- Estimación de reservas (*reports*)
- Modelización de sólidos
- Modelo de bloques
- Análisis geoestadístico
- Planificación minera
- Funciones de planificación y diseño para minería a cielo abierto, subterránea, escombreras y balsas de estériles
- Perforación y voladura
- Prospecciones
- Control de leyes



7.6. Interfaz de Surpac

Una vez se abre el programa, se muestra por pantalla la siguiente interfaz de usuario:

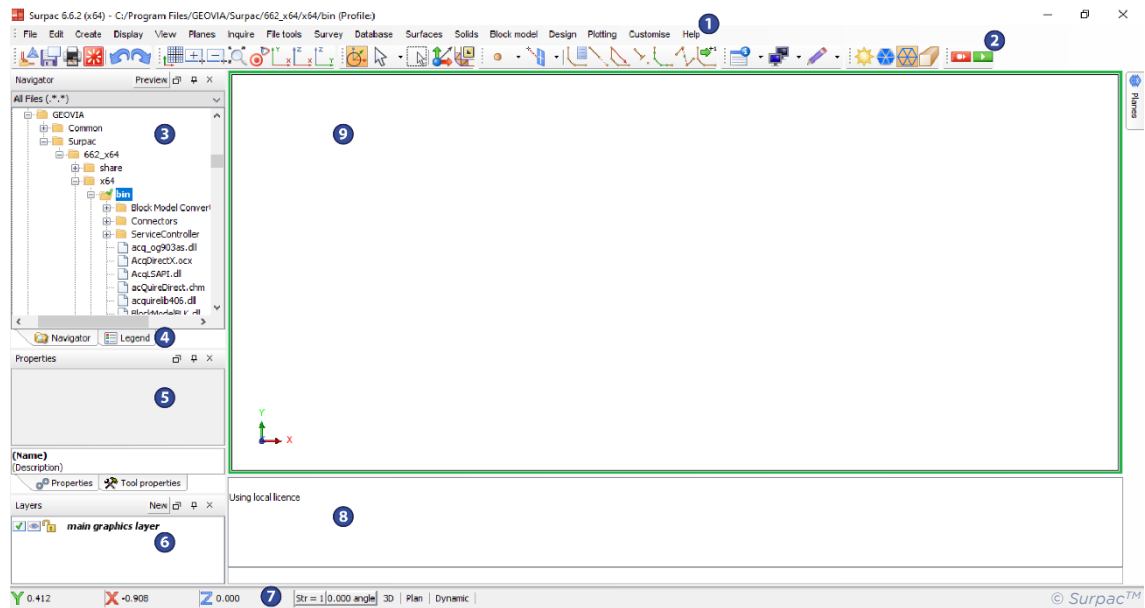


Figura 27. Interfaz inicial de Surpac

Donde:

1. Menús
2. Barra de herramientas
3. Panel del navegador
4. Panel de leyendas
5. Panel de propiedades
6. Panel de capas
7. Barra de estado
8. Ventana de mensajes
9. Gráficos



7.7. Sondeos

Para proceder a la modelización de un yacimiento a través de Surpac™, en primer lugar, es necesario analizar los archivos correspondientes a los sondeos, y la forma de abrirlos o importarlos con el software.

Normalmente, tras la realización de la malla de sondeos en campo, las muestras recogidas en forma de testigos pasan a ser analizadas en laboratorio, normalmente por medio de geólogos, para dar con datos correspondientes a contenido, leyes, geología, etc. Tras el trabajo en laboratorio de análisis de todos los testigos, se generan varios archivos en formato hoja de cálculo o .csv, existiendo entre ellos dos de existencia obligatoria para llevar a cabo un estudio, que serán *collar* y *survey*, y otros adicionales, que serán los encargados de proporcionar información adicional. En el proyecto de Colquipucro, los archivos utilizados para llevar a cabo el estudio son los siguientes:

- *Collar*
- *Survey*
- *Sample*

Cada uno de los archivos de esta base de datos creada, poseerá campos de relleno obligatorio, como son el código del sondeo (ID), coordenadas, longitud, etc. y otros campos adicionales, de los que puede poseerse información o no.

En el caso del estudio de Colquipucro, los archivos indican que las medidas vienen expresadas en metros (m).

7.7.1. Representación

En primer lugar, se procederá a la representación de la malla de los sondeos sobre software GIS (QGis), para poder localizarlos visualmente dentro de la zona del proyecto.

Para ello, se deberá acceder a la tabla *collars*, de la que se hablará en posteriores apartados, y sacar de ella la información relativa al código de cada sondeo, a sus coordenadas y a su cota.

El sistema de referencia de coordenadas será el WGS 84 / UTM Zone 18S.



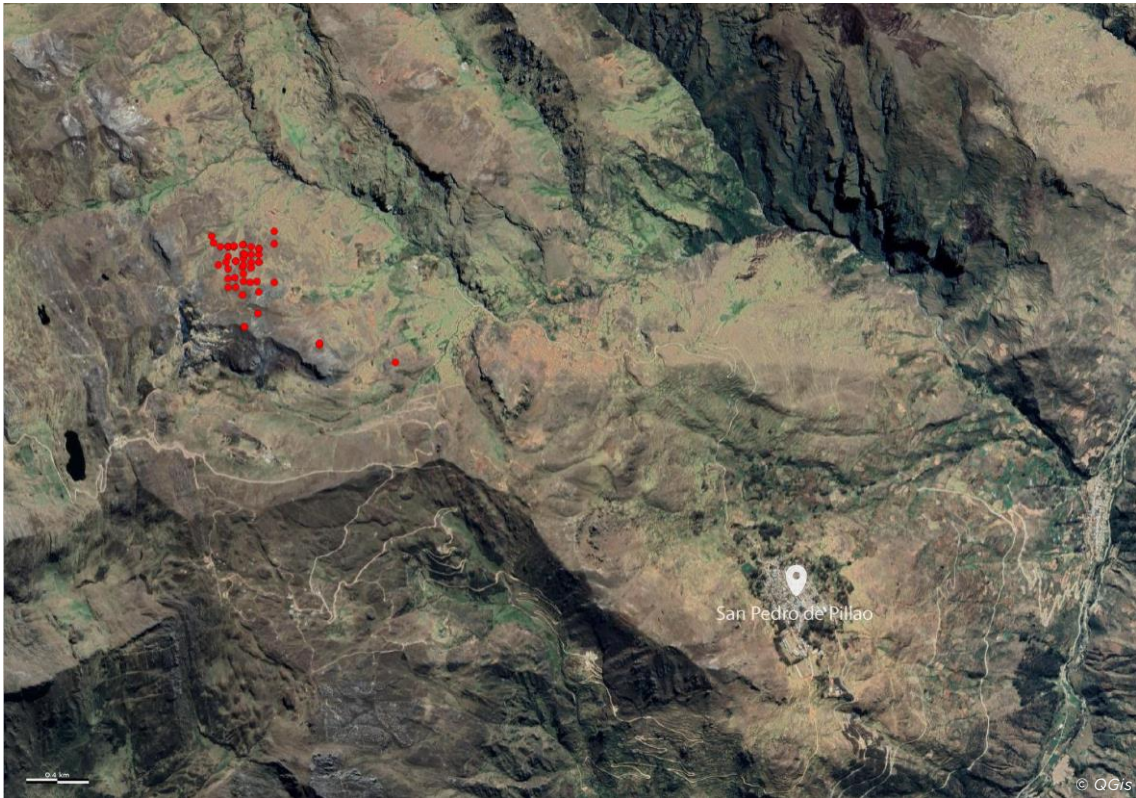


Figura 29. Representación de los sondesos sobre ortofoto de la zona

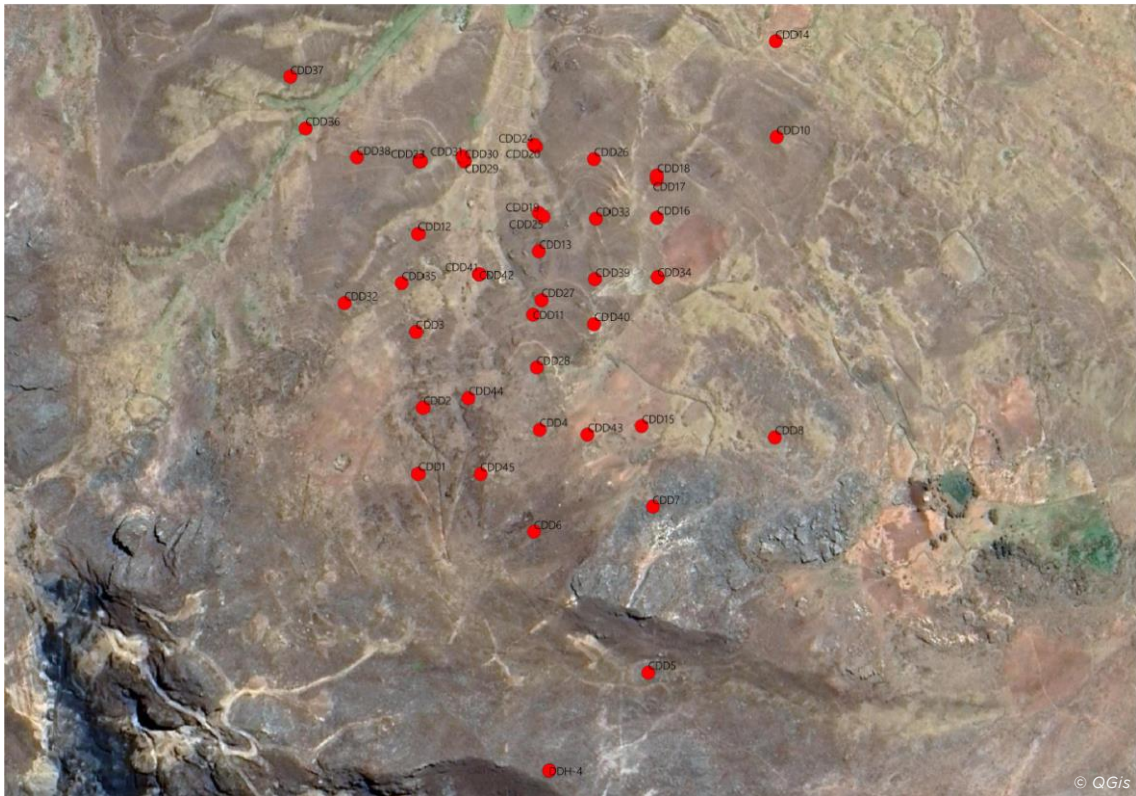


Figura 28. Representación de la malla de sondesos

7.7.2. Métodos de perforación

Se empleó perforación con testigos, empleando tamaños estandarizados de HQ (63.5 mm de diámetro de testigo) y NQ (47.6 mm).

La desviación de los sondeos no fue analizada en las primeras 35 perforaciones de Colquipucro. Dada la longitud de estos sondeos, el equipo utilizado, el espaciado entre sondeos, y las desviaciones mínimas mostradas en aquellos sondeos en que se analizaron, RPA®, la compañía encargada de analizar y desarrollar la información de los sondeos para su posterior digitalización no consideró la falta de información en los sondeos iniciales como problema a la hora de interpretarlos.

7.7.3. Collar

La tabla *collar* es aquella que posee datos correspondientes a la localización de cada sondeo específico, a través de sus coordenadas (X, Y), la profundidad máxima perforada del mismo (*length*), además de contener también un código adicional, mostrando si el sondeo es lineal o por el contrario dirigido, con cambios de trayectoria conforme avanza su profundidad.

Se pueden añadir como información adicional 54 campos más en Surpac, como pueden ser la sección, la fecha en que se realizó el sondeo, el tipo de sondeo profundizado, nombre del proyecto, etc.

Algunos de los datos contenidos en el archivo *collar* de Colquipucro son los siguientes:

Hole ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Length (m)
CDD1	332594.59	8847709.06	4319	151.94
CDD10	332896.72	8847994.27	4142	262.2
CDD11	332690.36	8847843.52	4238	185.2
CDD12	332593.18	8847911.46	4220	216.7
CDD13	332695.62	8847896.84	4217	172
CDD14	332895.31	8848074.86	4110	214.5
CDD15	332783.48	8847750.12	4239	250
CDD16	332795.65	8847925.92	4191	194.7
CDD17	332795.4	8847958.3	4182	152.8
CDD18	332795.52	8847961.71	4182	124.5

Tabla 5. Valores de la tabla *collar*



7.7.4. Survey

La tabla *survey* almacena la información utilizada para calcular las coordenadas de cada sondeo.

Los campos obligatorios incluyen la profundidad del sondeo desde el punto donde comenzó a profundizarse (*depth*), además de la dirección (*azimuth*) y el buzamiento de este (*dip*). En caso de que el sondeo fuese vertical, la profundidad sería la misma que la del campo “profundidad máxima”, el buzamiento correspondería a -90 y la dirección sería cero.

En el archivo, las columnas correspondientes a x, y, z se tratan de las coordenadas calculadas de cada sondeo.

En esta tabla se pueden almacenar otros 53 campos adicionales, como la orientación del testigo, etc.

Algunos de los datos contenidos en el archivo *survey* de Colquipucro son los siguientes:

Hole ID	Length (m)	Azimuth	Dip
CDD1	151.94	180	-50
CDD10	262.2	180	-50
CDD11	185.2	180	-55
CDD12	216.7	180	-60
CDD13	172	180	-50
CDD14	214.5	165	-70
CDD15	250	180	-60
CDD16	194.7	180	-50
CDD17	152.8	180	-50
CDD18	124.5	360	-60
CDD19	128.9	180	-60
CDD2	159.7	180	-50
CDD20	100.7	180	-60
CDD21	152.6	180	-60
CDD22	210	360	-60
CDD23	221.9	360	-90

Tabla 6. Valores de la tabla *survey*



7.7.5. Sample

La tabla *sample* se trata de aquella con información correspondiente con el contenido mineral para cada tramo de testigo de sondeo. Como se explicó anteriormente, esta es una de las tablas secundarias que pueden importarse en el software, y en este caso posee únicamente información relativa al contenido en plata para cada tramo de un sondeo.

Las longitudes de los tramos pueden variar en relación con la importancia que se le dé a cada sector de estudio. De ese modo, en este estudio existen tanto tramos de dos metros como de más de 100 m.

Así mismo, se añadió un campo de nombre “*domain ID*”, que se trata de un conjunto de mineralizaciones con distintas leyes, según la litología de la zona. De este modo, se tienen 14 mineralizaciones distintas, de las que se utilizarán únicamente 13 para la modelización de este proyecto. Dentro de estos dominios, existen 8 lentejones de alta ley (102 a 109), una gran zona basal de baja ley (50), y tres cuerpos mineralizados circundantes (101, 110 y 111).

Los métodos analíticos llevados a cabo en los sondeos fueron los siguientes:

Hole ID	Nº sondeos	Nº ensayos	Método analítico	Límite de concentración (g/t Ag)	Método	Laboratorio
DDH-1 - DD-4	4	156	ICP	200	AAS	Bondar Clegg
CDD1 – CDD15	15	1.333	AAS	1000	Piro análisis	Plenge
CDD16 – CDD35	20	1.774	ICP (ICP40B)	100	AAS	SGS
CDD36 – CDD45	10	765	ICP (G0153)	25	AAS	Certimin
CDD46	1	107	ICP (ICM40B)	10	AAS	SGS
TOTAL	50	4.135				

Tabla 7. Métodos analíticos de los testigos de Colquipucro



Algunos de los datos contenidos en el archivo *sample* de Colquipucro son los siguientes:

Hole-Id	From (m)	To (m)	Length (m)	Ag (g/t)	Domain Id
CDD1	2	4	2	76	106
CDD1	4	24	20	29.62	50
CDD1	24	32	8	75.52	104
CDD1	32	38	6	15.5	50
CDD1	38	40	2	37.9	102
CDD1	40	70	30	12	50
CDD1	70	72	2	61.2	107
CDD1	72	82	10	16.16	50
CDD1	82	84	2	60.8	108
CDD1	84	102	18	19.52	50
CDD1	102	106	4	145.69	109
CDD1	106	126	20	11.21	50
CDD1	126	130	4	153.99	101
CDD10	120	139.28	19.28	30.07	50
CDD11	0	2	2	37.53	50
CDD11	2	44	42	99.6	110

Tabla 8. Valores de la tabla sample



7.8. Representación de sondeos y superficie

Una vez se importa el paquete de sondeos realizados en el depósito (50), y con las curvas de nivel en formato .str (*string*, o polilíneas), estos podrán representarse para ver de forma tridimensional el entorno del depósito.

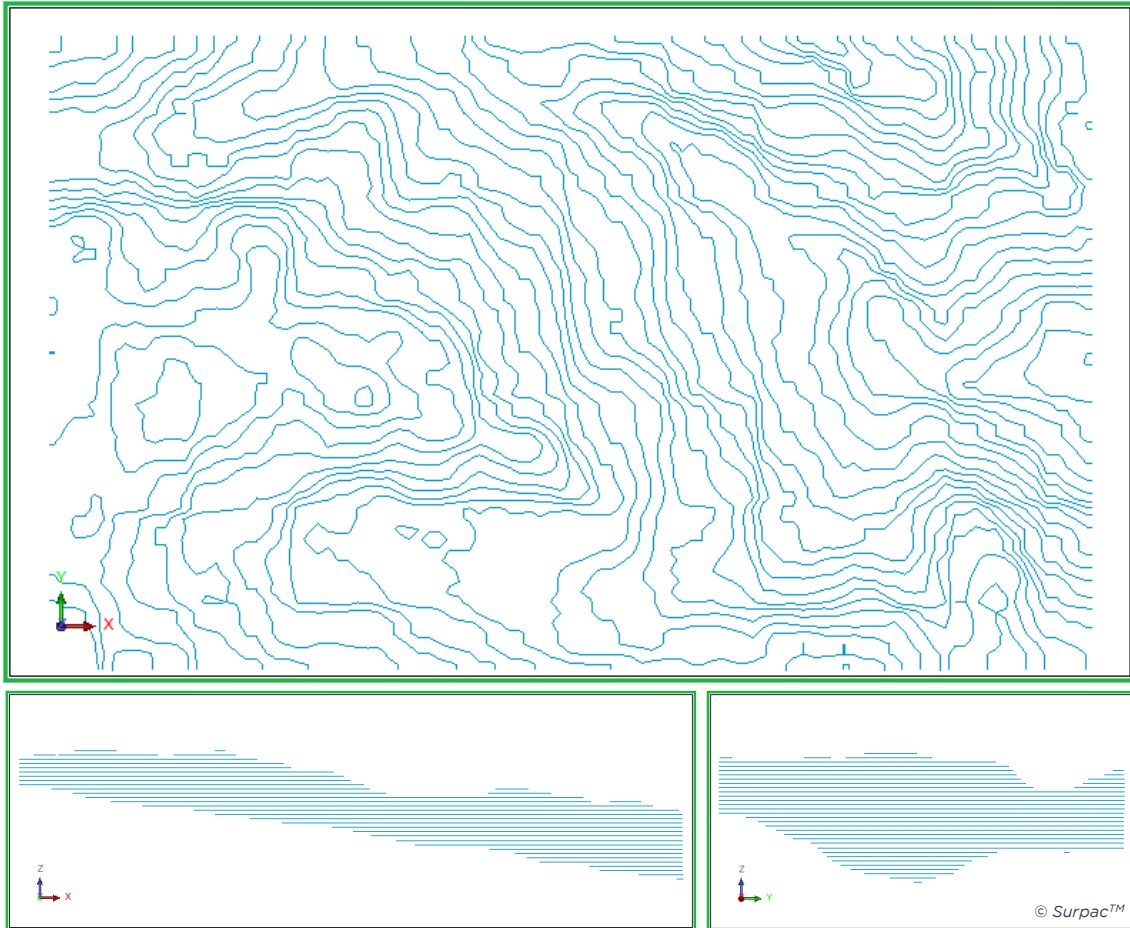


Figura 30. Vistas de la topografía

Gracias a la herramienta “*Create DTM*” se puede crear una triangulación de las polilíneas para obtener un nuevo archivo que represente la superficie del terreno. Como se puede observar en la *figura 31*, una vez se triangula para dar con una superficie, se puede tener una mejor perspectiva tridimensional del área de estudio.

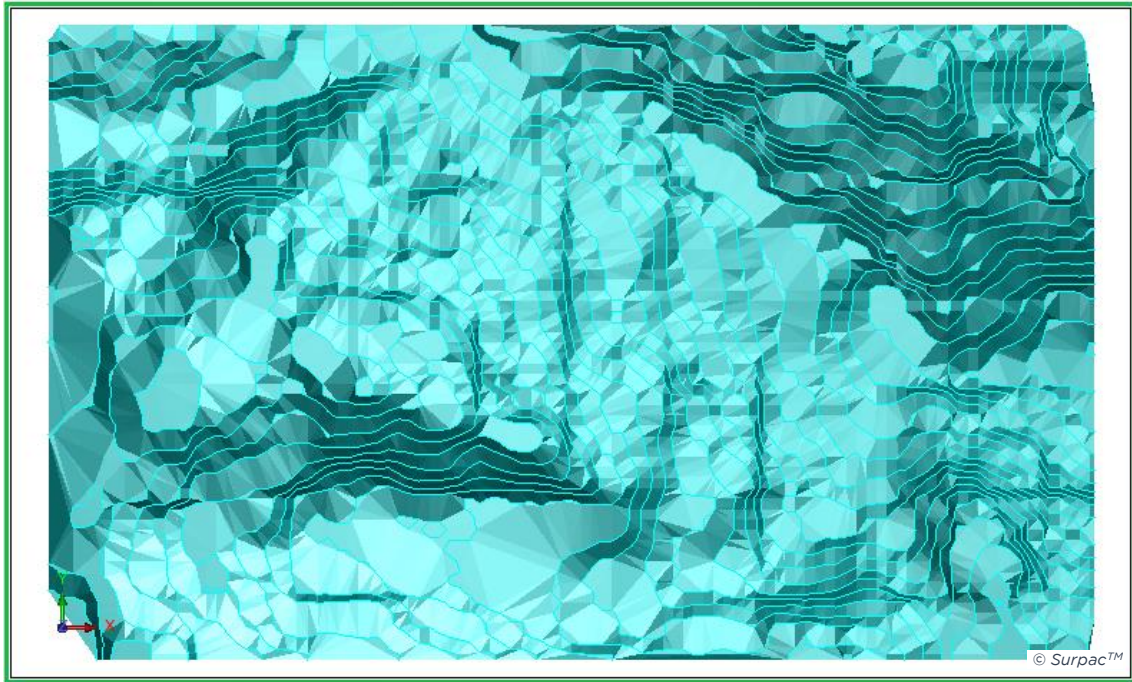


Figura 31. Vista planar de la superficie

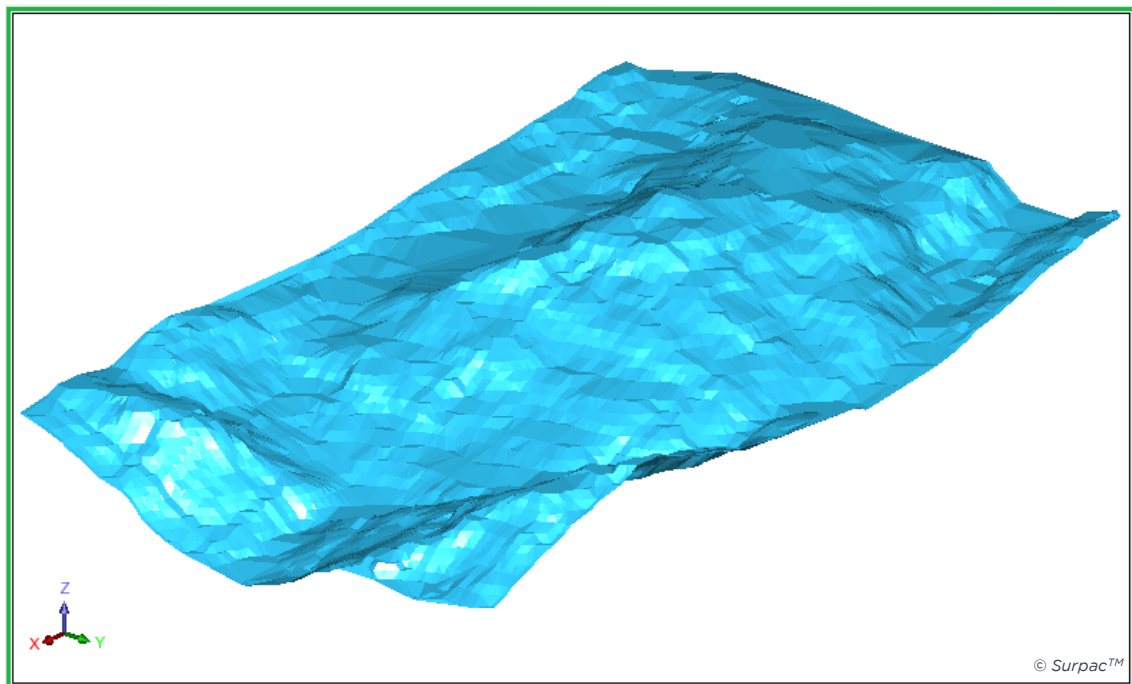


Figura 32. Vista tridimensional de la superficie

Si se representa el tono de la triangulación de la superficie en función de la cota (coordenada Z), puede observarse como las altitudes del proyecto oscilan entre los 3700 y 4400 metros de altitud, como se mencionó anteriormente.

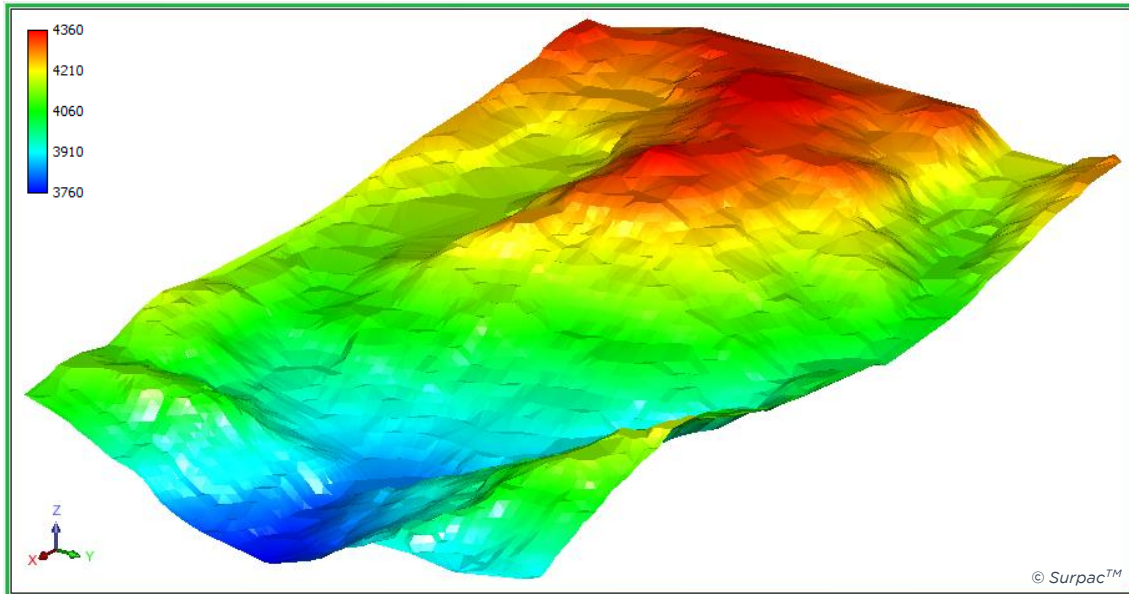


Figura 33. Representación del color de la superficie en función de la altitud

Para representar los sondeos, una vez importados los tres archivos con la información correspondiente al proyecto, se deberá abrir un paquete de datos que se crea tras la importación, de formato .ddb.

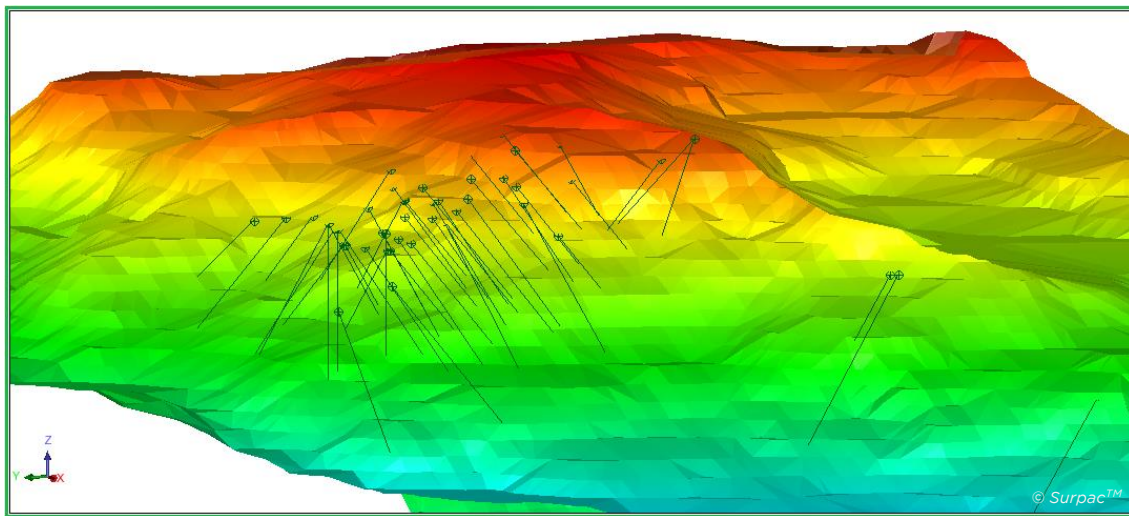


Figura 34. Importación de los sondeos sobre la superficie

Como se explicó con anterioridad, el archivo contiene información relativa a 50 sondeos realizados en la superficie de interés. Una vez se abren con Surpac, y se configura para que muestren por color en relación con la ley de plata que posean, se visualizan de la siguiente forma:

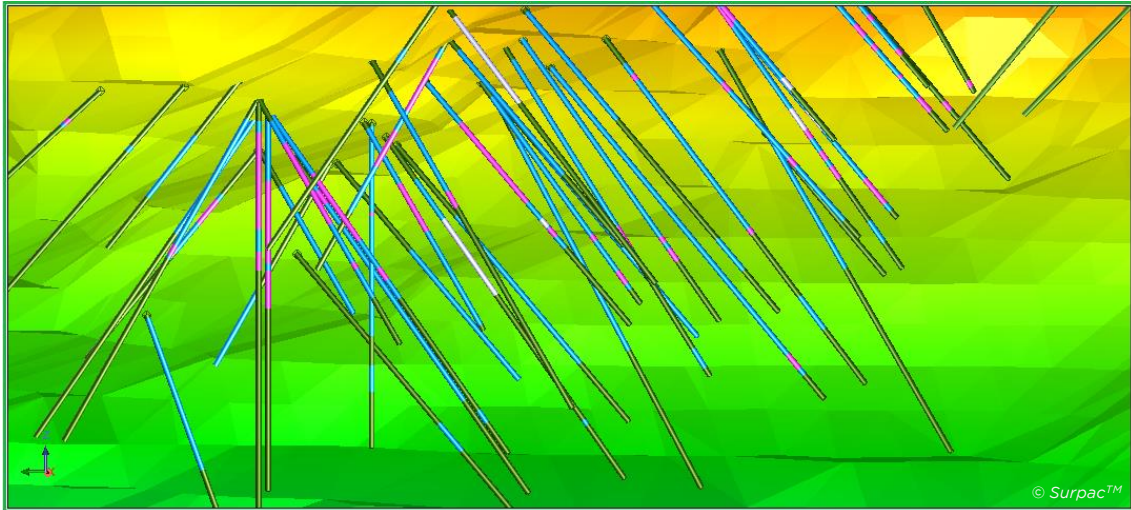


Figura 35. Representación de los sondeos en función del contenido en plata

Como se explicó con anterioridad, existen varios dominios dentro del depósito que delimitan diferentes tipos de mineralizaciones en función de la ley de plata que posea cada zona.

Estas zonas se encuentran registradas en el paquete de sondeos y pueden mostrarse por pantalla, accediendo a la base de datos de los sondeos una vez estén implementados en Surpac, y accediendo al apartado “*Drillhole display styles*” de la base de datos, donde se selecciona la tabla muestras, y en su apartado dominio se ven las diferentes zonas acotadas por colores.

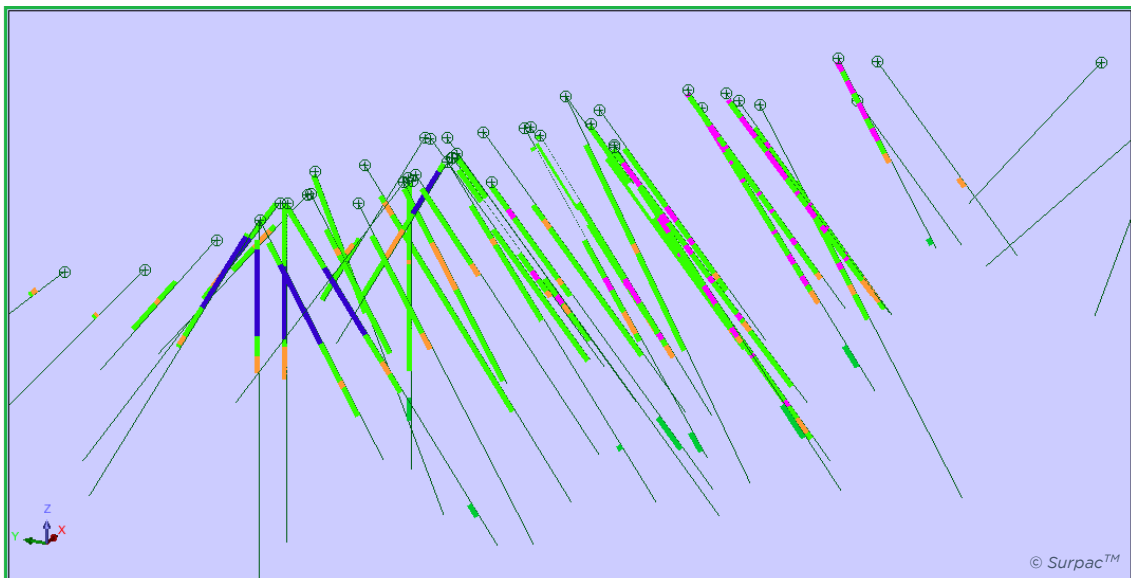


Figura 36. Representación de los sondeos en función del dominio que atraviesan

Observando la leyenda, se puede ver cada zona representada en pantalla:

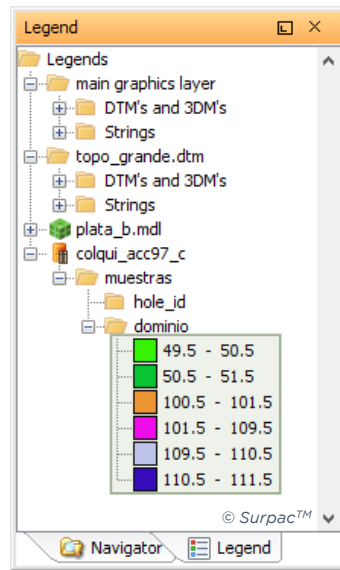


Figura 37. Leyenda de los dominios

7.9. Creación de los dominios

Para poder trabajar posteriormente con zonas específicas de la mineralización (dominios), en primer lugar, se deberán acotar a partir de los datos de los sondeos.

Para ello, se procederá a la creación de planos (*Planes* → *Quick planes*), estableciendo previamente varios parámetros a tener en cuenta para que la visualización sea óptima para el trazado de las polilíneas que conformarán los cuerpos mineralizados.

En este caso, y basándose en las coordenadas X (los cortes serán del tipo *easting* → *looking east*) aproximada del comienzo y final de la zona de influencia, y la distancia entre intervalos, saldrá un conjunto de planos del siguiente estilo:

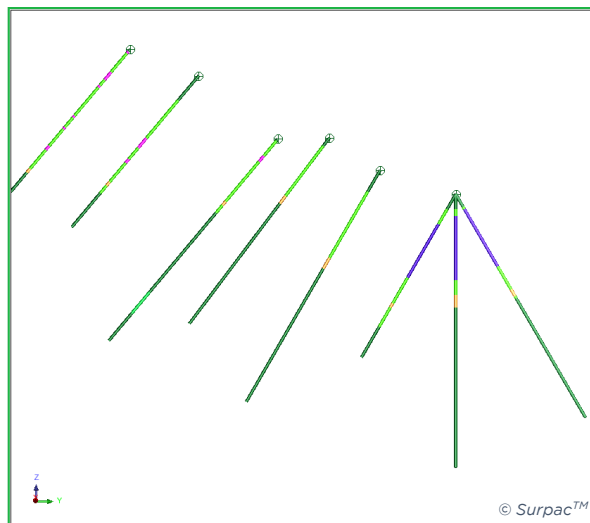


Figura 38. Representación de un plano de corte del grupo de sondeos

Una vez generados los cortes, y empleando la herramienta “*2D planes mode*”, se procederá a acotar los diferentes dominios mediante el uso de polilíneas, generando para cada dominio una nueva capa sobre la que se trazarán dichas polilíneas, para albergar un cuerpo *.dtm* una vez hayan sido todos los sondeos delimitados.

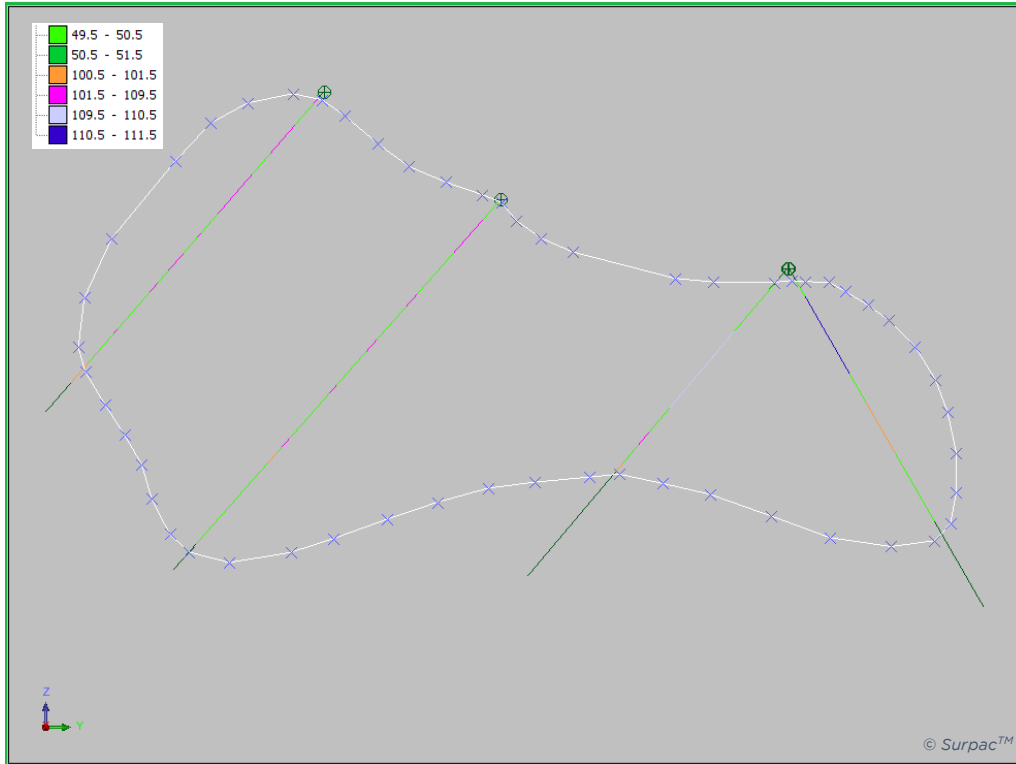


Figura 39. Polilínea generada acotando los sondeos del dominio 50

Saliendo de la vista por planos, se podrá observar el conjunto de polilíneas creadas para delimitar el cuerpo, que se creará a continuación.

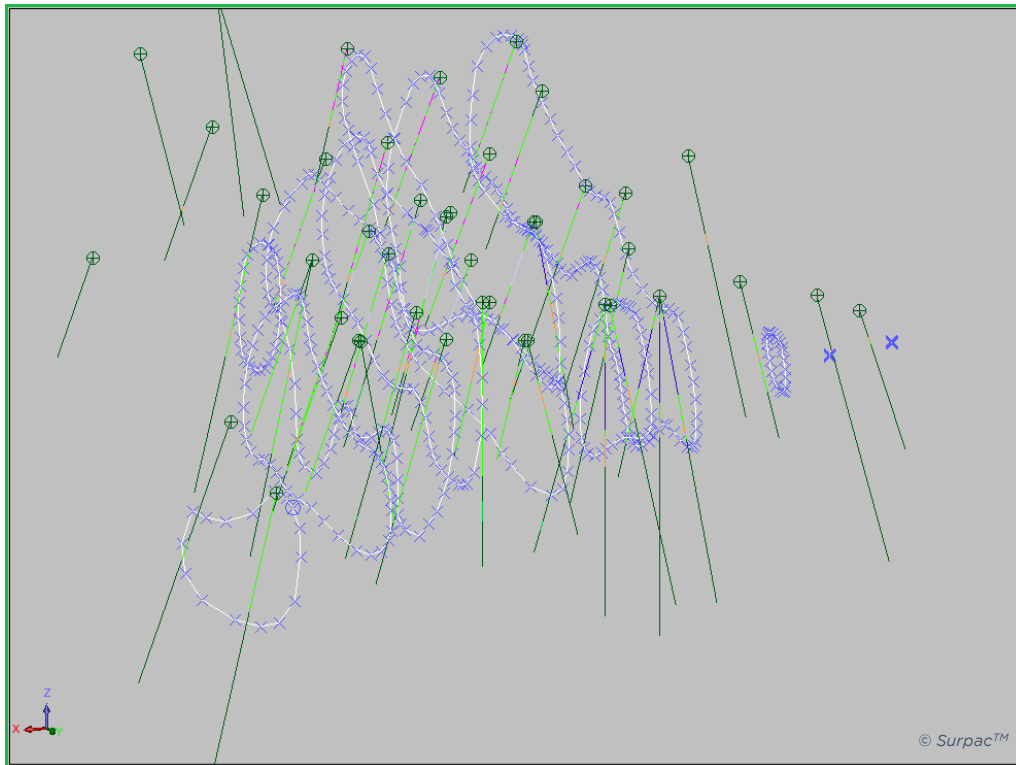


Figura 40. Conjunto de las polilíneas que conformarán el sólido del dominio 50

Una vez se cierran los sondeos, y se les aplica a las polilíneas la herramienta "smooth", para suavizarlas y ayudar a que se realice una mejor triangulación, se observarán de la siguiente forma:



Figura 41. Polilíneas tras el aplicado de "smoothing" o suavizado

Para realizar un sólido a partir de este conjunto de líneas, se debe acceder a *Solids* → *Triangulate* → *Between segments* (indicando *Object: 7*; *Trisolation: 1*)

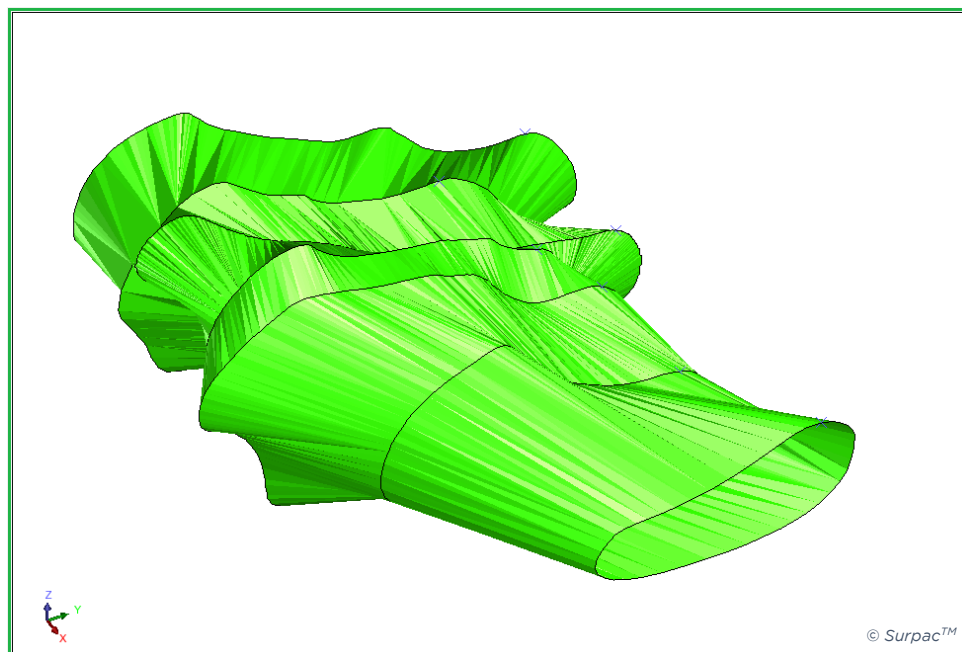


Figura 42. Sólido generado correspondiente al dominio 50

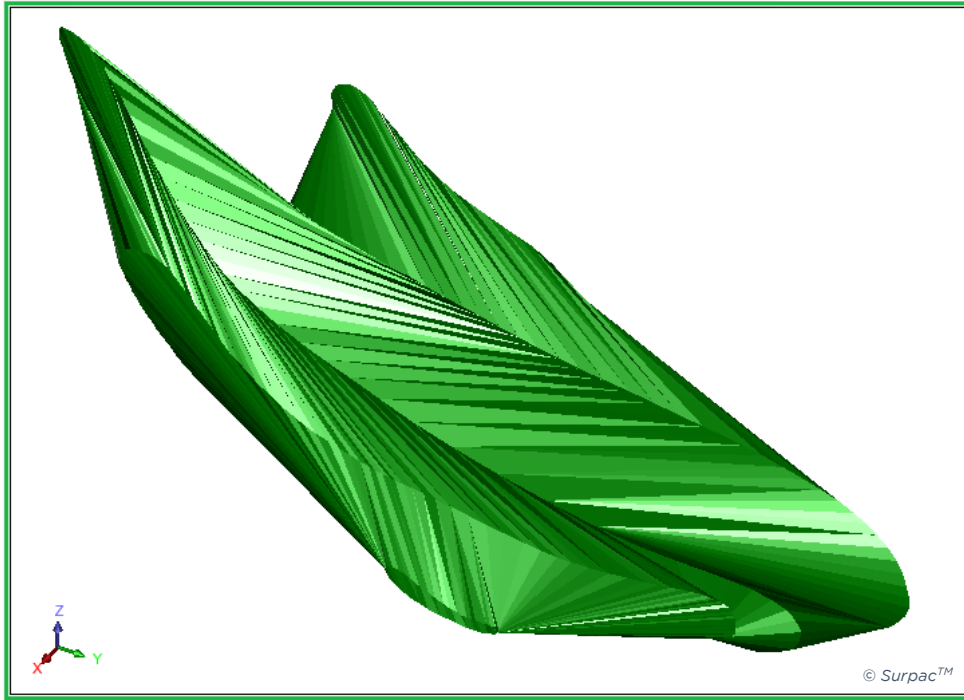


Figura 43. Sólido correspondiente al dominio 51

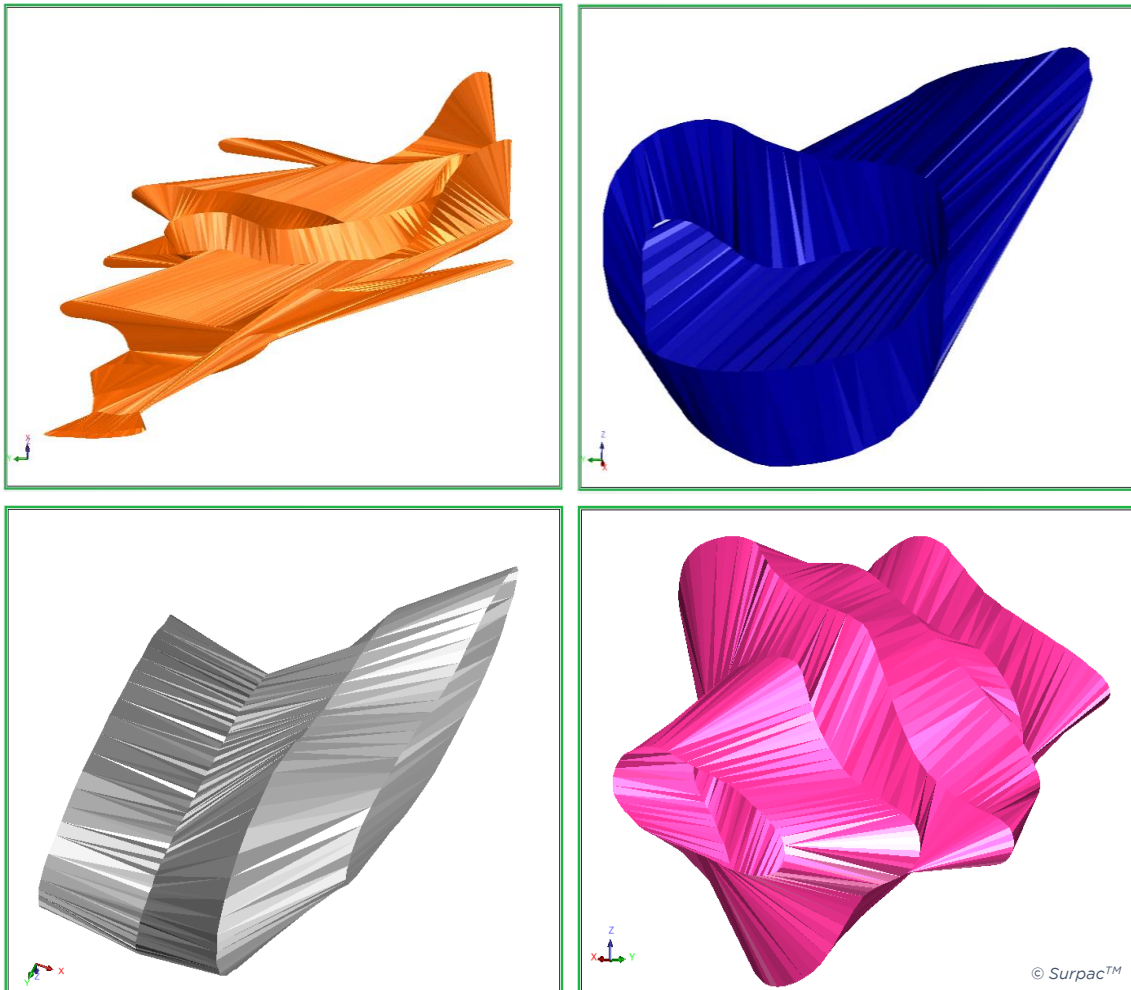


Figura 44. Sólidos generados correspondientes a los dominios 101 (naranja), 111 (azul), 110 (gris) y los lentejones de alta ley (102 a 109) agrupados en un sólido (rosa)

Si se desglosan los lentejones de alta ley, los cuerpos quedarían de la siguiente forma:

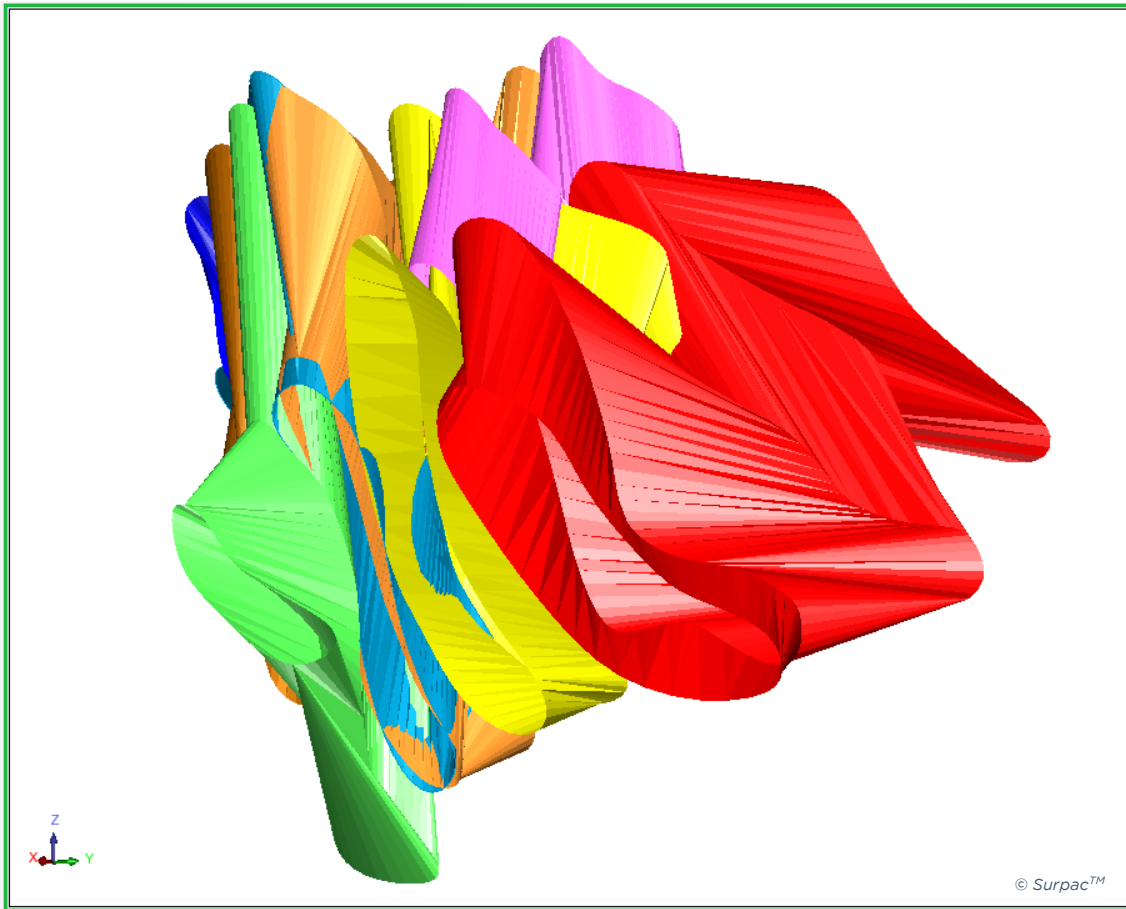


Figura 45. Representación de los lentejones de alta ley por separado

El siguiente paso, una vez generados los sólidos, será cerrarlos, ya que en caso contrario no se podría trabajar con ellos a la hora de tomar datos de volúmenes, por ejemplo. Para ello, se deberá acceder a *Solids* → *Validation* → *Solids repair*

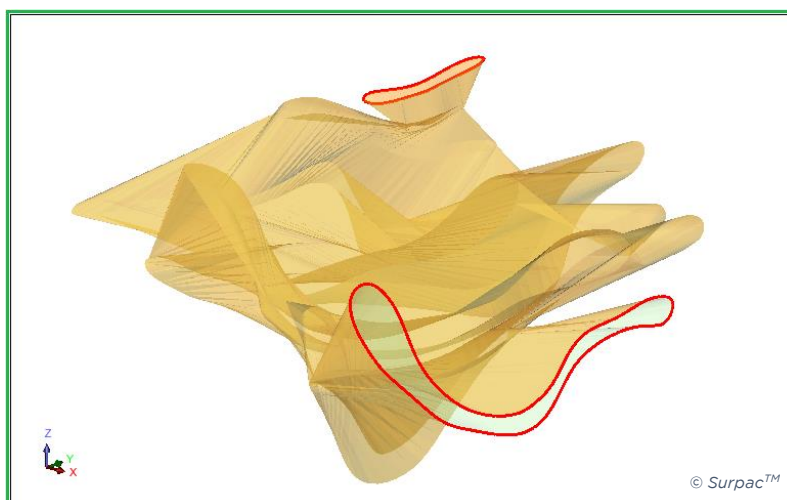


Figura 46. Ventana de reparación de sólidos, con las anomalías resaltadas

Como puede observarse en la *figura 47*, el propio software detectará las anomalías que pueda presentar el sólido, destacándolas para su acondicionamiento.

Dentro de la ventana *Solids repair*, se hará clic en *Delete invalid triangler then fill holes for selected group(s)*, dentro del área *Repairs*. Una vez se observa que el sólido haya sido correctamente cerrado, se deberá guardar la capa actualizada, y el software permitirá al usuario salir de esta pestaña de reparaciones.

A partir de este momento, ya se podrán calcular los volúmenes de los sólidos, accediendo a *Solids* → *Solid tolos* → *Report volume of solids*:

Layer Name	Volume	Surface area
dominio_101_dtm	1417540.19	346972.68
dominio_110_dtm	439634.90	48478.86
dominio_111_dtm	228154.21	23582.25
dominio_50_dtm	8659886.69	367922.46
dominio_51_dtm	1571875.04	136917.07
dominios_102_109_dtm	2892810.65	148596.79

Figura 47. Tablas informe de los volúmenes de cada cuerpo mineralizado del yacimiento

Una vez se tiene el conjunto de cuerpos que conforman el yacimiento mineralizado de Colquipucro, se pueden abrir todos para observar cómo se distribuyen entre sí:



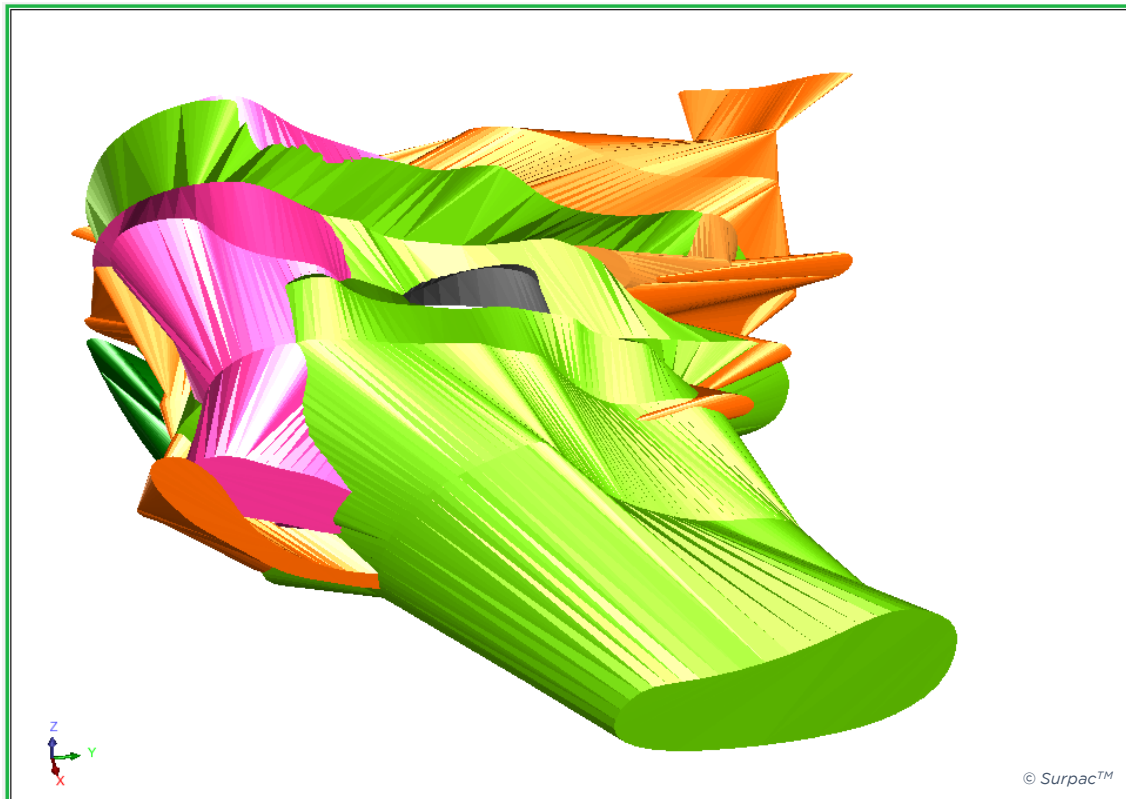


Figura 48. Conjunto de cuerpos mineralizados de Colquipucro, digitalizados en Surpac

7.10. Modelo de bloques

La siguiente fase a realizar con el software será la creación de un modelo de bloques que albergue posteriormente toda la información de los sondeos, para poder así crear unos composites con los que aplicar geoestadística.

En primer lugar, se debe acotar la zona tridimensional de interés, a partir de las coordenadas. Una vez se conocen las mismas, se accederá a *Block Model* → *Block Model* → *New / Open*, donde se desplegará una ventana para darle nombre al modelo.

En la siguiente ventana, se deberán introducir las coordenadas mínimas y máximas, así como el tamaño de bloques que se desee. El apartado *sub blocking* se refiere a la opción de crear bloques de menores dimensiones en zonas de intersección con otras superficies, como por ejemplo con el terreno. Es una herramienta útil cuando el tamaño de los bloques es relativamente grande en relación con el área de estudio. El modelo será creado para poder interpolar únicamente aquellos bloques que se encuentren dentro de los cuerpos mineralizados, por lo que las coordenadas que el software pide deberán introducirse de forma que puedan albergar todos los cuerpos que participen en la interpolación:

Block Model Geometry						
Min Coordinates	Y	8847580	X	332450	Z	3973
Max Coordinates	Y	8848140	X	332912.5	Z	4338
User block Size	Y	2.5	X	2.5	Z	2.5
Min. block Size	Y	2.5	X	2.5	Z	2.5
Rotation	Bearing	0	Dip	0	Plunge	0

Block Summary	
Total No. Blocks	43827
Storage Efficiency %	99.27

© Surpac™

Figura 49. Características del modelo de bloques creado

Otra opción que aparece es *rotation*, mediante la cual se puede establecer un rumbo y buzamiento al modelo de bloques. Útil en minería de carbón, donde las capas están sometidas a continuos pliegues y fallas. En este caso, no establecerá ningún rumbo ni buzamiento al modelo elegido.

En la siguiente pestaña, el software calcula el número de bloques que serán creados a partir de la configuración establecida en la ventana anterior. En total, se trabajará con un número aproximado de 14 millones de bloques.



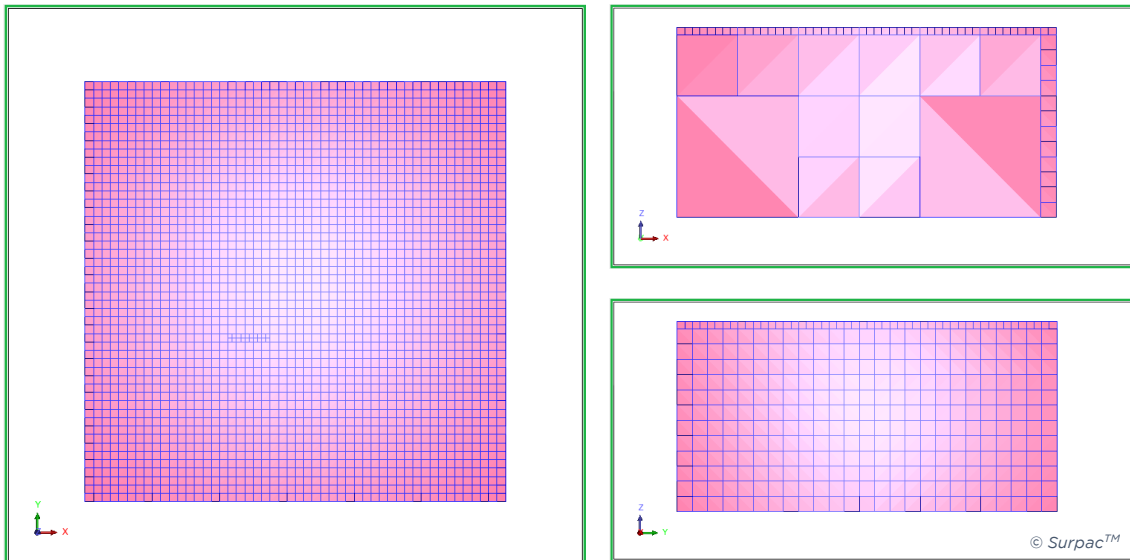


Figura 50. Diferentes vistas del modelo de bloques creado

La interpolación va a aplicarse únicamente a aquellos bloques que se encuentren dentro de los sólidos mineralizados (exceptuando los de los dominios 50 y 51), por lo que, al modelo, se le aplicará un *Constraint* de tipo 3DM en el que se seleccionarán los cuerpos en formato .dtm creados anteriormente para el filtrado de bloques. En este caso, se creó una única capa que albergase los cuerpos que entrarían en la interpolación (101, 110, 111 y el conjunto 102 – 109).

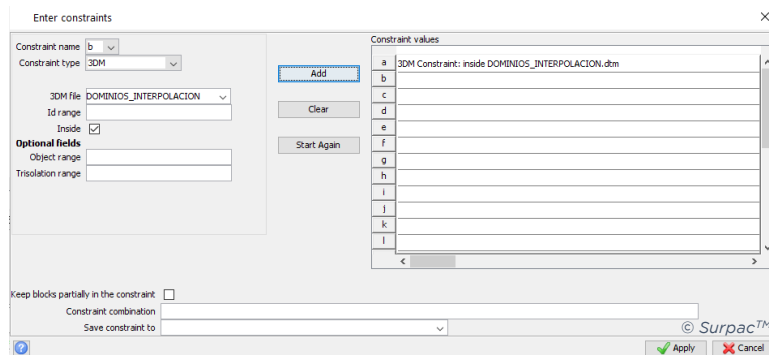


Figura 51. Proceso de creación del filtrado de bloques de tipo 3DM

Como se puede observar en la anterior figura, debe especificarse que los bloques que se filtren y sean representados sean aquellos que se encuentren dentro de los cuerpos mineralizados (recuadro *Inside*) El resultado que se obtiene por pantalla será el siguiente:

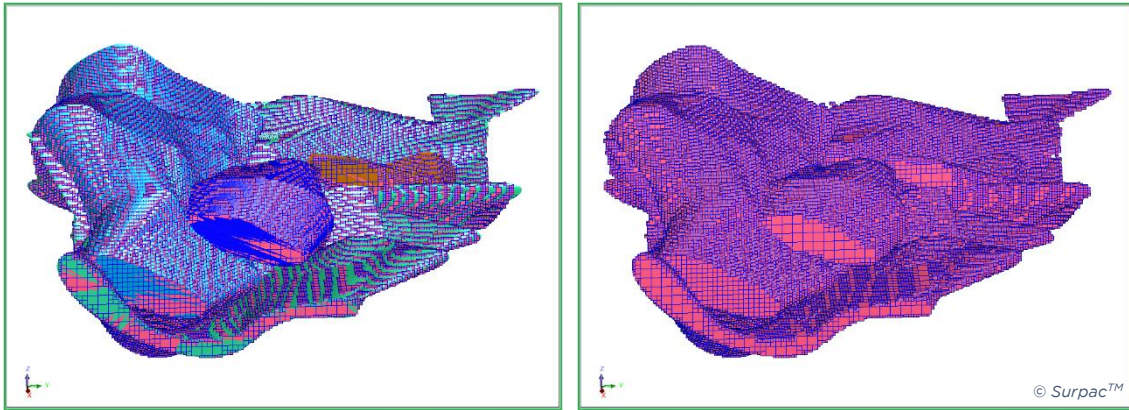


Figura 52. Modelo de bloques filtrado a los cuerpos mineralizados

Como se mencionó en párrafos anteriores, la interpolación será aplicada únicamente a este conjunto de bloques, luego este *constraint* que se ha realizado debe ser guardado como un nuevo modelo de bloques, que estará ligado al anterior, pero cuando se abra en Surpac únicamente mostrará los bloques propios del filtrado, marginándolos por completo del conjunto creado anteriormente.

Una vez se crea el modelo, deberán crearse los *composites* que se utilizarán para la interpolación posterior. Los *composites* son nubes de puntos que recogen la información numérica de cada tramo de cada sondeo, en este caso, ley de plata.

Para este proyecto, se crearán varios *composites*, ya que la empresa proporcionó datos de sondeos correspondientes a diferentes zonas del área de estudio. Así, en la carpeta “*sample*”, se puede observar como en la última columna se introdujo un “*Domain ID*”, marginando los sondeos por zonas. De esta forma, existen 13 dominios diferentes (50, 51, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110 y 111), cada uno con distinta ley predominante, siendo varios de ellos lentejones de alta ley (102 – 109).

En último lugar, se añadirán al modelo de bloques creados dos atributos, que serán la densidad de los bloques y el contenido en plata. Para ello, se debe acceder a *Block model* → *Attributes* → *New*:


Atributos						
	Name	Type	Decimals	Background	Description / Expression	© Surpac™
1	aans_100	Real	2	0.00	Average anisotropic distance sample radio ...	
2	adns_100	Real	2	0.00	Anisotropic distance nearest sample radio ...	
3	ag_restringido	Real	-	-99.000		
4	densidad	Real	-	2.500		
5	idw_100	Real	2	0.00	Ley para radio 100	
6	n_100	Integer	-	0	Num muestras radio 100	
7	plata	Real	-	-99.000		

Figura 53. Atributos creados para el modelo de bloques

Los atributos que se utilizarán para interpolar se explicarán en el apartado de la interpolación, a continuación.



7.11. Interpolación

Como se explicó anteriormente, la interpolación permite la obtención de la distribución de la materia mineral a lo largo del área de estudio mediante la aplicación de métodos estadísticos a través de los *composites* realizados a los sondeos.

En este caso, y dado que los sondeos proporcionados se encuentran divididos en dominios, se compositará (homogeneizará) separadamente a raíz de esto, para posteriormente visualizar los bloques según zonas de interés, en relación con la ley de plata contenida en cada una.

En Surpac, existen varios métodos de compositado (homogeneizado):

- *Downhole* (sondeo)
- *Bench elevation* (elevación de banco)
- *By grade constraints* (restricciones en base a la ley)
- *By geological constraints* restricciones en base a la geología)
- Modo gráfico

Para estudios estadísticos, los métodos empleados son *downhole* y *bench elevation*, aplicándose en este estudio el primero, al extraer la información de los sondeos.

Para aplicar el compositado, se deben establecer ciertos parámetros:

- Longitud del *composite*
 - Longitud de las muestras de *composites* que se desean crear
- Porcentaje mínimo de muestra
 - Debe especificarse un porcentaje mínimo de muestra del *composite*.
 - Los *composites* deben ser clasificados
 - Para porcentajes iguales o mayores al mínimo: *string n*
 - Para porcentajes menores que el mínimo: *string (n+1)*
- Anular muestras negativas
 - Estas muestras deberán ser tratadas como nulas o de valor "0" en el software



Los composites, una vez realizados y divididos por partes en función del dominio, aparecen por pantalla de la siguiente forma:

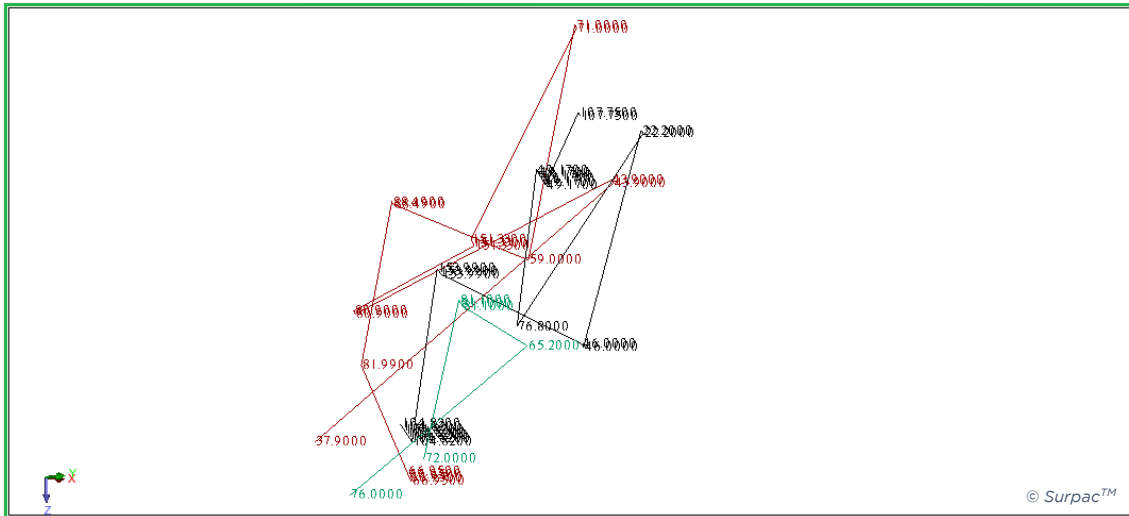


Figura 54. Composites del contenido en plata de un grupo de sondeos

Para observarlos de forma escalar, como se muestra en la figura, se deberá acceder a *Display* → *Point* → *Attributes*

Como se mencionó en el apartado anterior, se introdujeron en el modelo de bloques a interpolar una serie de atributos, utilizados en la parte geoestadística del programa.

Los atributos usados serán los siguientes:

- *idw_100*: ley de plata.
- *aans_100* (*average anisotropic distance to sample*): atributo que almacena la distancia anisotrópica media a todas las muestras.
- *adns_100* (*anisotropic distance to nearest sample*): atributo que almacena la distancia anisotrópica hasta la muestra más cercana.
- *n_100*: número de muestras que el software toma para interpolar dentro del radio de búsqueda que se especifique.

Para interpolar, se deberá acceder al apartado *Block model* del menú, y entrar en *Estimation*, donde se seleccionará la opción *Inverse distance*, que será el método de interpolación, *IDW3* (*Inverse Distance Weighting*, exponente 3).

En la pestaña que se muestra a continuación se especificarán los atributos donde se almacenarán las diferentes mediciones del software, así como la fuente de los datos que el programa tomará para interpolar. En este caso, la fuente será



un conjunto de archivos de tipo *string* (.str), correspondiente a los composites de cada dominio. El apartado *constrain data* se utilizará para ceñirse, en cada interpolación que se realice a cada cuerpo, al dominio donde estén contenidos los bloques de interés.

Los atributos que el programa pide serán aquellos que se crearon con anterioridad, es decir, aquel que se desee que albergue la ley en plata, la distancia anisotrópica a la muestra más cercana, la media de la distancia anisotrópica a todas las muestras del radio de búsqueda, y el número de muestras tomadas.

Una vez se han completado los campos de esta ventana, quedaría así:

Attribute to Fill	Description Field	Attribute Name	Anisotropic dist to nearest sample	Average anisotropic dist to samples	Number of samples
1	idw_100	1	adns_100	aans_100	n_100

Figura 55. Interfaz de la interpolación.

El siguiente paso de la interpolación será uno de los más importantes, ya que de ello depende la precisión que se obtenga en el modelo. A partir de los composites calculados desde los sondeos, y filtrando por cada dominio geológico, se realizan estudios geoestadísticos que permiten calcular el elipsoide de búsqueda a emplear en la interpolación, uno por cada dominio o sólido.



Dominio	Buzamiento	Dirección
102	-35	5
103	-35	-20
104	-30	5
105	-22.5	15
106	-30	-15
107	-37.5	-2.5
108	-45	7.5
109	-50	2.5

Tabla 9. Estrategia de búsqueda de los lentejones de alta ley

Dominio	Buzamiento	Dirección
101	5	60
110	-25	0
111	5	0

Tabla 10. Estrategia de búsqueda de los dominios 101, 110 y 111

Dominio	Buzamiento	Dirección
50	0	0

Tabla 11. Estrategia de búsqueda del dominio 50 de baja ley

A partir de los datos previstos, y atendiendo a la *figura 13*, proporcionada por Tinka, se estimará, como estrategia de búsqueda del elipsoide, o anisotropía, los datos mostrados en la tabla anterior.

Asimismo, se deberán de estimar los parámetros concernientes a los radios del elipsoide. Un elipsoide, al ser una figura tridimensional, posee tres radios, el mayor, el semi-mayor, y el menor (*major, semi-major y minor*, respectivamente). En el programa, estos radios deberán indicarse como razones, de la siguiente forma: mayor/semi-mayor y mayor/menor.

El número mínimo de muestras que se tomarán será de 1, y el máximo de 12 para cada interpolación.

En el caso de la formación masiva con dominio 50, se estima oportuno establecer un radio de búsqueda de 50 metros y, al no haber anisotropía, se le dará prioridad



a la búsqueda horizontal, por lo que el radio de búsqueda vertical será de 5 metros.

En el caso del resto de formaciones, el radio de búsqueda será de 100 metros al existir anisotropía, y ser cuerpos no excesivamente grandes, además de que al interpolar se realizarán *constraints* de tipo 3DM, por lo que los bloques afectados por la interpolación estarán todos dentro de cada cuerpo.

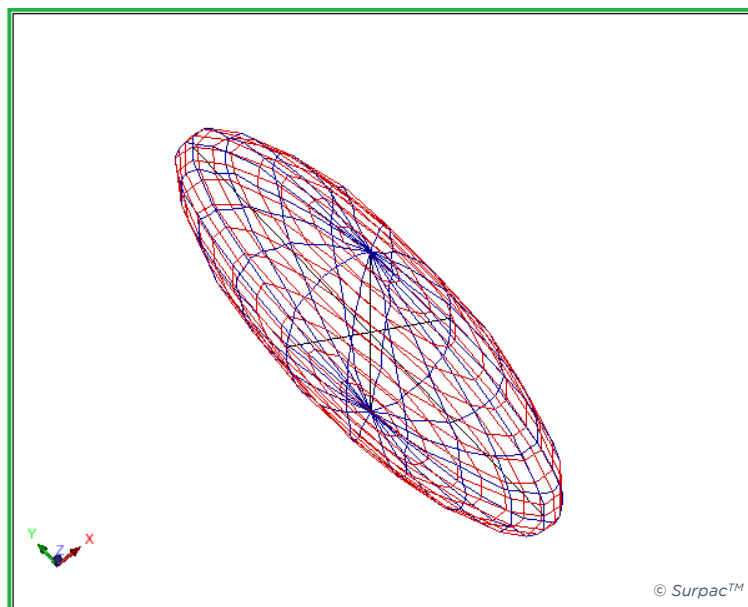
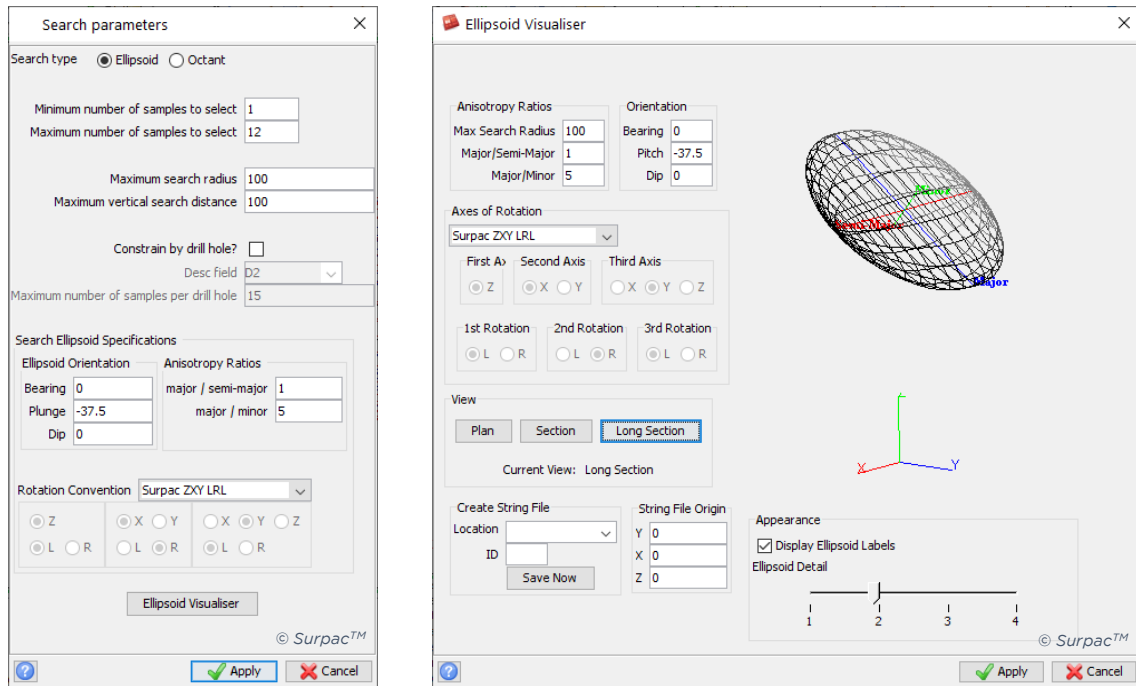


Figura 56. Interfaz de introducción de la anisotropía del elipsoide de búsqueda

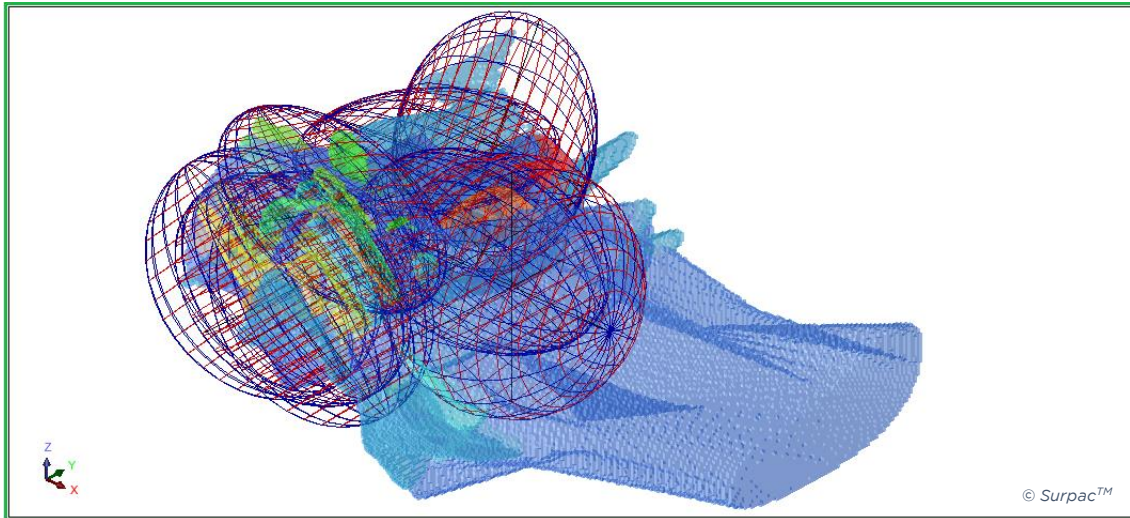


Figura 57. Elipsoides de búsqueda de cada cuerpo desplegados sobre sendo dominio de interpolación

La siguiente ventana de interpolación será donde se estime el exponente del cálculo (3) y donde se guardará el archivo con todos los datos aportados al software para que proceda con los cálculos.

Haciendo clic en *Apply*, el programa comenzará con los cálculos estadísticos y resolverá la interpolación.

La interpolación se repetirá para cada dominio de los realizados en formato .dtm, menos el 51, ya que se trata de una zona de baja ley, además de no tener gran extensión, como es el caso del dominio 50.

7.12. Visualización de resultados

Una vez se aplica la interpolación, se puede abrir el modelo de bloques y realizar “constraints” para ver los resultados de los cálculos estadísticos.”

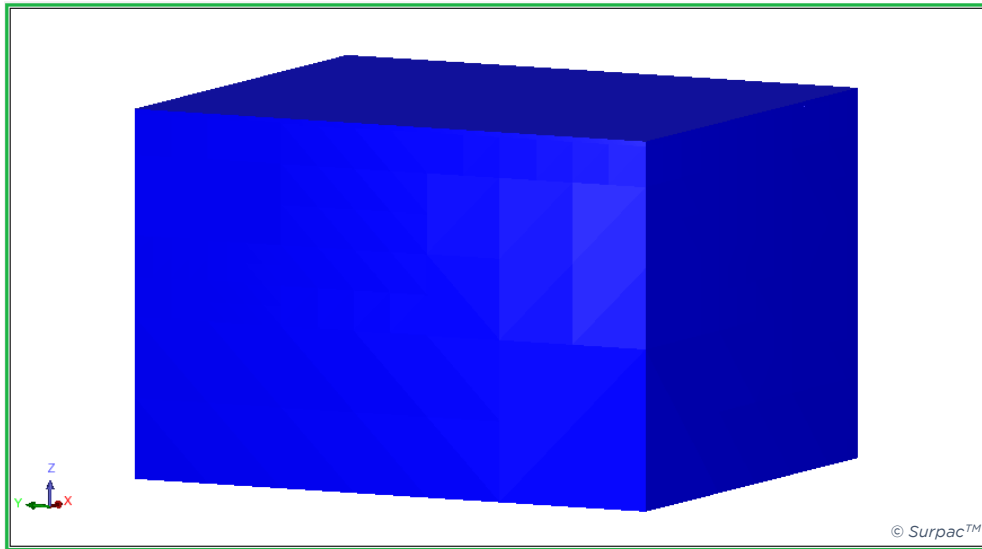


Figura 58. Representación del modelo de bloques tras la interpolación

A continuación, se muestra el modelo una vez se aplica el *constraint* mediante el cual únicamente se mostrarán los bloques con un contenido en plata superior a cero tras los cálculos. Para ello, se debe acceder a la pestaña inferior del modelo de bloques, y hacer clic en *New constraint*.

Una vez dentro, en la ventana se seleccionará el tipo de *constraint* a realizar. En este caso, como se quieren mostrar bloques, será del tipo “*Block*”, y se establece la variable que se desea evaluar y su valor de fondo, en este caso la variable es “*idw_100*”, que es a la que se aplicaron los cálculos geoestadísticos para hallar la ley de plata, y el valor mínimo de bloque que poseerá será 0. Se pulsa en “*Add*”, y finalmente, “*Apply*”:

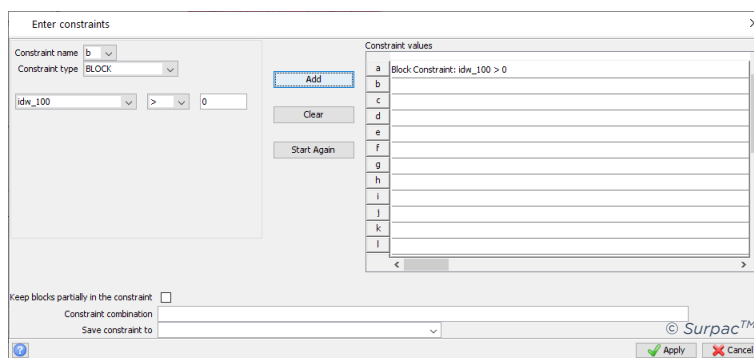


Figura 59. Interfaz para la realización del constraint

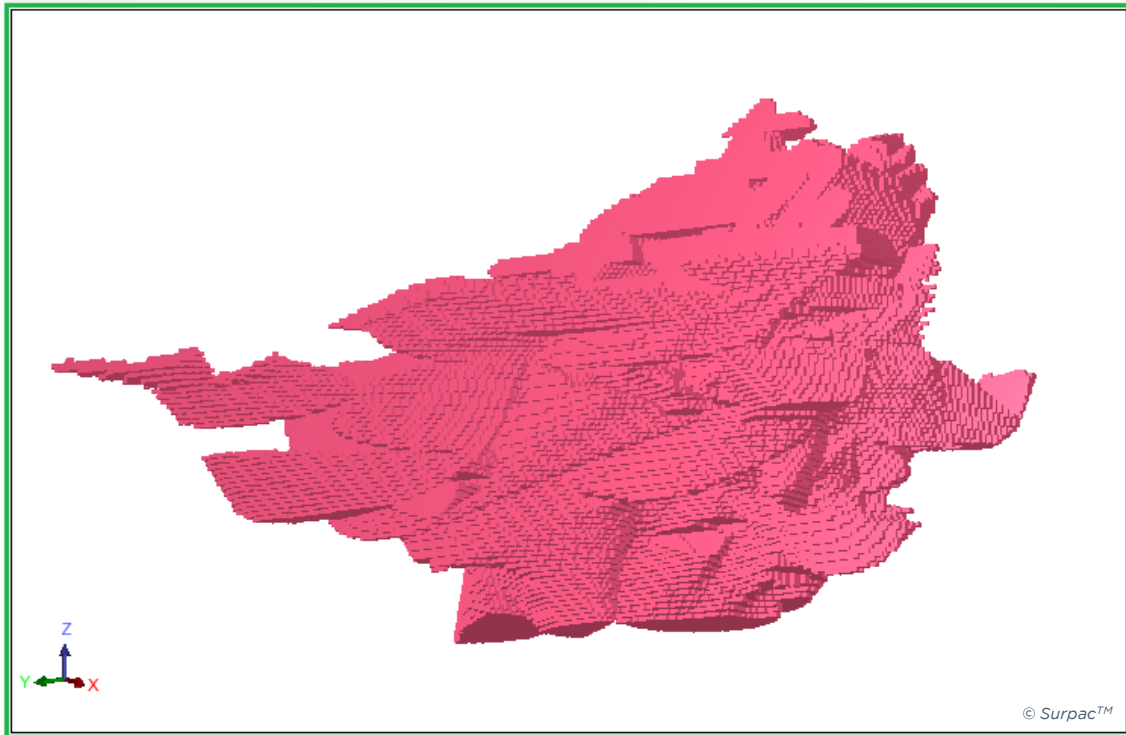


Figura 60. Representación de todos los bloques con contenido en plata

Para una mejor comprensión de la mineralización del depósito, se pueden realizar cortes planares con una herramienta del Surpac llamada “Quick planes”. Dichos cortes pueden ser verticales, horizontales u oblicuos.

Para realizar un conjunto de planos de corte, se deberá especificar la orientación, el inicio y fin de los cortes, y la distancia entre planos. En primer lugar, se realizará un grupo de cortes este – oeste (*easting*), con un ancho de corte de 10 metros:

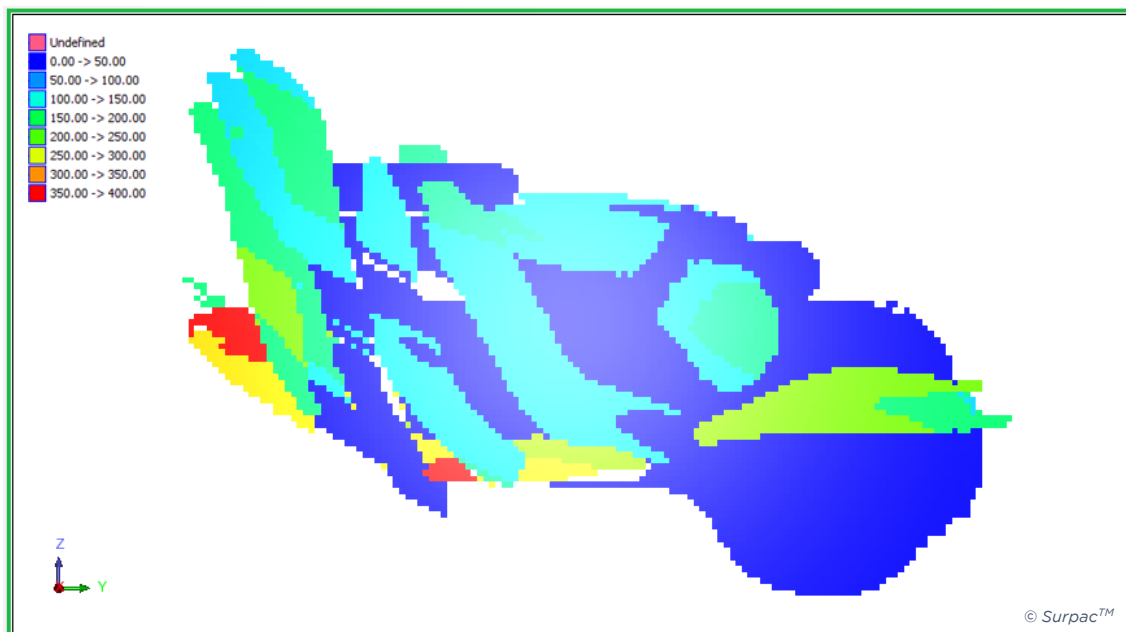


Figura 61. Representación de los bloques con color según contenido en plata

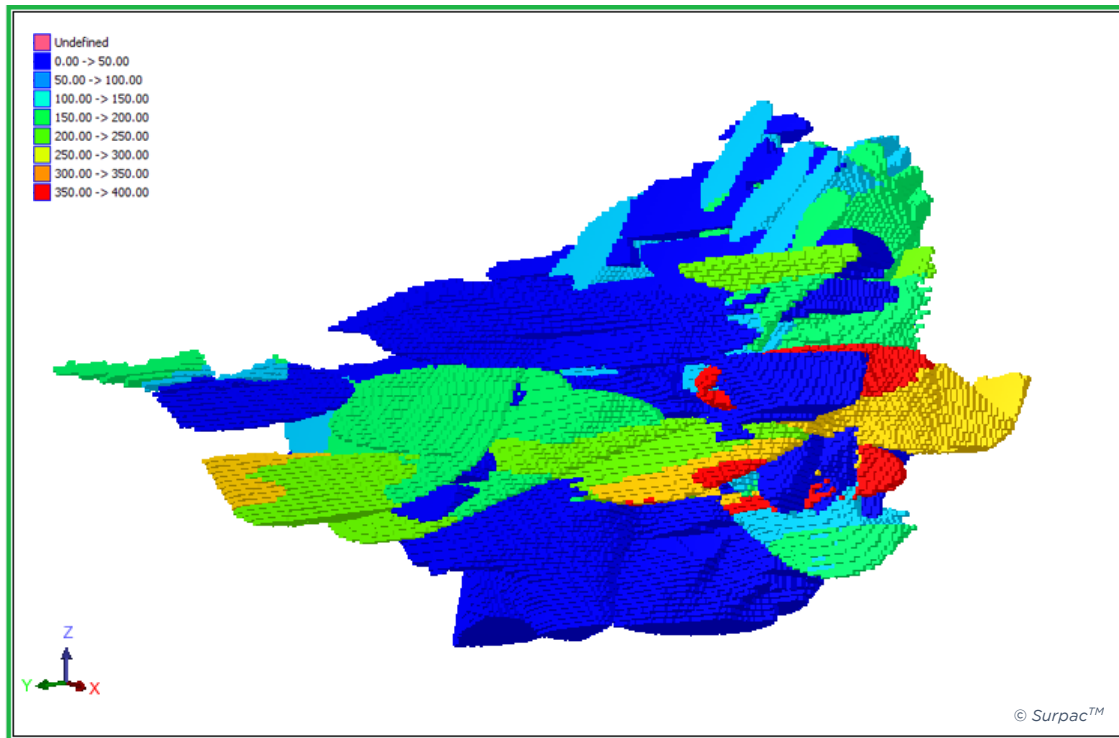


Figura 62. Representación de uno de los cortes de tipo easting realizados

Como se puede observar en este corte, existe una zona de altas leyes en plata que, atendiendo a la leyenda desplegada previamente, poseería leyes de entre 250 y 400 g/t en plata.

Si se abren los sondeos junto con este modelo interpolado, se puede observar cómo el software realiza los cálculos geoestadísticos en función del contenido que arrojen los sondeos, ya que se puede visualizar en la siguiente figura que en esa zona existen varios sondeos con lecturas de grandes leyes de plata:

Asimismo, también se puede comprobar que esta zona de altas leyes la alberga el sólido generado que juntaría los dominios 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108 y 109 que, como se explicó con anterioridad, se trata de lentejones de alta ley en plata, constituyendo las zonas de mayor mineralización e interés del yacimiento Colquipucro:

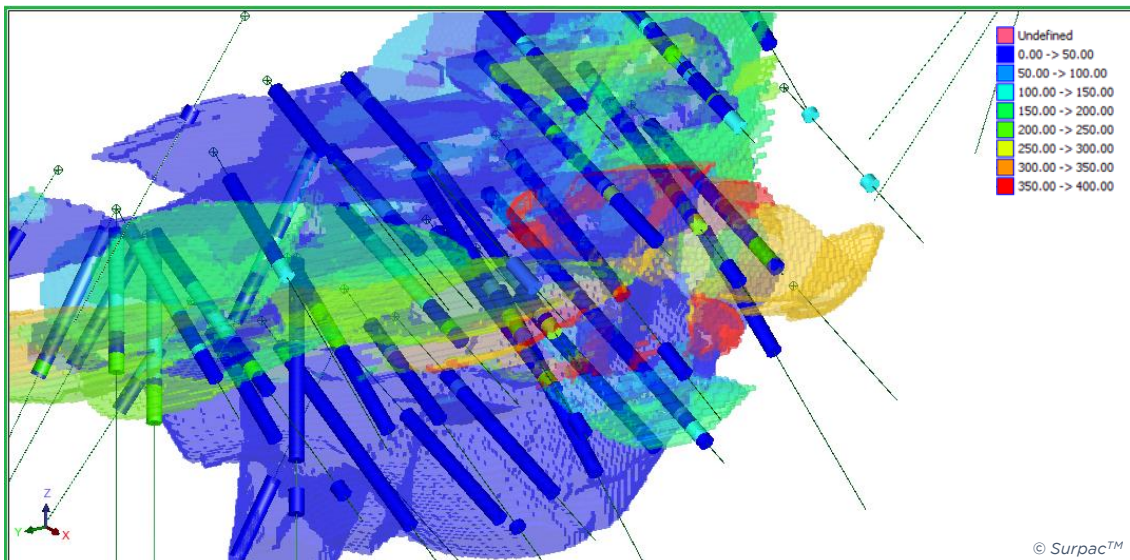


Figura 63. Representación de sondeos y cuerpos mineralizados con color según el mismo rango de leyes de la leyenda (g/t)

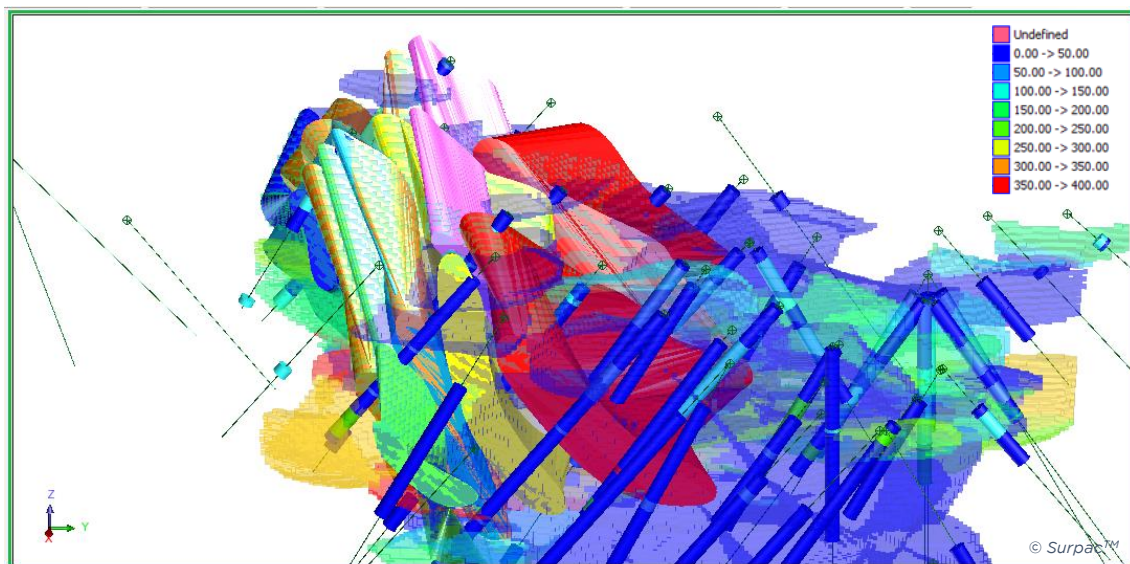


Figura 64. Lentejones de alta ley representados sobre el modelo interpolado

Los tres atributos auxiliares a la ley de plata se utilizan para la categorización de los recursos. Existen diferentes formas de utilizarlos; en este caso, se empleará el atributo n_100 para categorizar los recursos minerales, tras una inspección de la distribución de esta variable en la interpolación realizada. Sus intervalos serán los siguientes:

- $n < 10$ → Recursos indicados
- $n \geq 10$ → Recursos medidos

En este caso, de una densidad alta de muestras cercanas a un bloque podría deducirse una precisión de cálculos mayor que una zona donde no existen tantas muestras cercanas.

Si se elige la opción en el modelo de bloques de *Colour by attribute* y se establece como variable el atributo n_100, que ya se explicó que es el que alberga estos datos, el modelo se visualizaría de la siguiente forma:

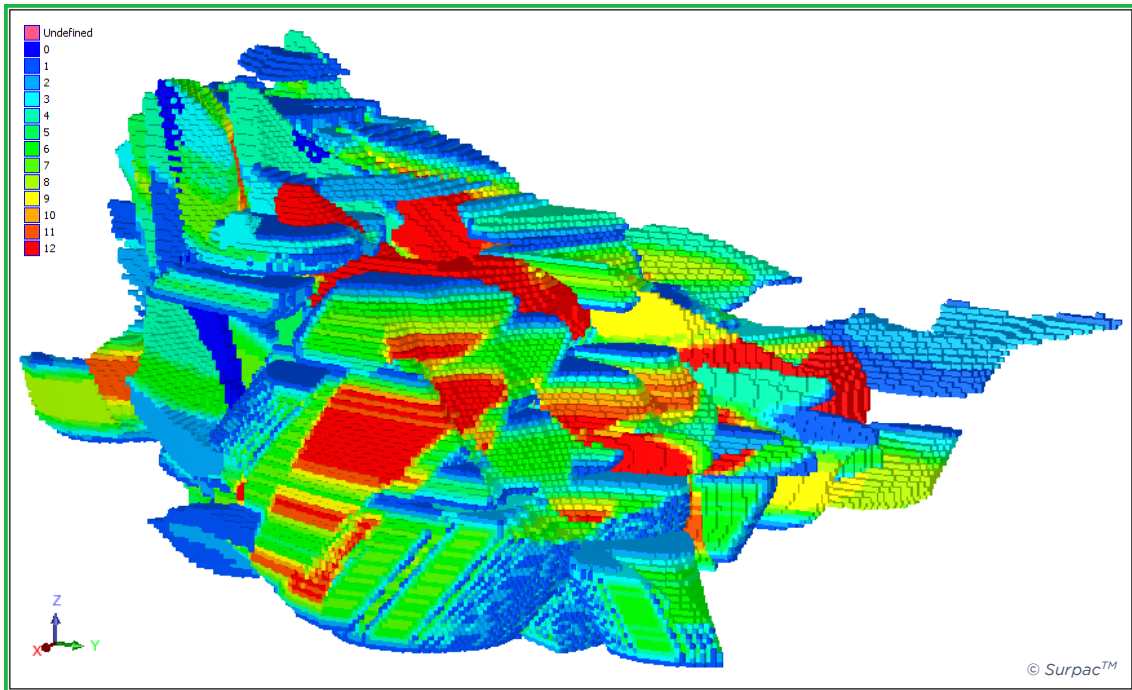


Figura 66. Modelo con color según el número de muestras tomadas para interpolar los bloques

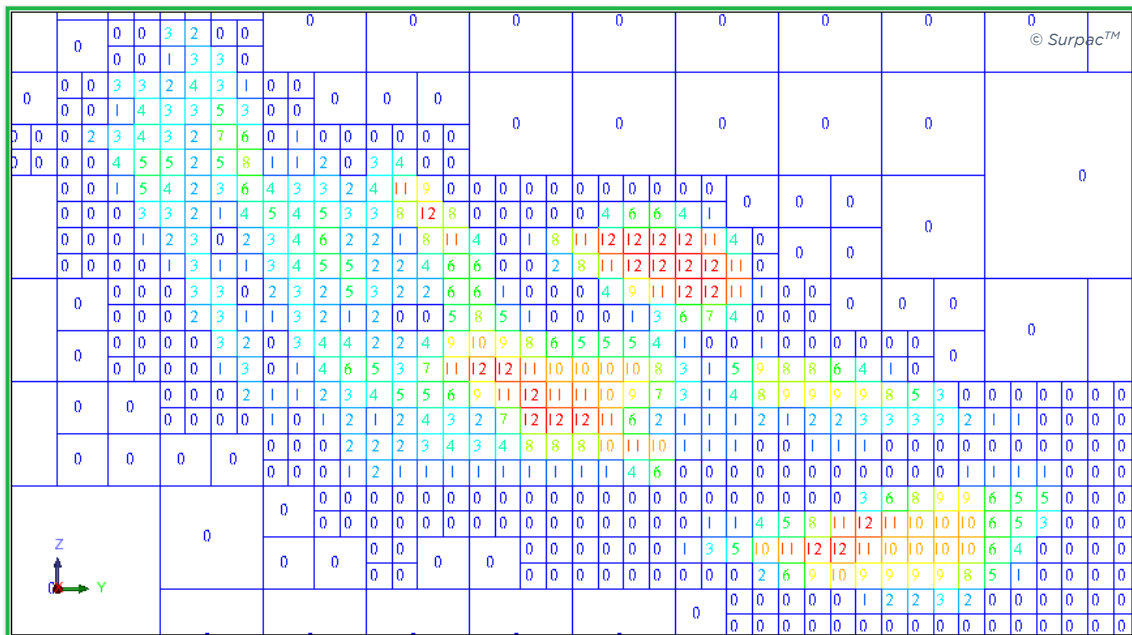


Figura 65. Sección del modelo interpolado donde se puede ver cada valor del atributo para cada bloque

Visualmente podrían establecerse las zonas con los distintos tipos de recursos, pero los datos precisos se obtendrán posteriormente, cuando se realice el *report* o informe del modelo.

Como se puede ver a simple vista, las zonas con mayor densidad de color rojo estiman que se tuvieron en cuenta un mayor número de muestras para realizar la interpolación, de lo que se deduce que haya habido mayor precisión en los resultados, y las zonas de tonos azulados son aquellas más alejadas de las muestras que se tomaron para aplicar geoestadística a esos bloques.

Realizando una restricción que muestre únicamente los bloques con más de 9 muestras tomadas para la medición, se obtendría el siguiente modelo:

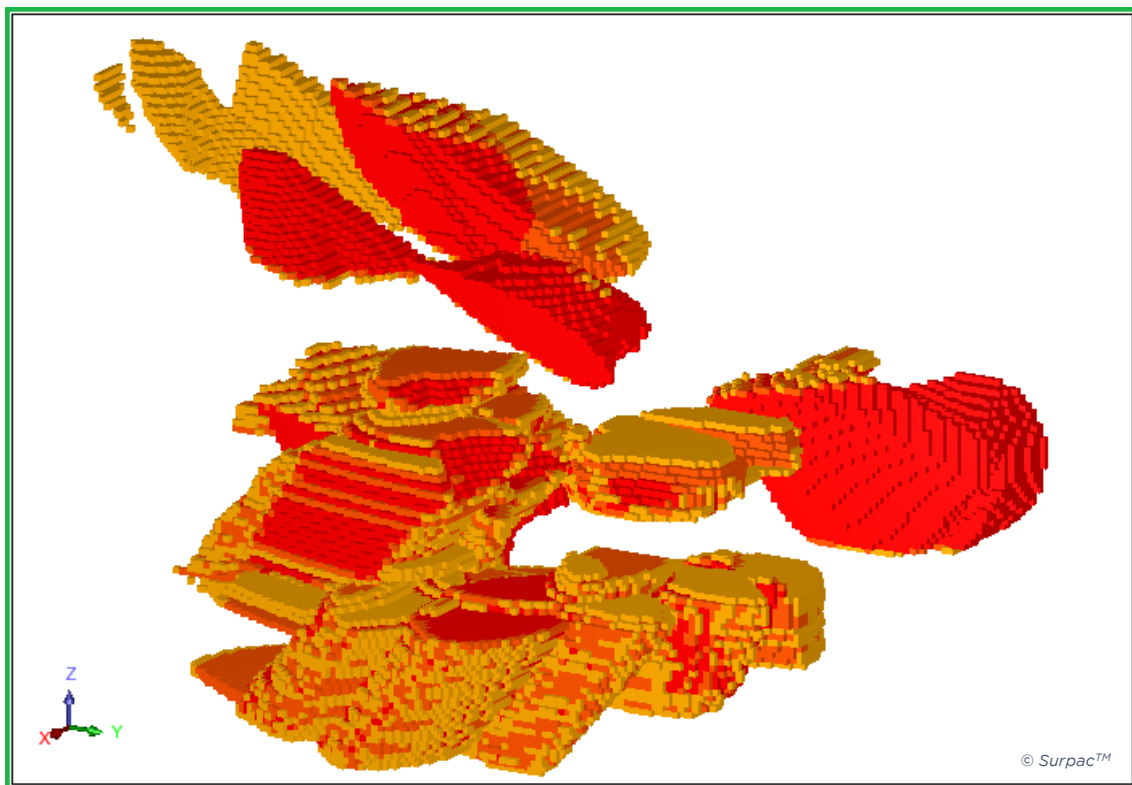


Figura 67. Bloques con más de 9 muestras tomadas para las mediciones

A continuación, se mostrará el modelo de bloques con color según las variables *adns* y *aads*, es decir, la distancia anisotrópica a la muestra más cercana, y la media de la distancia anisotrópica a las muestras de las que se tome información para cada bloque.

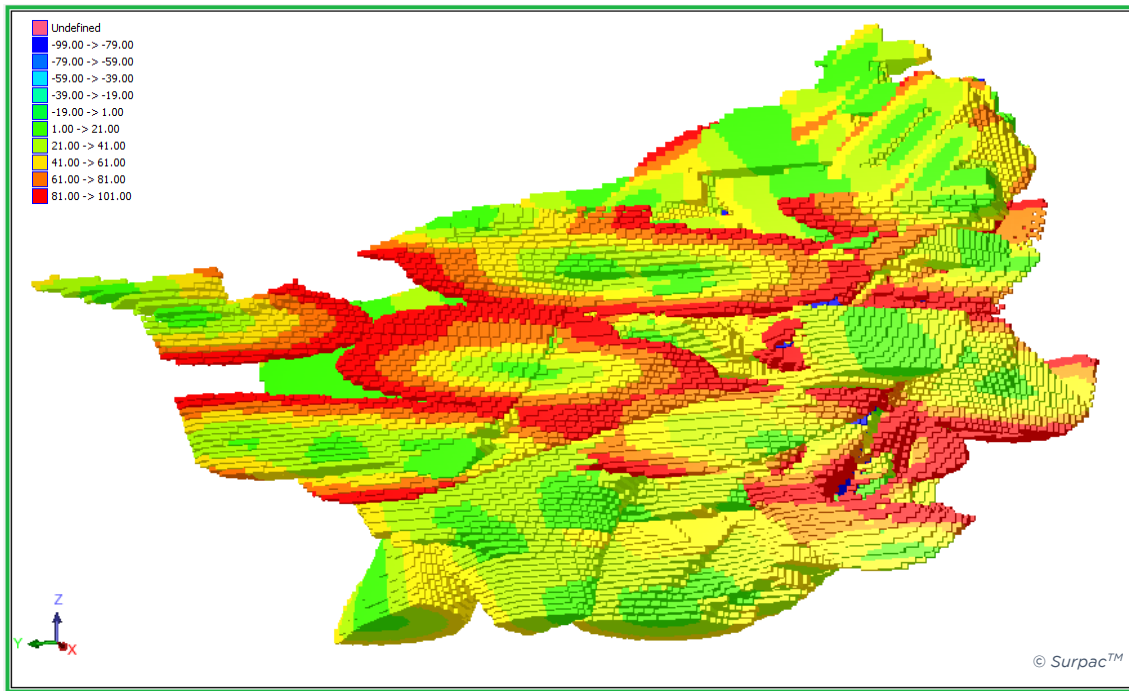


Figura 68. Color de bloques según la distancia anisotrópica a la muestra más cercana

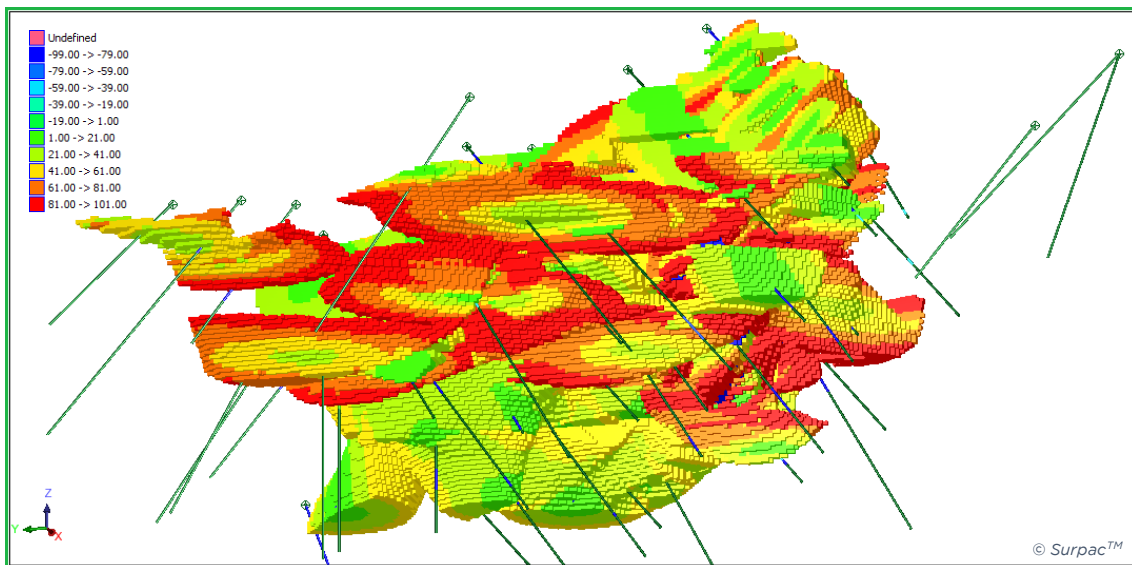


Figura 69. Color de bloques según la media de la distancia anisotrópica a las muestras tomadas para cada medición

Interpretando las figuras se puede deducir que, al igual que en el caso del modelo de bloques con color según las muestras de las que toma información; habrá más precisión en los casos donde los bloques se encuentren cerca de los sondeos. Por ello, para ambas variables (*adns* y *aads*), los tonos azules indican cercanía a muestras y, con ello, zonas susceptibles de ser parte de los recursos medidos, mientras que a medida que el color torna a rojizo las distancias, tanto a la muestra más cercana como la media de todas, se alejan, y ya no se tendrían recursos medidos, si no inferidos o indicados.

A continuación, se realizará un *report* o informe, donde se pueden ver diferentes resultados a través de un archivo de texto que genera el programa.

Para realizarlo, se debe acceder a la pestaña *Block model* → *Block model* → *Report*, donde se desplegará la siguiente ventana:

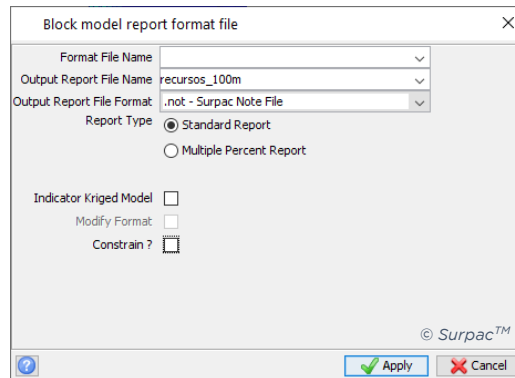


Figura 70. Ventana de introducción de nombre y formato del report

A continuación, se despliega otra ventana donde se introducirá el atributo que se va a evaluar, en este caso la variable interpolada del modelo *idw_100*, que es la que posee la información relativa al grado de plata de los bloques. También se debe indicar el campo relativo a la densidad. En el apartado *grouping attributes* se definirá los agrupamientos que el software realizará a la hora de arrojar resultados, luego se añadirá la variable *n_100*, dado que es la que indica el tipo de recursos que se obtienen, y la variable *idw_100*, para mostrar, en unos intervalos de 30 g/t, desde 0 a 300, la ley de cada tipo de recurso. El intervalo de la variable *n_100* se especificará en una siguiente ventana que se desplegará a continuación, ya que al tratarse de números enteros no se puede realizar en este paso del informe.

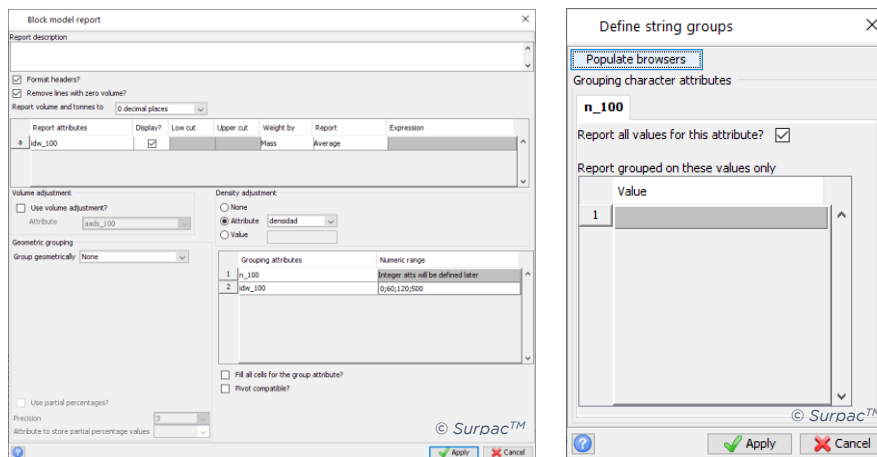


Figura 71. Ventanas de introducción de parámetros del report



Una vez se hace clic en *Apply* en la ventana desplegable anterior, el software guardará, en formato .not, un archivo con el informe de todo lo que se pidió que calculase en pasos anteriores. De este modo, el *report* creado es el siguiente:

N 100	Idw 100	Volume	Tonnes	Idw 100					
					2	0.0 -> 60.0	335375	838438	26.29
						60.0 -> 120.0	94625	236563	91.83
						120.0 -> 500.0	130078	325195	174.75
					Sub Total		560078	1400195	71.84
4	0.0 -> 60.0	370391	925977	22.53					
	60.0 -> 120.0	170297	425742	100.61					
	120.0 -> 500.0	148984	372461	163.09					
Sub Total		689672	1724180	72.17					
					3	0.0 -> 60.0	302063	755156	28.04
						60.0 -> 120.0	112359	280898	84.50
						120.0 -> 500.0	32484	81211	157.69
Sub Total					Sub Total		446906	1117266	51.66
7	0.0 -> 60.0	338531	846328	24.46					
	60.0 -> 120.0	42297	105742	83.80					
	120.0 -> 500.0	15359	38398	130.62					
Sub Total		396188	990469	34.91					
					0	0.0 -> 60.0	72219	180547	42.97
						60.0 -> 120.0	36078	90195	89.91
						120.0 -> 500.0	22609	56523	134.99
Sub Total					Sub Total		130906	327266	71.80
5	0.0 -> 60.0	368094	920234	22.65					
	60.0 -> 120.0	77078	192695	79.67					
	120.0 -> 500.0	22766	56914	133.31					
Sub Total		467938	1169844	37.43					
					9	0.0 -> 60.0	175219	438047	21.34
						60.0 -> 120.0	34359	85898	92.14
						120.0 -> 500.0	13016	32539	129.86
Sub Total					Sub Total		222594	556484	38.61
6	0.0 -> 60.0	696156	1740391	22.92					
	60.0 -> 120.0	91594	228984	88.01					
	120.0 -> 500.0	58859	147148	131.59					
Sub Total		846609	2116523	37.52					
					10	0.0 -> 60.0	156000	390000	22.01
						60.0 -> 120.0	31188	77969	94.06
						120.0 -> 500.0	37688	94219	129.72
Sub Total					Sub Total		224875	562188	50.05
8	0.0 -> 60.0	157438	393594	20.51					
	60.0 -> 120.0	63969	159922	78.77					
	120.0 -> 500.0	15453	38633	130.34					
Sub Total		236859	592148	43.41					
					11	0.0 -> 60.0	245141	612852	21.61
						60.0 -> 120.0	54250	135625	73.28
						120.0 -> 500.0	859	2148	126.43
Sub Total					Sub Total		300250	750625	31.25
1	0.0 -> 60.0	276359	690898	23.31					
	60.0 -> 120.0	54250	135625	76.32					
	120.0 -> 500.0	50906	127266	231.86					
Sub Total		381516	953789	58.67					
					Grand Total		6230078	15575195	49.45

Figura 72. Documento de texto con la salida de la información del report creado

Como se puede observar en el informe, hay una totalidad de, aproximadamente, 6.2 millones de metros cúbicos entre los sólidos mineralizados, con una ley media de 49.45 g/t.

Atendiendo a la ley media que se extrae del estudio, y a que se poseen un total de 15575195 toneladas de material, realizando la siguiente ecuación se podrá deducir las toneladas de plata que contiene el depósito:

$$15,575,195 \text{ t} \cdot 49.45 \text{ g Ag/t} \cdot \frac{1 \text{ t Ag}}{10^6 \text{ g Ag}} \approx 770 \text{ t Ag}$$

7.12.1. Estimación de los recursos minerales

La anterior cuantificación del depósito se realizó sin atender a las variables encargadas de estimar recursos, en función, en este caso, del número de muestras tomadas para cada medición.



Para este caso, el *report* se debe realizar dos veces, cada una con un *constraint* distinto; el primero, para la obtención de los recursos medidos, marginará las muestras con 10 o más muestras tomadas. Por el contrario, el segundo, que obtendrá los resultados correspondientes a los recursos indicados, tomará únicamente los bloques con menos de 10 muestras. De este modo, se obtienen los siguientes resultados.

Zona y clasificación según recursos	Toneladas (Mt)	Ag (g/t)	Plata contenida (t)	Plata contenida (Moz)
Indicados (n < 10)				
Zonas de alta ley	3.85	101.58	390.75	12.98
Halo de baja ley	6.77	22.57	152.89	5.08
Total indicados	10.62	51.19	543.64	18.06
Medidos (n ≥ 10)				
Zonas de alta ley	1.16	83.49	96.9	3.22
Halo de baja ley	3.47	30.60	106.1	3.52
Total medidos	4.63	43.86	203.95	6.56
Total	15.25	48.97	747.59	24.62

Tabla 12. Estimación de los recursos minerales

En el siguiente apartado se procederá a la optimización del depósito, utilizando el software RecMin con el mismo modelo de bloques empleado para este estudio.

Previo a la preparación del modelo de bloques para su evaluación en RecMin, deben crearse varios atributos nuevos con los que se trabajará en este, que son:

- cc: Coste de concentrado de cada bloque (según ley, como se especificará en el siguiente apartado)
- rc: Recuperación (según ley, como se especificará en el siguiente apartado)
- Dominio: Dominio al que pertenece cada bloque

De este modo, si se hacen cortes y se expresan los bloques según su coste de concentrado y recuperación se obtiene el siguiente modelo:



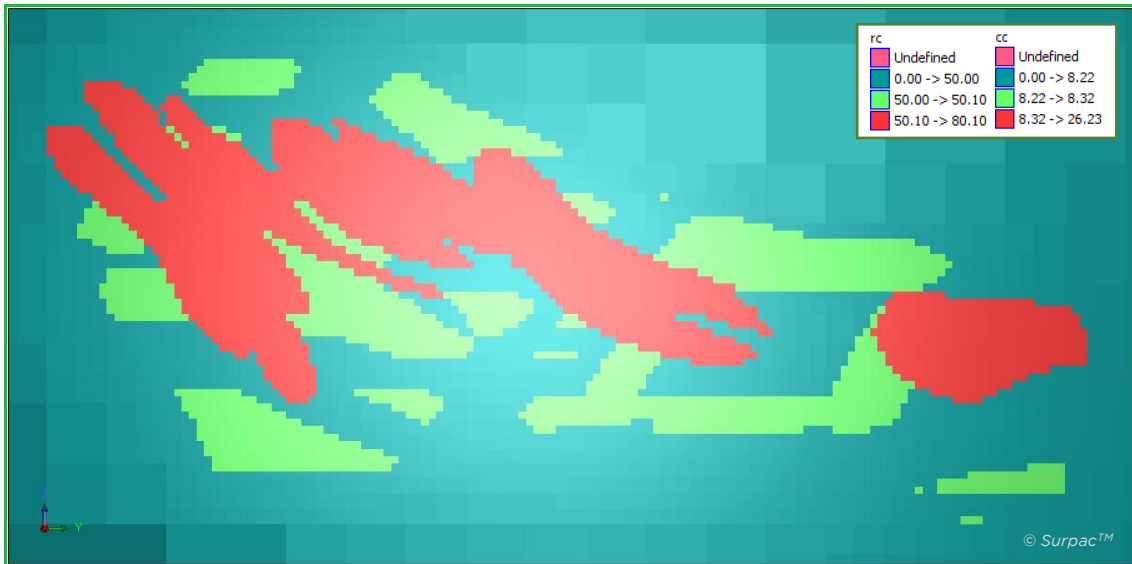


Figura 73. Color de bloques dividiéndolos según coste de concentrado y recuperación

Si, por el contrario, se les da el color del dominio al que pertenecen:

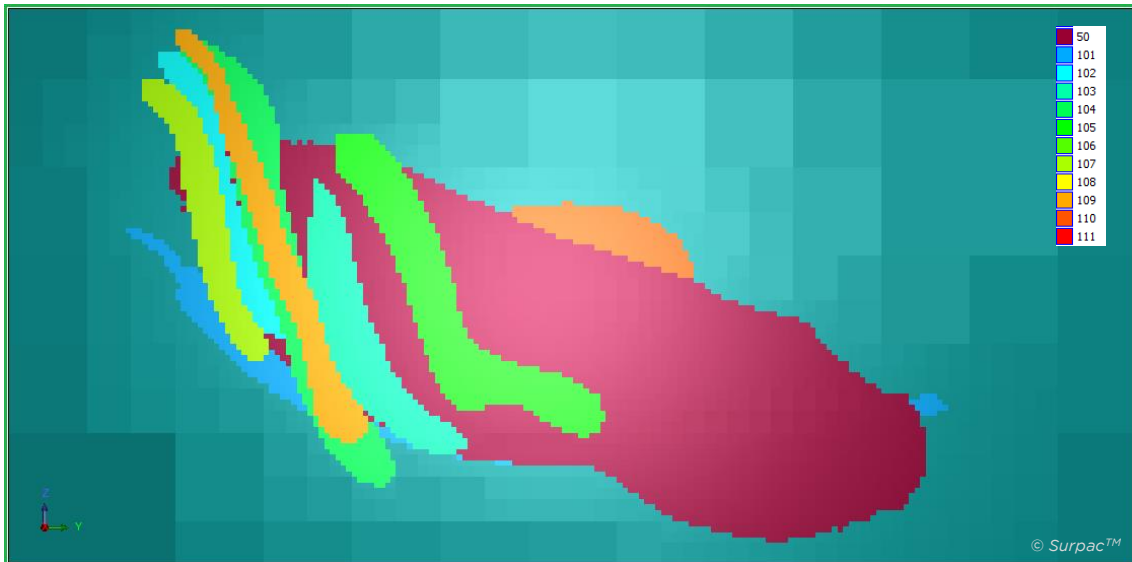


Figura 74. Color de bloques según dominio

7.13. Optimización

Como se explicó en la introducción del proyecto, la optimización se llevará a cabo con el software RecMin. En primer lugar, se importarán los sondeos que se están utilizando en Surpac, junto con el modelo de bloques que se creó previamente en ese programa. El primer paso a llevar a cabo será la creación de un nuevo proyecto, y se deberá crear una variable cuantitativa para medir las reservas de plata, llamada "Ag", cuyas unidades sean el g/t, como se especifica en los archivos .csv con los que se trabajará a continuación.

7.13.1. Creación del proyecto e importación de sondeos

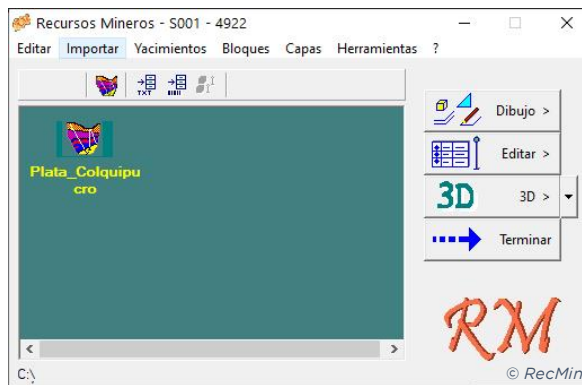


Figura 75, Creación del proyecto en RecMin



Figura 76. Procedimiento para la interpolación de los sondeos en RecMin



Cambiando al módulo “Dibujo”, se pueden abrir los sondeos que se acaban de importar, accediendo a *Sondeos* → *Abrir sondeos*, haciendo clic en “*Todos*” y pulsando el botón “>>>”. Una vez estén todos cargados en la ventana derecha de la interfaz, se debe pulsar la tecla “*Dibujar*”, para que los muestre por pantalla.

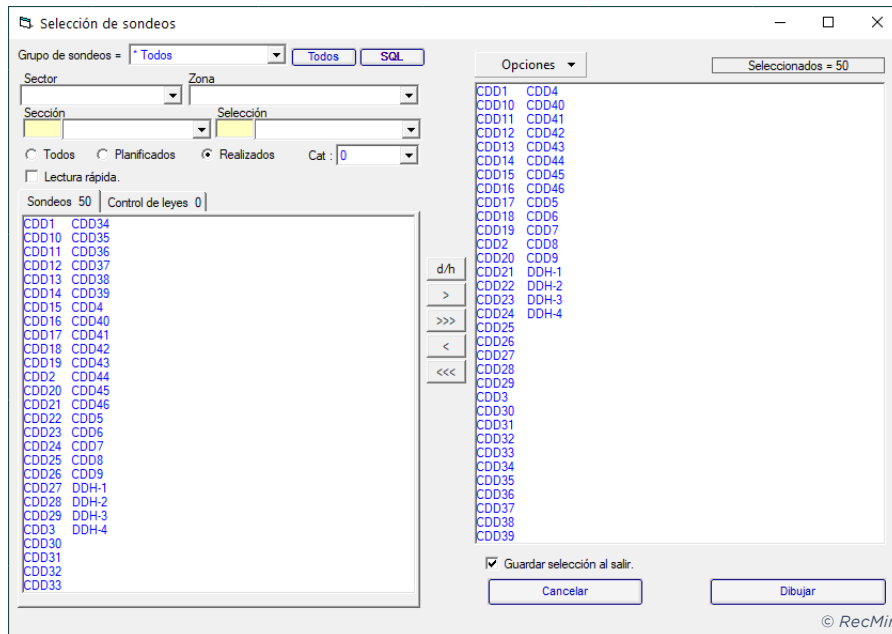


Figura 77. Pantalla de carga del paquete de sondeos

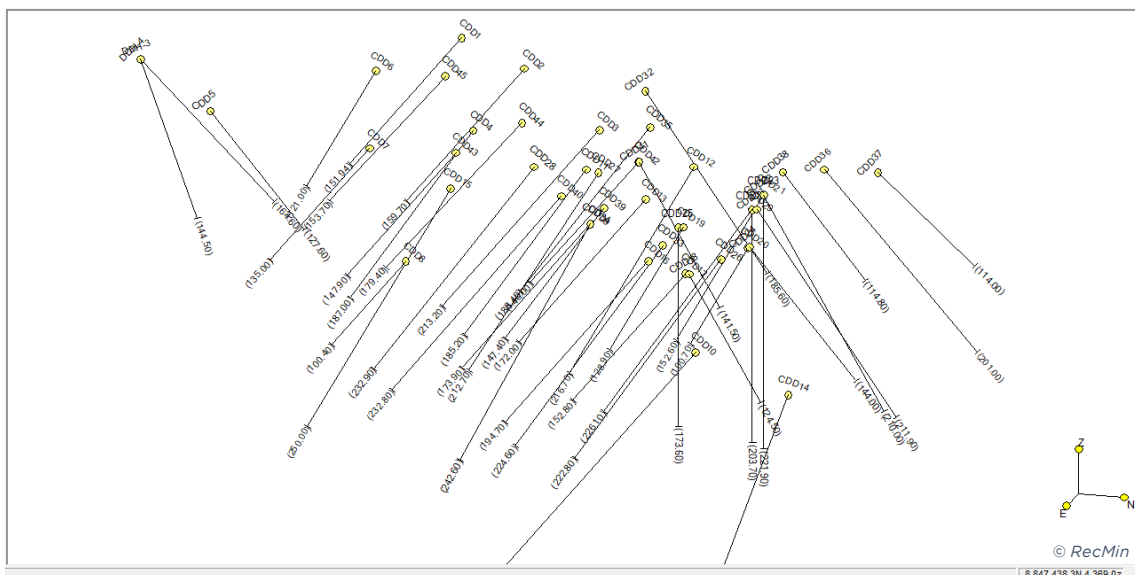


Figura 78. Sondeos implementados en el módulo Dibujo

A continuación, se procederá a abrir la superficie del terreno. Una vez más, puede emplearse el archivo que se utiliza con el software Surpac, del tipo .su, para poder trabajar con los mismos datos en ambos programas.



Para abrir una superficie, se accederá a *Sup-Lin-T3* → *Abrir Superficie*, se selecciona el archivo deseado para su implementación, y se pulsa en la tecla “Abrir líneas como superficies”:

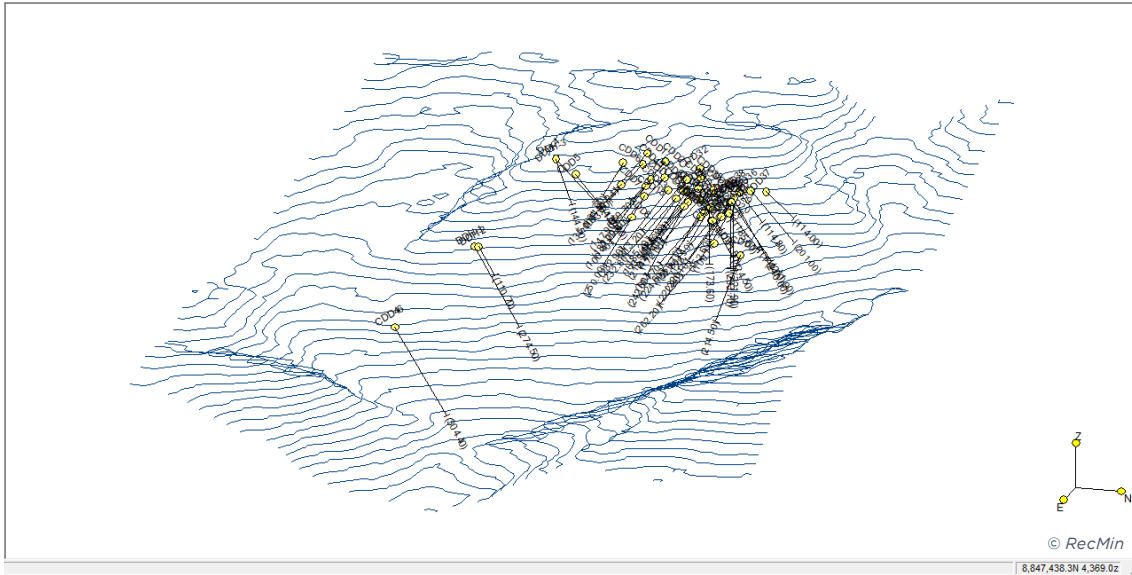


Figura 79. Superficie del terreno implementada en el módulo Dibujo

Gracias a la herramienta “Detalles de barras de sondeos”, podrán visualizarse los sondeos según el grado de mineralización en plata o según el dominio al que pertenece cada tramo del sondeo, si se deseara.

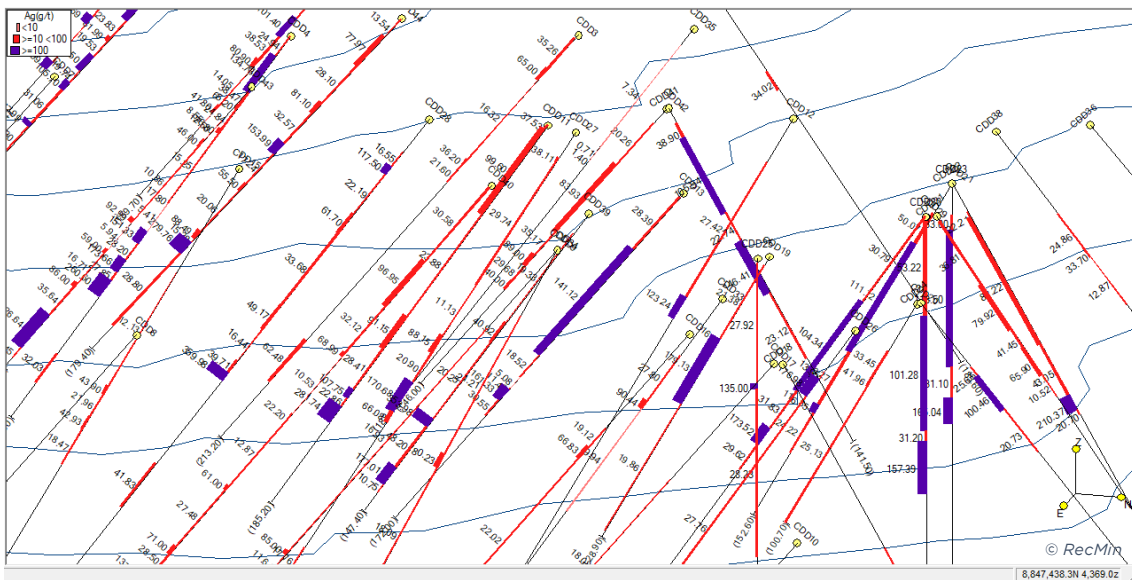


Figura 80. Color de sondeos según ley en plata (g/t)



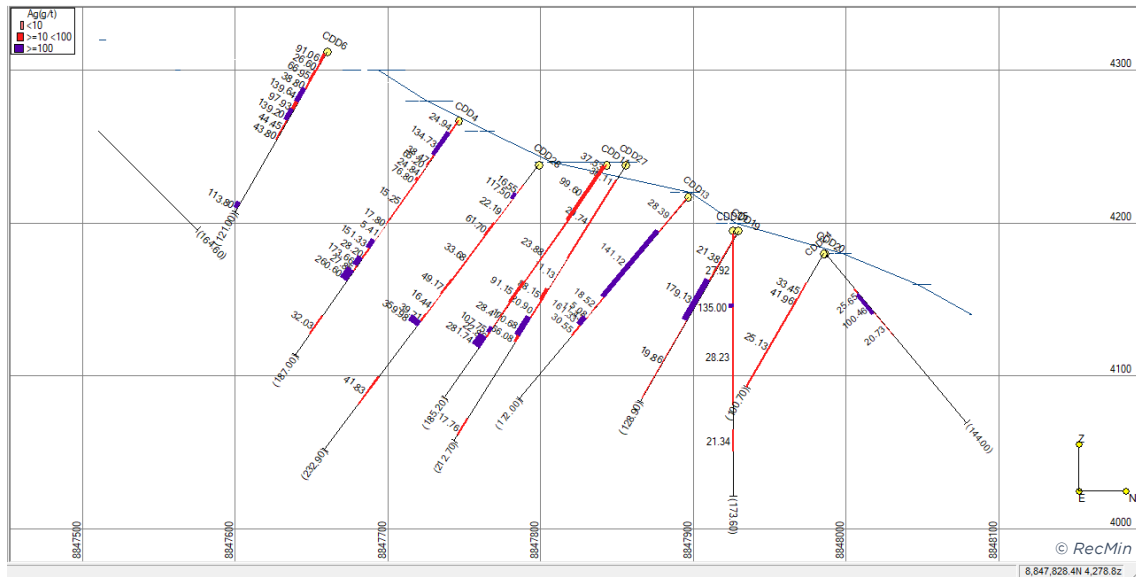


Figura 81. Vista detallada de una sección de los sondeos

El siguiente paso a llevar a cabo será la triangulación de la superficie del terreno, accediendo a *Sup-Lin-T3* → *Triangular superficies/grupos de puntos*:

7.13.2. Creación de modelo de bloques

Antes de proceder a pasar el modelo de bloques de Surpac a RecMin, se crearán varios atributos (tipo *float*) nuevos para trabajar con ellos una vez se encuentre el modelo implementado en RecMin, que serán; *corta*, *aux1*, *aux2*, *aux3* y *aux4*.

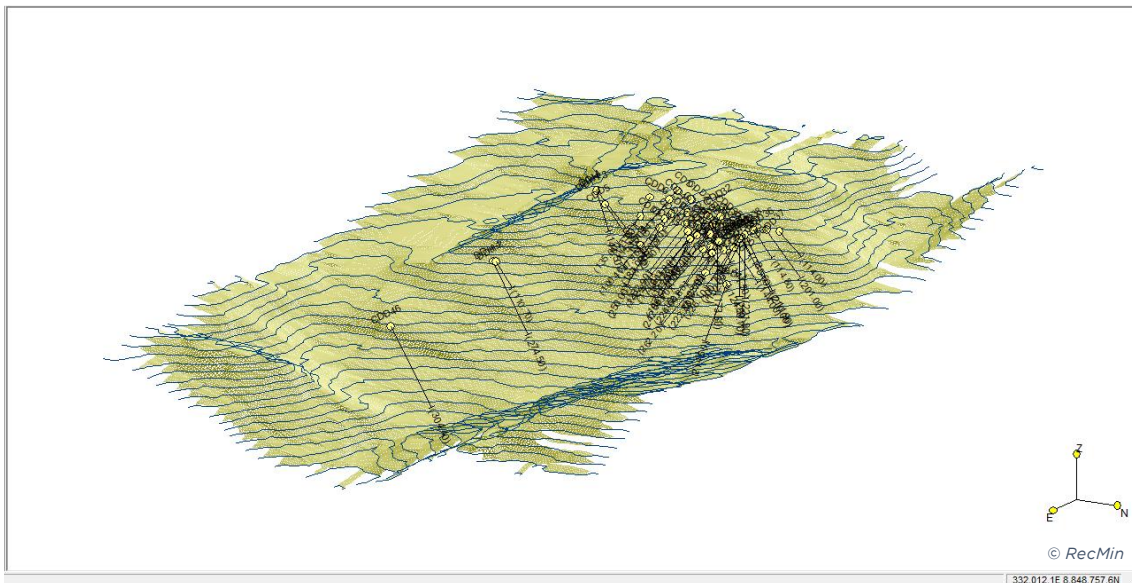


Figura 82. Superficie triangulada

Atributos					
	Name	Type	Decimals	Background	Description / Expression
1	aads_100	Real	2	0.00	Average anisotropic distance to sample - radio 100
2	adns_100	Real	2	0.00	Anisotropic distance to nearest sample - radio 100
3	aux1	Float	2	-99.00	
4	aux2	Float	2	-99.00	
5	aux3	Float	2	-99.00	
6	densidad	Real	2	2.50	Densidad de la roca
7	idw_100	Real	2	0.00	Ley para radio 100
8	n_100	Integer	-	0	Num. muestras radio 100
9	pit	Float	2	-99.00	

Figura 83. Atributos del modelo de bloques que será enviado a RecMin

El modelo de bloques con el que se trabajó en Surpac posee una longitud de arista demasiado pequeña (2.5 m) para trabajar en RecMin, ya que la densidad de bloques dado este pequeño tamaño es enorme. La solución será realizar *reblocking* con una herramienta específica para este tipo de tareas. De este modo, el paso del modelo entre distintos programas es menos dificultoso y se podrá trabajar con ellos en igualdad de condiciones una vez esté dentro del otro software.

La nueva longitud de arista será de 10 metros, lo que disminuirá la densidad de bloques en 64 veces ($[10/2.5]^3$) respecto al modelo actual, pasando de, aproximadamente 6 millones de boques a 94000. Para ello, se deberá acceder, en Surpac, a *Block model* → *Block model* → *Convert / Reblock*, donde se abrirá una nueva interfaz. En primer lugar, se debe abrir el modelo de bloques deseado, arrojando por pantalla sus características:

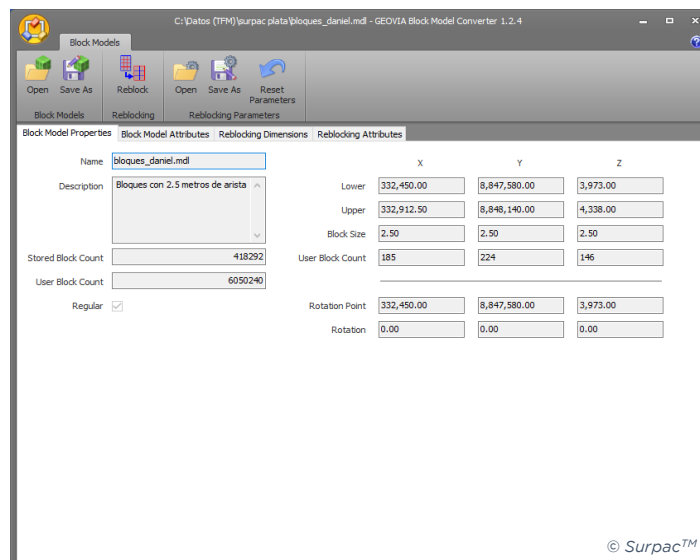


Figura 84. Características del modelo de bloques inicial



Accediendo a la tercera pestaña de la interfaz, de nombre *Reblocking Dimensions*, y en la parte correspondiente a *Target Block Model*, que se trata la zona de introducción de los datos concernientes al remodelado, se introducirá el valor de 10 m en el apartado de *Target Parent Block Size*, que se trata del área donde se cambian las dimensiones de los bloques:

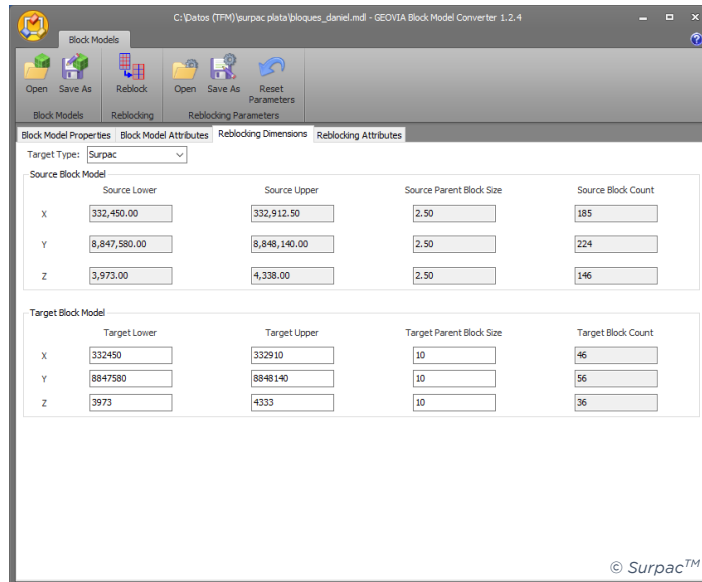


Figura 85. Implantación del nuevo tamaño de bloques

A continuación, abriendo la pestaña *Reblocking Attributes* se seleccionarán los atributos que se desea guardar en el nuevo modelo. Se seleccionan todos y se pulsa *Reblock*. Posteriormente, se debe guardar el nuevo modelo con otro nombre para no sobrescribirlo sobre el que ya existe.

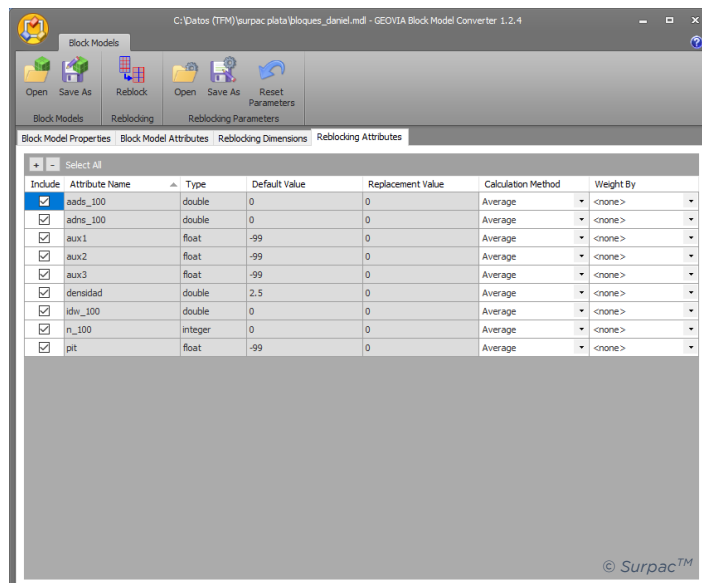


Figura 86. Atributos a añadir en el nuevo modelo de bloques

Para comprobar que el modelo se ha creado correctamente, se abrirá y se realizará el *constraint* de tipo 3DM que margina los bloques dentro de los dominios de alta ley, para ver a simple vista como el número de bloques desplegados disminuyó con respecto a los pasos anteriores.

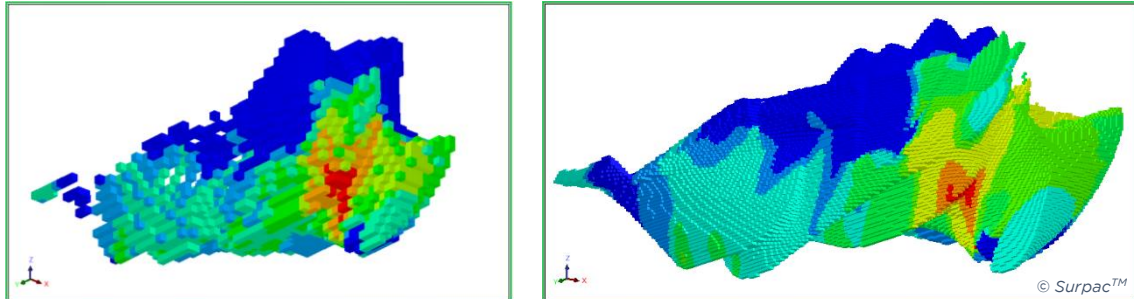


Figura 87. Comparativa del volumen de bloques entre el modelo de bloques nuevo (izquierda) y el modelo de bloques inicial (derecha)

El siguiente paso será exportar el archivo del modelo creado como .csv para poder trabajar posteriormente con él en RecMin. Para ello, se debe acceder a *Block model* → *Block model* → *Export* → *Block centroids & dimensions to string file*, rellenando los campos como se especifica a continuación:

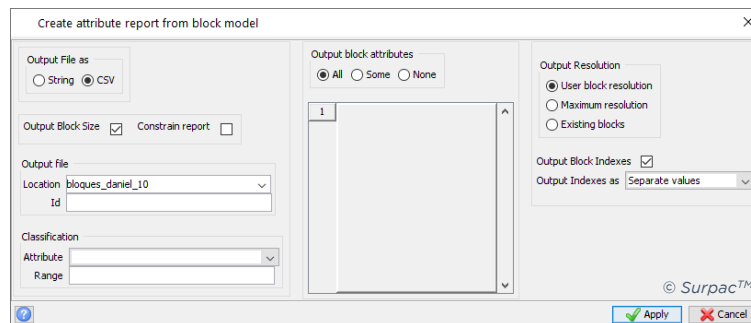


Figura 88. Interfaz de exportación y guardado del modelo de bloques a formato .csv

En cuanto se pulsa *Apply*, un nuevo archivo es creado en el directorio de trabajo de Surpac con el mismo modelo de bloques, pero en formato .csv.

Desde este momento ya se acabaría el trabajo en Surpac, y comenzaría a utilizarse RecMin para la importación y carga en el software. En primer lugar, se introduce este archivo recién creado dentro de la carpeta que albergue el proyecto en este programa.

Una vez abierto RecMin, se creará un nuevo proyecto, a parte del anterior ya creado, para trabajar con este modelo de bloques. De este modo, se vuelven a importar los sondeos de la misma forma que se realizó anteriormente y se

incluyen en el directorio de este proyecto secundario el archivo correspondiente a la topografía del terreno.

A continuación, se debe crear una base de datos (fichero BLK). Esta base de datos está vacía, por lo que se deben generar bloques en su interior, accediendo a *Bloques* → *Nueva tabla de bloques*. En este caso, los valores introducidos deben ser los mismos que el modelo que se ha creado en Surpac, para que, cuando se exporte, no haya problemas con los datos de lectura.

Nombre de la tabla de bloques : BLK_10

Copiar información de tabla existente

Propiedades de la tabla de bloques

Añadir campos

Nombre :

Tipo : Entero largo

Tamaño :

Lado X : 10

Lado Y : 10

Lado Z : 10

Origen X : 332450

Origen Y : 8847580

Origen Z : 3973

Nombre	Tipo
idx	Entero largo
idy	Entero largo
idz	Entero largo
lito	Texto(50)
peso	Numérico
aads_100	Numérico
adns_100	Numérico
aux1	Numérico
aux2	Numérico
aux3	Numérico
pit	Numérico
densidad	Numérico
idw_100	Numérico

Campo litología : lito

Campo peso : peso

El origen es la esquina inferior izquierda del bloque 1,1,1

© RecMin

Crear tabla de bloques Terminar

Figura 89. Características de la tabla de bloques creada

El siguiente paso será la importación del modelo creado con Surpac. Para ello, se accede, desde el módulo “Yacimientos”, a *Importar* → *Modelo de bloques en formato texto a base de datos*:

Haciendo clic en *Buscar fichero de lectura* se abrirá el directorio donde previamente se guardó el modelo, se cargará y se le ordenará que lo importe a la base de datos recientemente creada:

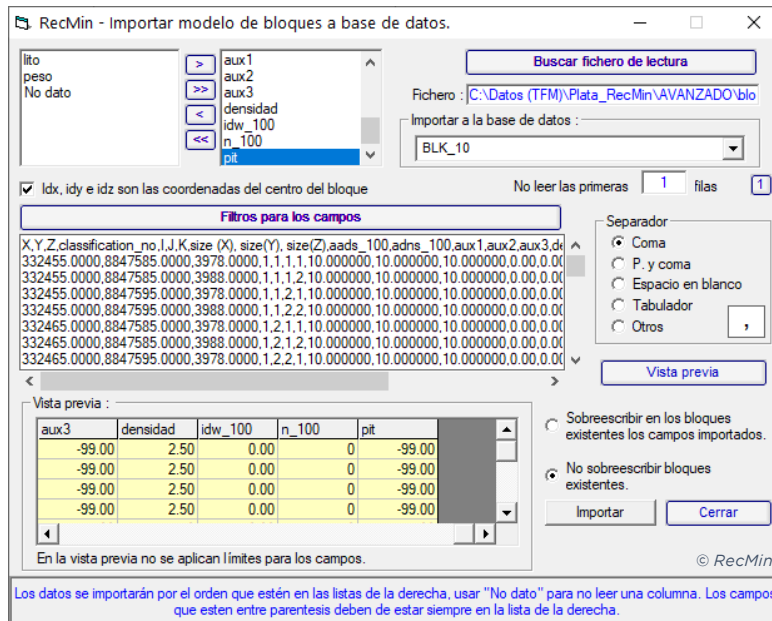


Figura 90. Importación del modelo de bloques

Una vez todo se haya rellenado según lo establecido, se hace clic en *Importar*, y se cierra la ventana. Desde el módulo “*Dibujo*” se puede abrir el modelo para comprobar que se haya realizado correctamente. Se hace clic en Bloques → Abrir bloques, y pulsando la tecla *> se cargan todos. Como se observa en la siguiente figura, el software importó los 92736 bloques creados en Surpac:

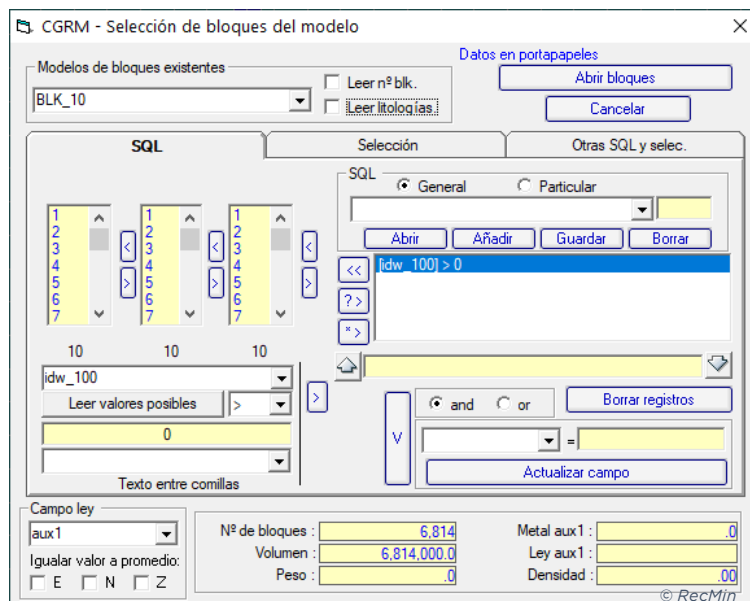


Figura 91. Interfaz de RecMin para cálculos y selección de bloques

Si se abre el modelo con el mismo intervalo de colores según la ley en plata en ambos programas, se puede observar que el modelo es el mismo:



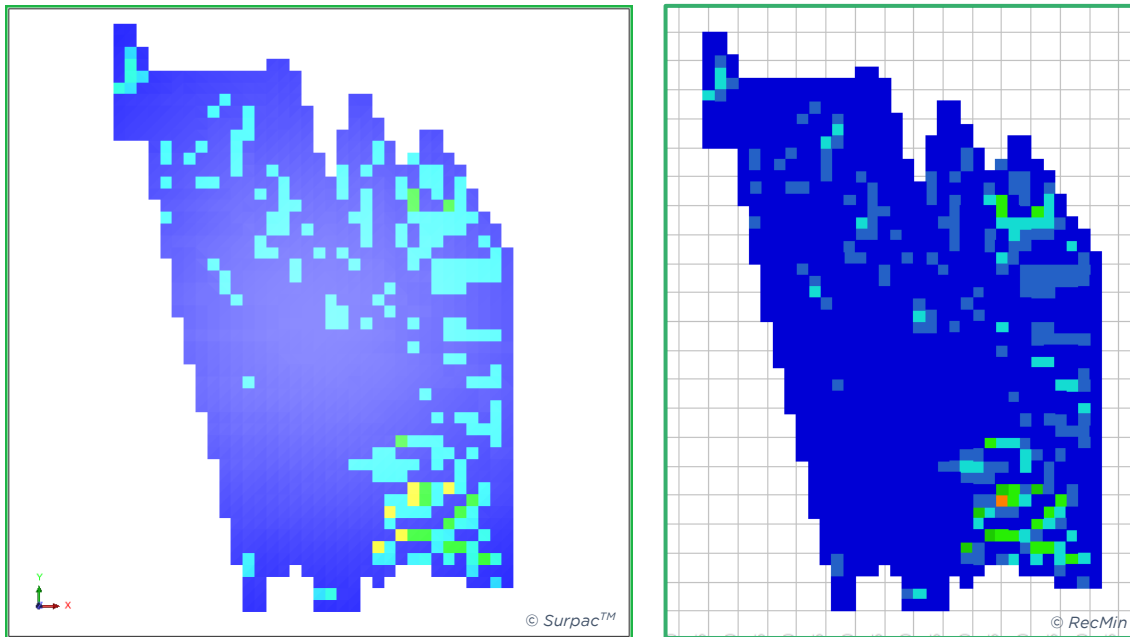


Figura 92. Visualización del modelo de bloques en Surpac (izquierda) y RecMin (derecha)

El siguiente paso, una vez se comprueba que la base de datos se ha introducido correctamente en el software, será comenzar con la optimización.

7.13.3. Optimización: creación de cono óptimo

7.13.3.1. Cálculo de las reservas probadas

En primer lugar, se deberán obtener los precios comerciales de la plata.

Según la web de la empresa Bullion Vault®, el precio de la plata a 10/06/2020 se sitúa en 566.31 USD/kg, o 17.62 USD/oz al cambio, como muestra el siguiente gráfico:

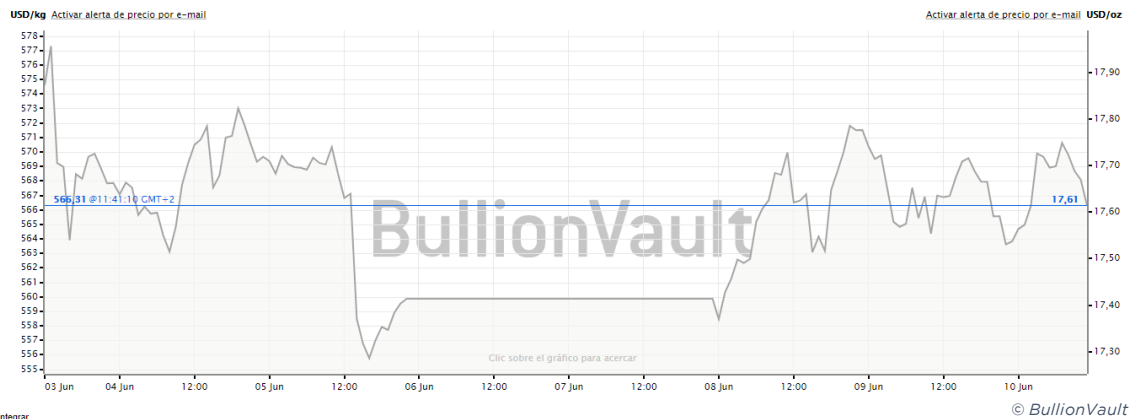


Figura 93. Precio de mercado de la plata (10/06/2020)

Como puede observarse en la figura 55, la fluctuación de precios de la plata ha sido continua desde el año 2015, produciéndose mínimos cercanos a los 440 USD/kg, y un desplome notable en marzo de 2020, cayendo hasta los 400 USD/kg, debido a la crisis provocada por la pandemia mundial del COVID-19.

El máximo en este periodo se situó cerca de los 660 USD/kg en el segundo semestre de 2016, produciéndose picos anuales entre los 550 y los 600 USD/kg.

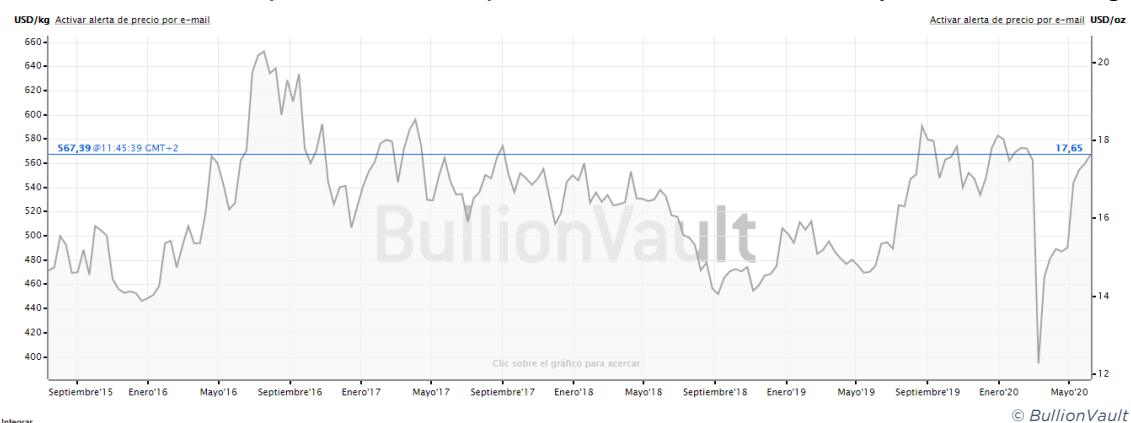


Figura 94. Fluctuación de los precios de la plata entre 2015 y 2020

De este modo, y atendiendo a las variaciones en los precios de mercado, podría deducirse un precio medio de 17.4 USD/oz, un precio bajo de 14.3 USD/oz, y un precio alto de 20.5 USD/oz.



Según los datos de Tinka, los parámetros que se deberán tener en cuenta para la optimización serán los siguientes:

- Ángulo de talud: 45°
- Costes de minería: 2.6 USD/t
- Costes de lixiviación en pilas: 3.74 USD/t
- Costes de lixiviación por cianuración: 21.65 USD/t
- G&A (gastos generales y administrativos): 4.48 USD/t

Para proceder al método de optimización de RecMin, se deberá acceder, desde el módulo “Yacimientos” a *Bloques* → *Método del CONO FLOTANTE*.

Los parámetros principales a introducir (coste de mina, ángulo de talud, etc.) son los que se especificaron anteriormente.

Cabe destacar que, en el apartado referido a los costes de planta, se utilizarán las variables especiales creadas en Surpac que atienden al nombre de “cc” y “rc”. Esto se hace para diferenciar entre los dos tipos de costes y de recuperaciones según el tipo de ley que se tenga en cada bloque evaluado ya que, como se explicó con anterioridad, el material por debajo de la ley de corte (60 g/t) se estudiará también para su tratamiento a través de lixiviación por pilas, arrojando un menor gasto por tonelada de material procesado, así como una menor recuperación final del mismo.

Los ingresos que se estudiarán para que el programa procese las cortas óptimas se estimaron atendiendo a los precios de mercado, intentando buscar valores razonables en vista a los que se dieron en el margen de cinco años que se evaluó al comienzo de este apartado. De este modo, se introducirán los valores 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25, 0.275, 0.3, 0.325, 0.35, 0.375, 0.4, 0.425, 0.45, 0.475, 0.5, 0.525, 0.55, 0.575, 0.6, 0.625, 0.65, 0.675 y 0.7 USD/g para observar cuántas cortas óptimas se podrían obtener atendiendo a cada escenario.



Modelización de un yacimiento de plata en Sudamérica

The figure displays six screenshots of the CGRM software interface, showing the 'Metodo del cono flotante' (floating cone method) optimization parameters. Each window includes a table of block models and various input fields for costs, recovery, and talud (slope) parameters.

Table 1: Modelo de bloques para el cálculo

	Este	Tamaño	Intervalo
Este	332400	10	1-60
Norte	8847250	10	1-100
Z	3970	10	1-37

General - Costes mina | Costes planta | Ingresos | Conjunto de bloques | Talud

General - Costes de explotación:

- Utilizar el coste medio de: 2.6 (por tonelada)
- Utilizar como coste para cada bloque el definido en el campo: []

Mineral - Costes de explotación:

- Utilizar el coste medio de: 2.6 (por tonelada)
- Utilizar como coste para cada bloque el definido en el campo: []

MINERAL - Coste de tratamiento por tonelada:

- Utilizar el coste medio de: 21.65
- Utilizar como coste para cada bloque el definido en el campo: [cc]

RECUPERACION en porcentaje:

- Utilizar una recuperación media del: 80 %
- Utilizar como recuperación para cada bloque el definido en el campo: [rc]

Campos de Ley:

Campo ley: [ldw_100]

Valores por unidad de ley: [0.65, 0.6, 0.55, 0.5, 0.45, 0.4, 0.35, 0.3]

Se calcularán las pits economicas para cada uno de los valores de la lista.

El valor de un bloque será su peso por la ley y por el valor por unidad de ley. Por ejemplo, si la ley está en %, el valor por unidad de ley tendrá que dividirse por 100.

Talud:

- Utilizar como ángulo de talud para cada bloque el definido en el campo: []
- Utilizar como ángulo de talud general para todos los bloques: 45
- Utilizar los siguientes ángulos de talud segun el azimut: []

Tablas de taludes:

[Nueva] [Borrar]

Desde y hasta >=0 y <360
Angulo >0 y <=90

Figura 95. Parámetros a introducir en la interfaz de optimización



Una vez concluye la optimización, el software almacenará en los campos “corta” y “mena” la información extraída de los cálculos.

En el primero de ellos, se guardarán las cortas posibles que podrían llevarse a cabo atendiendo a los precios del mercado, por lo que se trataría de las reservas. En el caso de la mena, guardaría con el valor de “1” todos aquellos bloques que podrían considerarse como tal, y serían llevados a planta de concentración, sea lixiviación por cianuración o lixiviación por pilas.

Tras, la optimización, RecMin estimó posible la explotación de varias cortas posibles, concernientes a precios de venta de plata entre 0.275 y 0.7 USD/g.

Las cortas óptimas calculadas son las siguientes:

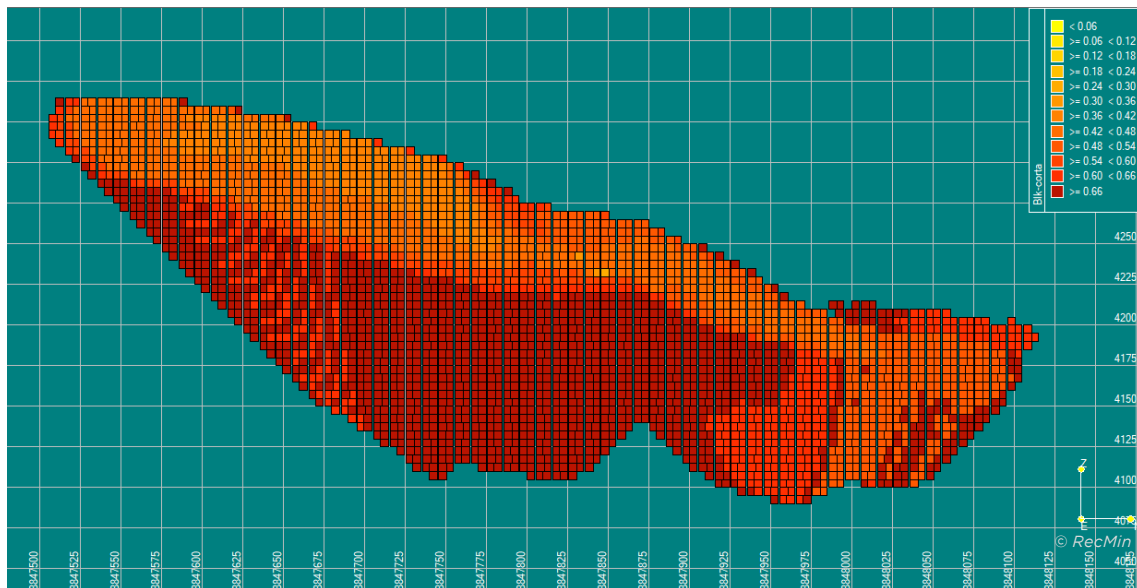


Figura 96. Resultado de las cortas óptimas calculadas con RecMin

Como se puede observar en la figura, se ve claramente como en casos más conservadores de mercado, donde los precios son más bajos, la corta no profundiza tanto como en casos de precios altos, donde sí podría llevarse a cabo una corta más profunda que implicase mayores costes debido a los altos volúmenes de movimientos de tierra y concentración de los materiales.

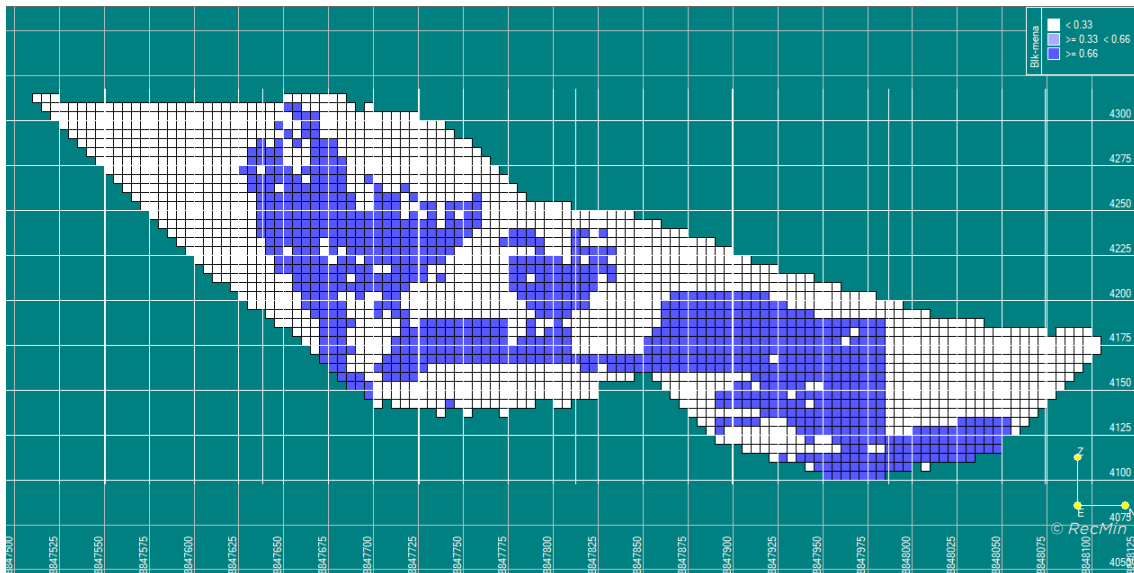


Figura 97. Distribución de la mena a lo largo de la corta creada

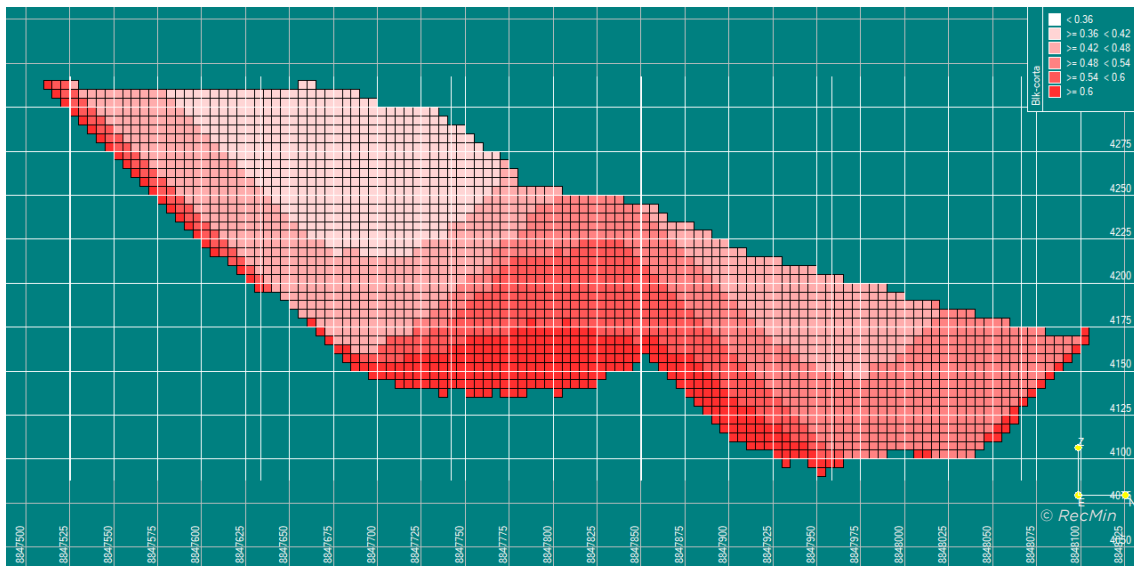


Figura 98. Corte transversal para mejor visualización de las cortas

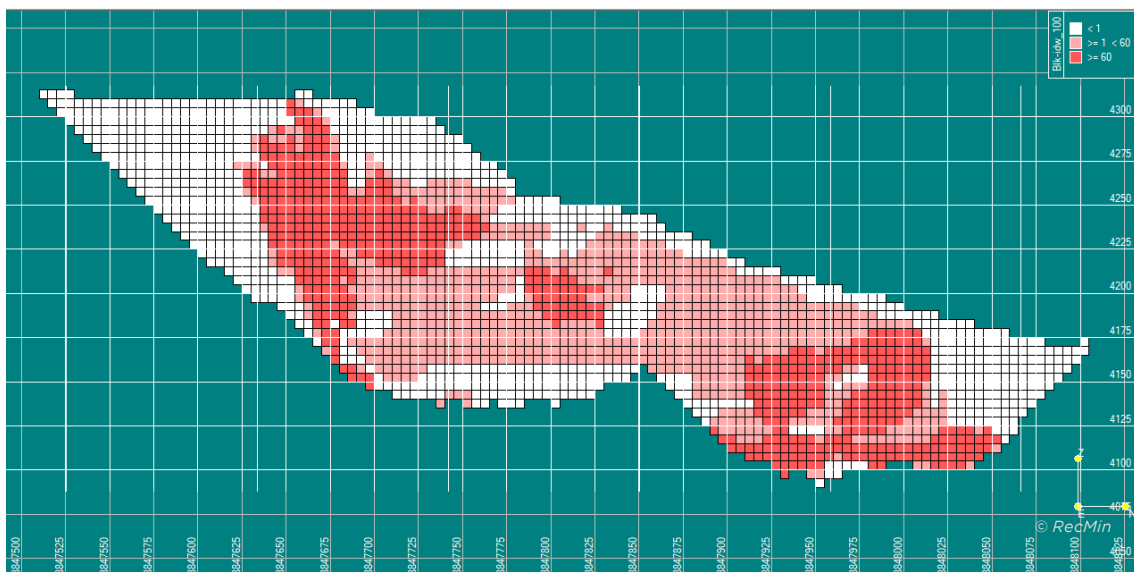


Figura 99. Distribución de la plata a lo largo de las cortas



7.13.4. Estimación de las reservas

Los recursos minerales y las reservas se distribuyen de la siguiente forma (Krzemien, Riesgo, Suárez, Diego, 2016):

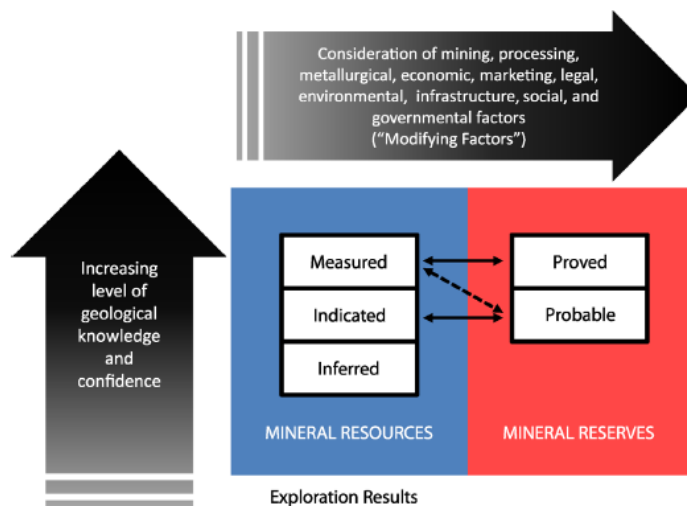


Figura 100. Distribución de los recursos y reservas en función de la precisión de los estudios

Si se filtran los bloques de mena situados dentro de las cortas óptimas y se evalúan, atendiendo a su contenido en plata, se obtienen los siguientes resultados:

Zona y clasificación	Toneladas (Mt)	Ag (g/t)	Plata contenida (t)	Plata contenida (Moz)
Probables				
Zonas de alta ley	4.45	95.314	424.44	14.10
Halo de baja ley	2.27	30.677	69.57	2.31
Total	6.72	73.504	494.01	16.41

Tabla 13. Estudio de las reservas obtenidas en la optimización

7.13.5. Estudio financiero simple

El siguiente estudio económico se realizará a largo plazo, estableciendo un tiempo estimado de 7 años, calculando VAN y TIR para la corta que se podría dar en la mejor de las condiciones de mercado, es decir, 0.7 USD/g.

En primer lugar, se obtendrán las toneladas de mena de alta y baja ley contenidas que se envían a concentración por lixiviación, tanto en pilas como por cianuración. Estos dos tonelajes, junto con la ley media de cada intervalo, ayudarán a calcular las toneladas de plata existentes en cada fracción, lo que permitirá conocer ingresos, teniendo en cuenta los costes de minería y lixiviación.



Se establece un desembolso de capital inicial de 50 millones de USD, estimando que la concentración puede realizarse en el dominio de Ayawilca, situado a 1.5 km de Colquipucro, lo que conllevaría a un abaratamiento notable de costes iniciales. Asimismo, debería llevarse a cabo la implementación de pistas y carreteras hasta la zona, junto con la obtención del material minero para comenzar con la extracción.

Las toneladas a extraer en la corta establecida, y los gastos de concentración, mediante cálculos con RecMin, son los siguientes:

	Mena (t)	Ag (g/t)	Recuperación (%)	Ingresos (USD)	Coste concentrado (USD/t)	Gastos concentración (USD)
Alta ley	3,414,687.5	111.59	80	213,385,187.75	26.13	89,225,784.38
Baja ley	3,505,312.5	35.283	50	43,287,279.33	3.74	13,109,868.75
Total	6,920,000			256,672,467.08		102,335,653.13

Tabla 14. Ingresos y gastos en función de la ley de la mena (suponiendo un precio de venta de 0.7 USD/g)

Atendiendo a las toneladas totales de la corta, y a las toneladas de estéril, que sería la resta de las anteriores menos la mena, y conociendo el precio de minería (2.6 USD/t), se podría conocer el *stripping ratio* (razón de cantidad de estéril-mena a mover) y el ratio de explotación (volumen de estéril a mover por cada tonelada de mena extraída), así como los gastos en minería, necesarios para obtener los beneficios de la explotación y poder calcular VAN y TIR.

- Toneladas corta: 27,168,450 t
- Toneladas estéril: 20,248,450 t

Gastos en minería:

$$27,168,450 \text{ t} \cdot 2.6 \text{ USD/t} = 70,637,970 \text{ USD} \approx 70.6 \text{ MUSD}$$

Beneficios (ingresos menos gastos):

$$256,672,467.08 - 102,335,653.13 - 70,637,970 = 83,698,843.95 \approx 83.7 \text{ MUSD}$$

Stripping ratio:

$$SR = \frac{20,248,450 \text{ t}}{6,920,000 \text{ t}} = 2.93 \rightarrow SR \approx 3:1$$



Ratio de explotación:

$$\text{Ratio explotación} = \frac{\left(\frac{20,248,450 \text{ t}}{2.5 \text{ t/m}^3} \right)}{6,920,000 \text{ t}} = 1.17 \text{ m}^3 \text{ estéril/t mena}$$

Para el cálculo del VAN y el TIR, se deben utilizar los siguientes datos, previamente expuestos y calculados:

- Beneficios: 83,698,843.95 USD (11,956,977.71 USD anuales)
- Interés: 10 %
- Desembolso de capital inicial: 50 MUSD
- Plazo: 7 años

$$VAN = -D_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t}$$

Donde:

- $n \equiv$ duración de la inversión
- $t \equiv$ año de inversión
- $D_0 \equiv$ desembolso inicial
- $FC \equiv$ flujo de caja del período t
- $k \equiv$ tasa de actualización (interés)

Luego:

$$VAN = -50,000,000 + \sum_{t=1}^7 \frac{11,956,977.71}{(1+0.1)^t} = 7,465,068.43 \text{ USD} \approx 7.46 \text{ MUSD}$$

La tasa interna de retorno (TIR) se trata del tipo de interés que haría un VAN igual a cero en el momento actual, luego se calcularía de la siguiente forma:

$$0 = -50,000,000 + \sum_{t=1}^7 \frac{11,956,977.71}{(1+TIR)^t} \rightarrow TIR = 15 \%$$



7.13.6. Estudio económico – Planificación a largo plazo

La planificación a largo plazo (estudio LTP – *Long Term Planning*) se realizará con la extensión *BLKs Planning* del software RecMin que, mediante la aportación de datos relativos a la capacidad nominal de la planta de concentrado, el volumen de material movido a diario y los años útiles de la mina, podrá obtener el LTP óptimo, atendiendo al modelo de bloques optimizado con anterioridad.

En primer lugar, se hallará el tonelaje de material movido a diario, mediante el siguiente cálculo y atendiendo a los siguientes aspectos:

- Capacidad nominal de la planta de concentrado: 5000 t/día
- Disponibilidad de planta: 92 %
- Densidad de la roca: 2.5 t/m³

$$5000 \text{ t/día} \cdot 365 \text{ días/año} \cdot 0.92 = 1,679,000 \text{ t/año}$$

$$1,679,000 \text{ t/año} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 4600 \text{ t/día} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{2.5 \text{ t}} = 1,840 \text{ m}^3/\text{día}$$

Considerando un *stripping ratio* medio de 2.5 (toneladas de estéril movidas por tonelada de mena enviada a planta), se tendría una necesidad de flota global media de 4586 m³/día. Ejecutando *BLK Planning* e introduciendo estos parámetros recién calculados se obtiene:

Figura 101. Ventana de introducción de datos de BLKs Planning

El LTP óptimo que se obtiene es el siguiente:

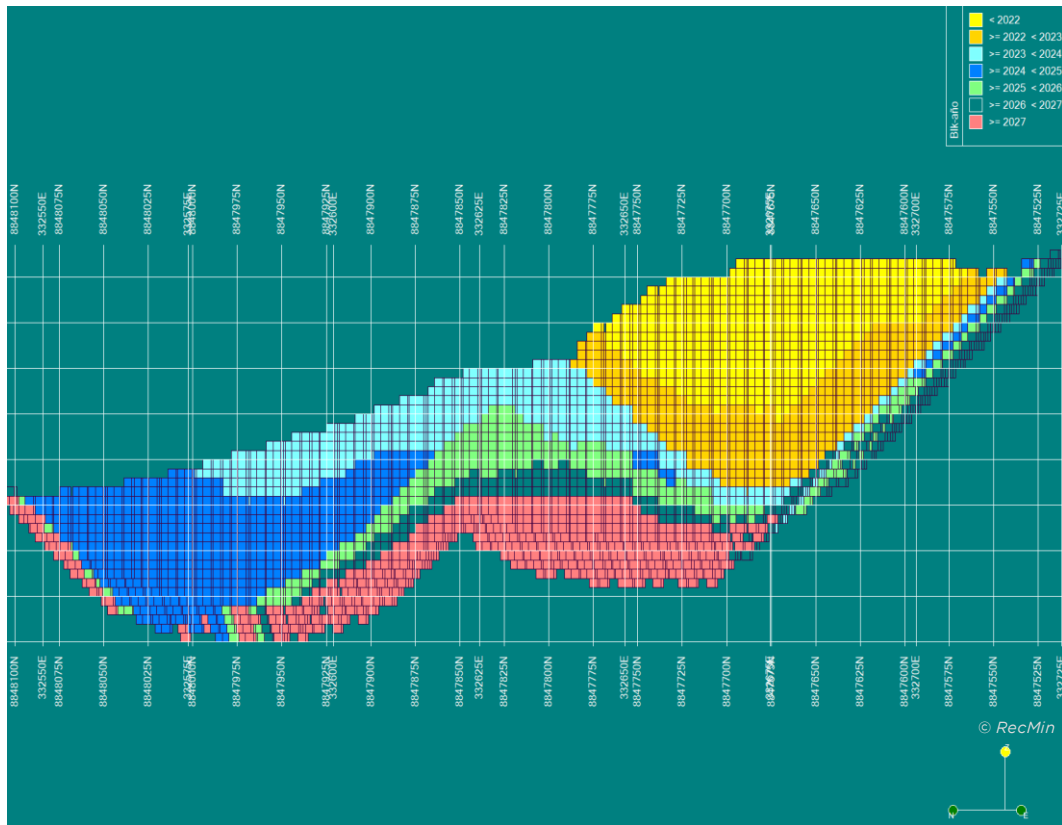


Figura 102. LTP óptimo con color de bloques según año de explotación

De esta vista podría deducirse que cabría la posibilidad de haber problemas en el flanco sur de la explotación (parte derecha de la imagen), ya que, al trazar las cortas, indica que alguno de los años habría que ampliar las bermas 5 metros (un bloque), y podría no ser viable esa opción de ampliación mínima a través del método de perforación y voladura.

El software también permite la visualización de la planificación mes a mes, de forma que debería llevarse a cabo de la siguiente manera:

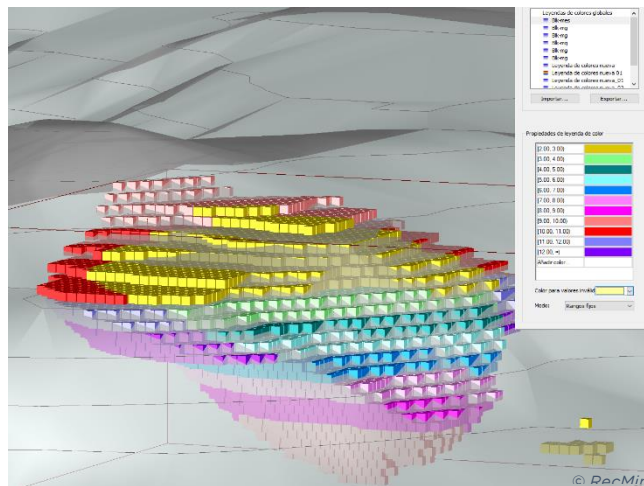


Figura 103. Planificación de la explotación del yacimiento mes a mes



Figura 104. Planificación mes a mes del primer año de explotación en módulo "Dibujo" de RecMin

Con esta herramienta también se permite visualizar la fecha de voladura de cada bloque que conforma el modelo del depósito, obteniendo:

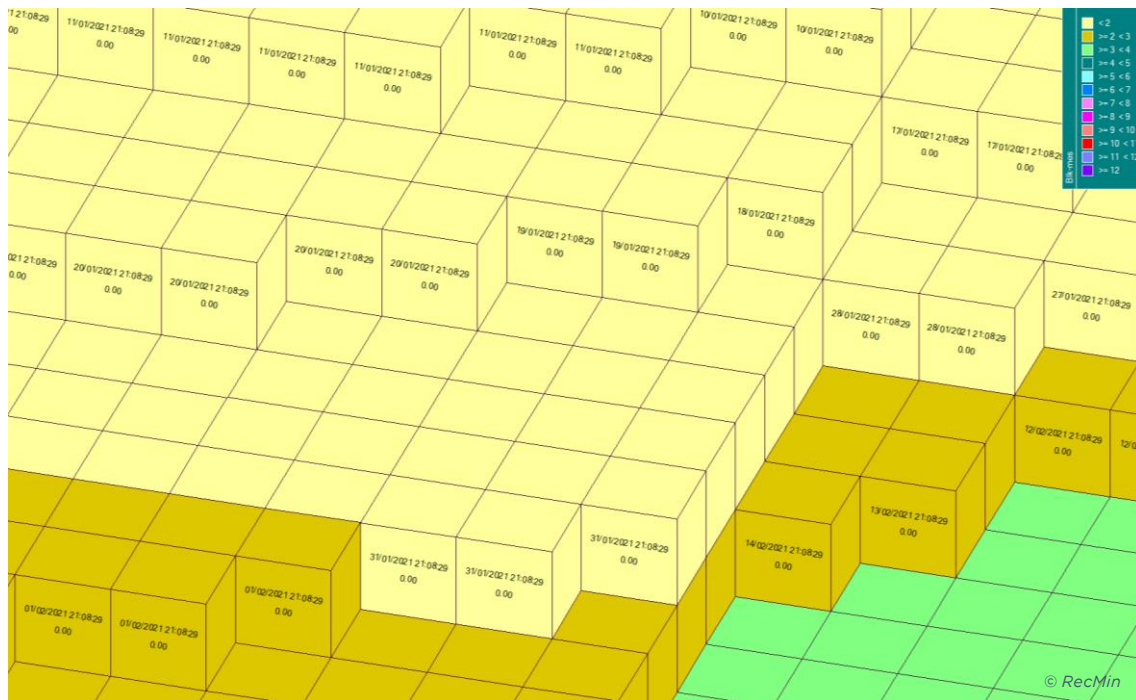


Figura 105. Fecha de voladura de cada bloque del modelo optimizado

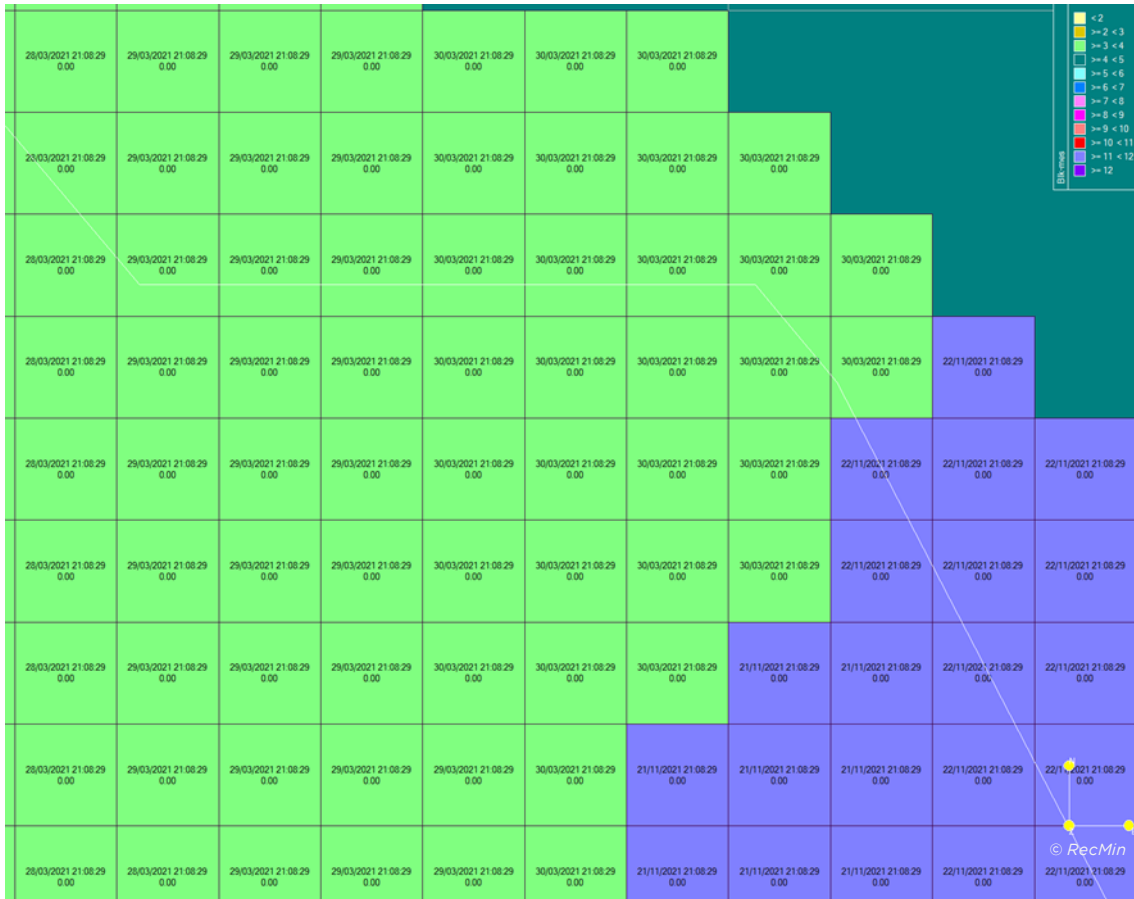


Figura 106. Vista frontal de la distribución de las labores de voladura durante un conjunto de días específicos

Para finalizar el apartado, se procederá a realizar el informe de planificación anual, que detallará las toneladas a extraer anualmente, tanto de mena como de estéril, así como las leyes medias del período:

Figura 107. Interfaz de introducción de datos del informe



Informe 2

Page Width Find | Next

Planificación anual RecMin

		Total =	27,168,438	22.51
año	mena		Peso	plata
2021			4,211,250	27.30
	0		3,324,375	7.41
	1		886,875	101.84
2022			4,220,313	32.42
	0		3,082,500	9.83
	1		1,137,813	93.62
2023			4,220,313	23.03
	0		3,174,063	5.13
	1		1,046,250	77.35
2024			4,231,875	18.43
	0		3,421,875	2.09
	1		810,000	87.44
2025			4,220,313	23.55
	0		2,691,250	6.26
	1		1,529,063	53.98
2026			4,220,313	11.08
	0		3,465,000	2.36
	1		755,313	51.09
2027			1,844,063	20.91
	0		1,089,375	3.27
	1		754,688	46.37

Figura 108. Planificación anual de la mena

© RecMin 1

		Total =	6,920,000	72.94	
año	coste_conc		Peso	plata	Coste de concentrado
2021			886,875	101.84	
	3.74000001		209,375	45.40	\$ 783,062.50
	26.12999916		677,500	119.28	\$ 17,703,074.43
2022			1,137,813	93.62	
	3.74000001		364,063	44.94	\$ 1,361,593.75
	26.12999916		773,750	116.52	\$ 20,218,086.85
2023			1,046,250	77.35	
	3.74000001		475,938	39.94	\$ 1,780,006.25
	26.12999916		570,313	108.57	\$ 14,902,265.15
2024			810,000	87.44	
	3.74000001		346,250	36.56	\$ 1,294,975.00
	26.12999916		463,750	125.44	\$ 12,117,787.11
2025			1,529,063	53.98	
	3.74000001		973,438	34.50	\$ 3,640,656.26
	26.12999916		555,625	88.11	\$ 14,518,480.78
2026			755,313	51.09	
	3.74000001		540,625	29.08	\$ 2,021,937.51
	26.12999916		214,688	106.51	\$ 5,609,784.19
2027			754,688	46.37	
	3.74000001		595,625	28.27	\$ 2,227,637.51
	26.12999916		159,063	114.14	\$ 4,156,302.99

Figura 109. Planificación anual del coste de concentrado

© RecMin



		Total =		6,920,000	72.94
año	recuperacion			Peso	plata
2021				886,875	101.84
	50			209,375	45.40
	80			677,500	119.28
2022				1,137,813	93.62
	50			364,063	44.94
	80			773,750	116.52
2023				1,046,250	77.35
	50			475,938	39.94
	80			570,313	108.57
2024				810,000	87.44
	50			346,250	36.56
	80			463,750	125.44
2025				1,529,063	53.98
	50			973,438	34.50
	80			555,625	88.11
2026				755,313	51.09
	50			540,625	29.08
	80			214,688	106.51
2027				754,688	46.37
	50			595,625	28.27
	80			159,063	114.14

© RecMin 366,674,286.84

Figura 110. Planificación anual de la recuperación

Precio venta 0.7 USD/g
 Coste de mina 2.6 USD/t
 Tasa de interés 10%

Año	Mena (t)	Ley media	Mina (t)	Plata (g)	Ingresos	Coste de concentrado	Coste de mina	Cashflow	Cashflow actualizado	(1+r) ⁿ	VAN acumulado	
1	2021	886,875	101.8	4,211,250	69,404,299.38	\$ 48,583,009.57	\$ 18,486,136.93	\$ 10,949,250.00	\$ 19,147,622.64	\$ 17,406,929.67	110%	\$ 17,406,929.67
2	2022	1,137,813	93.6	4,220,313	80,307,695.54	\$ 56,215,386.88	\$ 21,579,680.60	\$ 10,972,812.50	\$ 23,662,893.77	\$ 19,556,110.56	121%	\$ 36,963,040.23
3	2023	1,046,250	77.4	4,220,313	59,039,325.57	\$ 41,327,527.90	\$ 16,682,271.40	\$ 10,972,812.50	\$ 13,672,444.00	\$ 10,272,309.54	133%	\$ 47,235,349.77
4	2024	810,000	87.4	4,231,875	52,865,496.23	\$ 37,005,847.36	\$ 13,412,762.11	\$ 11,002,875.00	\$ 12,590,210.25	\$ 8,599,283.00	146%	\$ 55,834,632.77
5	2025	1,529,063	54.0	4,220,313	55,959,176.22	\$ 39,171,423.35	\$ 18,159,137.04	\$ 10,972,812.50	\$ 10,039,473.81	\$ 6,233,723.36	161%	\$ 62,068,356.13
6	2026	755,313	51.1	4,220,313	26,155,594.93	\$ 18,308,916.45	\$ 7,631,721.70	\$ 10,972,812.50	\$ (295,617.75)	\$ (166,868.51)	177%	\$ 61,901,487.62
7	2027	754,688	46.4	1,844,063	22,942,698.97	\$ 16,059,889.28	\$ 6,383,940.50	\$ 4,794,562.50	\$ 4,881,386.28	\$ 2,504,923.00	195%	\$ 64,406,410.62
				6,920,000	27,168,438	366,674,286.84	\$ 256,672,000.79	\$ 102,335,650.29	\$ 70,637,937.50	\$ 83,698,413.00		\$ 64,406,410.62

© RecMin

Ley media 52.99 g/t

Figura 111. Cálculo del VAN atendiendo a flujos de caja variables

Como se puede observar, el software considera que la explotación debe llevarse a cabo durante 7 años, frente a los 5 que se preestablecieron para la realización del estudio económico a medio plazo del apartado anterior.

Como se puede observar en la hoja de cálculo realizada, el VAN acumulado sería de 64,406,410.62 USD. Teniendo en cuenta el desembolso inicial de 50 MUSD, el VAN sería de:

$$VAN = 64,406,410.62 - 50,000,000 = 14,406,410.62 \text{ MUSD}$$



7.13.7. Exportación de la optimización a Surpac

Para la creación de una corta que se pueda intersectar con la superficie, para poder cubirla posteriormente, se exportarán estos datos obtenidos con el software RecMin a Surpac de nuevo, proceso contrario al realizado anteriormente.

Para ello, desde el módulo “Yacimientos”, se accederá a *Bloques* → *Exportar datos de bloques*:

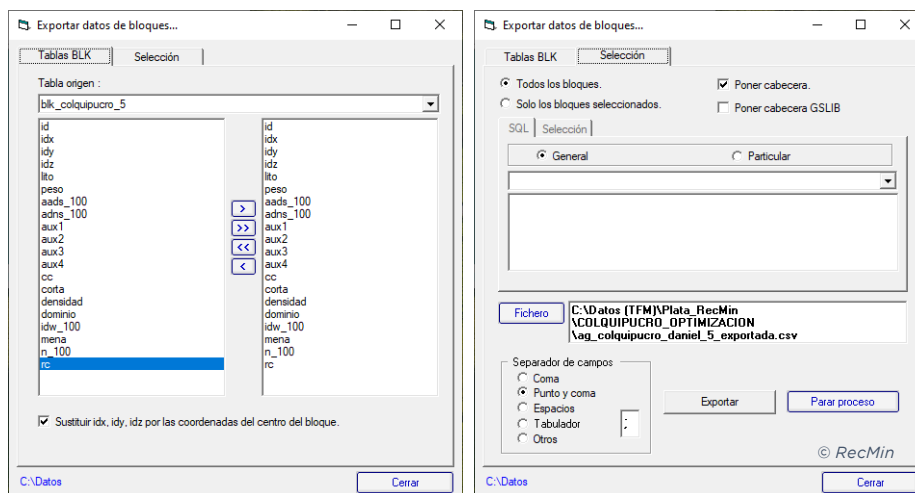


Figura 112. Proceso de creación de archivo para importar a Surpac el modelo

Una vez se crea el archivo, se importa en Surpac, a través de *Block Model* → *Block Model* → *Import* → *Text file*

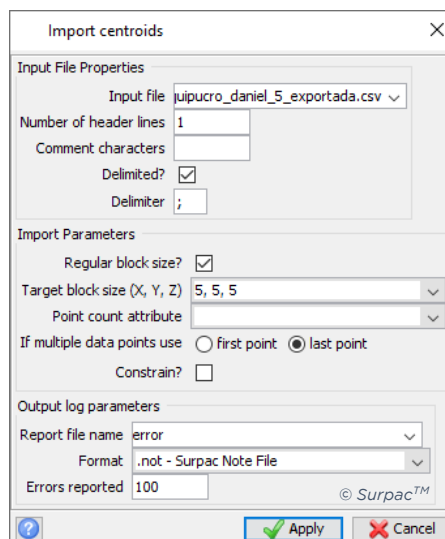


Figura 113. Datos de importación

La base de datos de bloques exportada tendría la siguiente apariencia una vez se filtran los bloques optimizados:



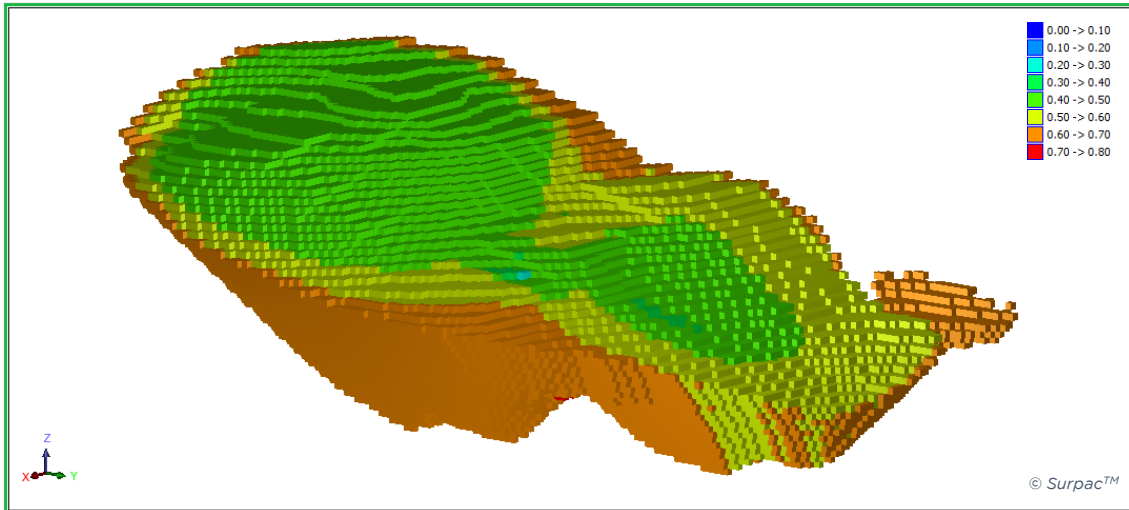


Figura 114. Modelo de bloques importado

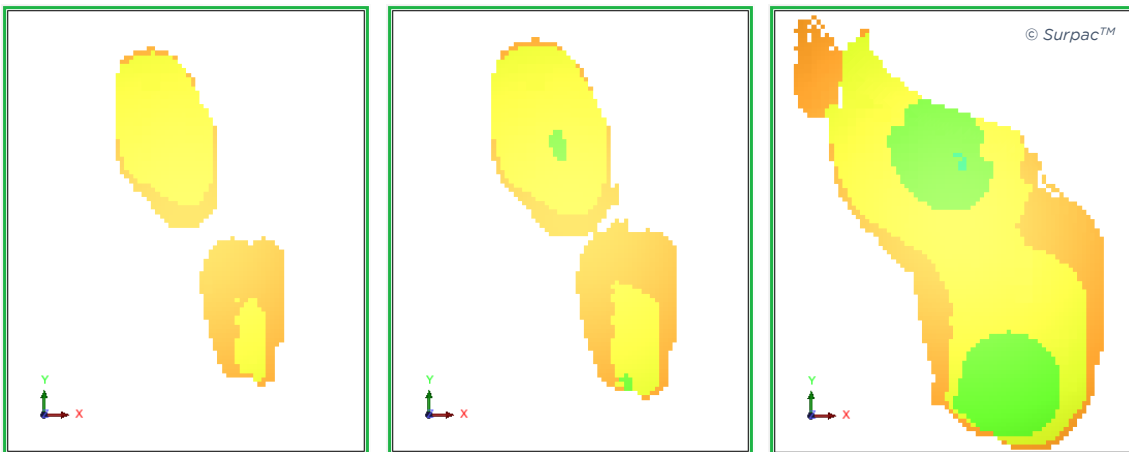


Figura 115. Vista en planta de los cortes realizados a los bloques para conformar la corta

Corte a corte. Si irán trazando polilíneas hasta tener un número suficiente para crear el levantamiento. En este caso, se debe prestar especial atención a la zona donde los dos vasos que conforman la corta final se unen.

El resultado final de las polilíneas levantadas es el siguiente:

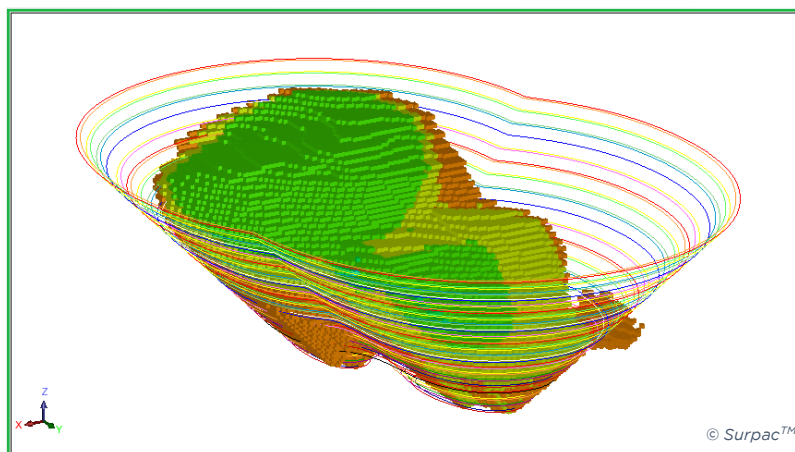


Figura 116. Polilíneas creadas alrededor de los bloques de interés para conformar la corta

Como se puede observar, ya se introdujeron los datos concernientes al ancho de las bermas a la hora de levantar las polilíneas, que será de 5 metros. El ángulo de los bancos será de 60° , con una altura de 12 metros, conformando el ángulo final de talud de 45° necesario para ceñirse correctamente a los bloques, como se especificó en los pasos previos a la optimización en RecMin.

A través de la herramienta *Surfaces* → *Create DTM from layer* el software detectará el conjunto de polilíneas y creará el archivo .dtm final de la corta, obteniendo:

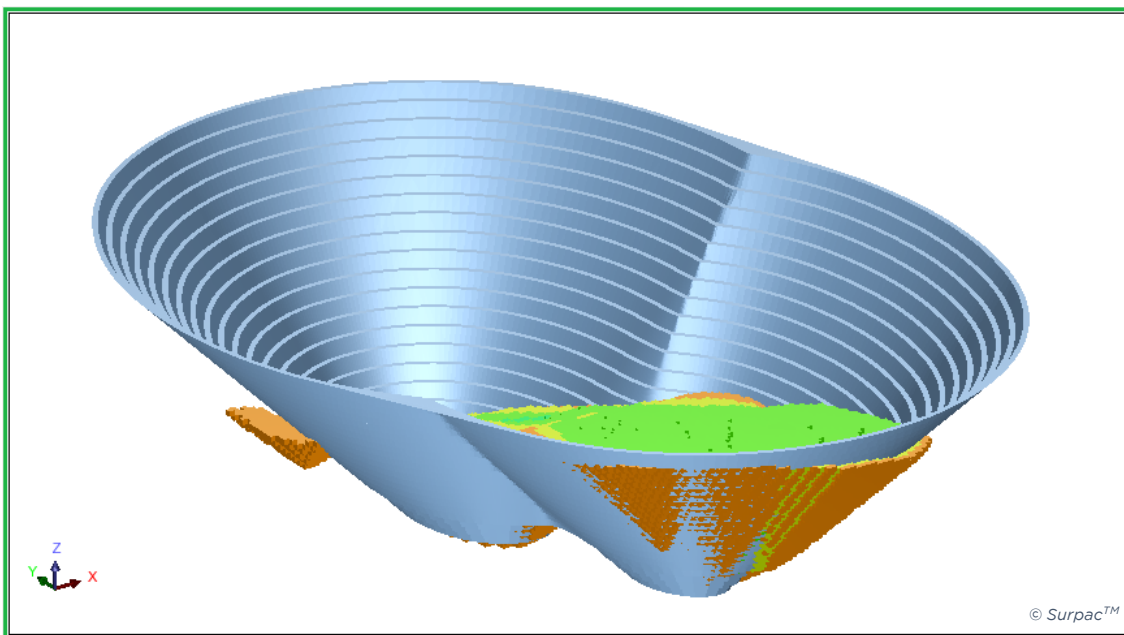


Figura 117. Resultado final de la corta planteada para el modelo de bloques optimizado

Este archivo .dtm generado deberá a continuación intersecarse con la superficie del terreno, para obtener la apariencia real que esta corta tendría en el entorno; para ello, se deberá acceder a *Surfaces* → *Clip or intersect DTMs* → *Lower triangles of 2 DTMs*, se pondrá nombre al archivo creado, y se seleccionará, en primer lugar la superficie del terreno, y en segundo lugar, la corta generada. El software procesará la información y creará otro archivo .dtm de la siguiente apariencia:

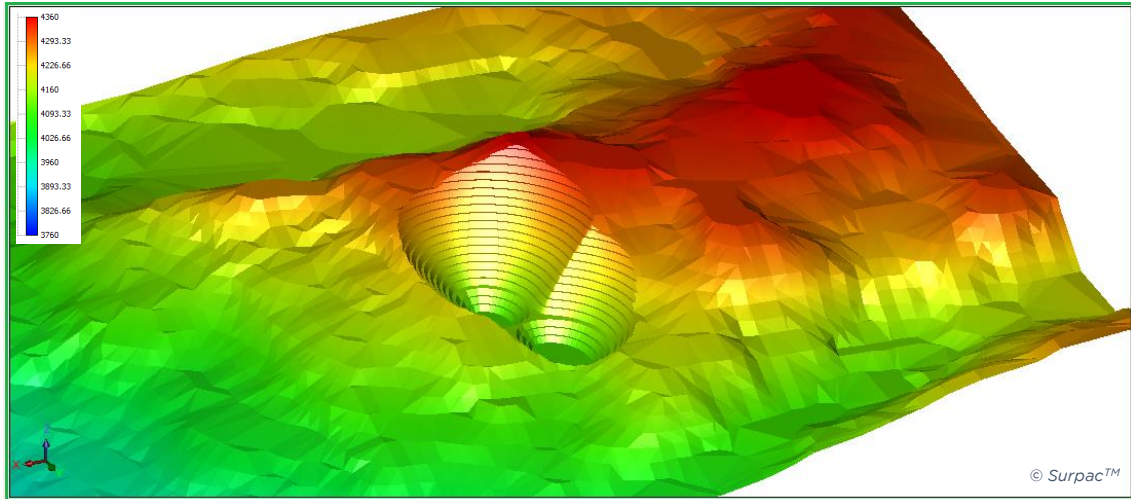


Figura 118. Vista aérea de la corta proyectada con color según cota

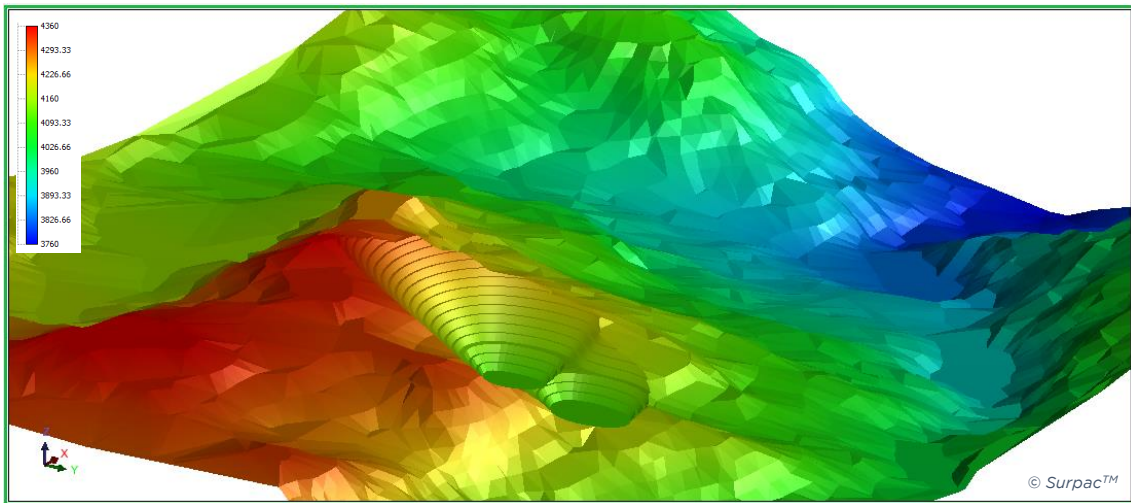


Figura 119. Vista inferior de la corta proyectada con color según cota

En último lugar, se abrirán los bloques de las cortas óptimas halladas con los sólidos, para comprobar si pudieran quedar partes de estos sin explotar tras los cálculos y la optimización:

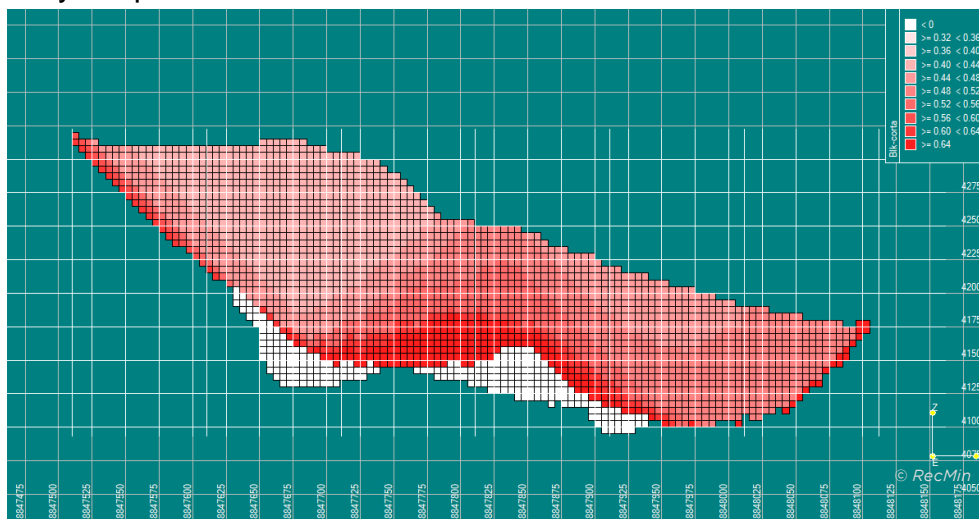


Figura 120. Visualización de la corta óptima abierta junto con los dominios

Como se puede deducir de la figura y su leyenda, la porción de bloques de color blanco que se observa por debajo de las cortas óptimas se trata de aquellos que no entran dentro de la planificación que realizó el software para su explotación.



CONCLUSIONES

En este proyecto se llevó a cabo la modelización del yacimiento de plata de Colquipucro, situado en San Pedro de Pillao (Cerro de Pasco, Perú), a partir de los datos de un conjunto de sondeos propiedad de la empresa minera canadiense Tinka Resources Limited (Ltd.).

Para la parte correspondiente con la modelización se utilizó el software Geovia Surpac™, mientras que la optimización fue llevada a cabo con RecMin.

Tras la implementación de un modelo de bloques se estimaron unos recursos minerales de 747.59 toneladas de plata con una ley media de 48.97 g Ag/t, de las cuales 543.64 t (18.06 Moz) pertenecen a recursos indicados, con una ley media de 51.19 g Ag/t, y 203.95 t (6.56 Moz) a recursos medidos, con una ley media de 43.86 g Ag/t.

En lo correspondiente a la optimización, se estableció un precio de minería de 2.6 USD/t, un ángulo de talud final de 45°, costes de concentrado de 3.74 y 21.65 USD/t, y recuperaciones del 50 y 80 %, respectivamente; en función de si la mena se considera de alta o baja ley (umbral de 60 g Ag/t), y gastos generales y administrativos de 4.48 USD/t. Asimismo, los precios de mercado de la plata procesada se establecieron en el margen de los 0.05 a 0.7 USD/g, en intervalos de 0.025 USD/g, para la obtención de un número amplio de cortas óptimas, que pudieran implantarse según el abanico de horizontes establecidos.

De este modo, el software consideró óptimas cortas para precios superiores a 0.275 USD/g, hasta el valor final de 0.7 USD/g.

Las reservas probables extraídas de los cálculos fueron de 424.51 toneladas de plata (14.10 Moz) con una ley media de 73.504 g Ag/t.

Una vez extraída la información perteneciente a recursos y reservas, se llevaron a cabo dos estudios financieros; uno de ellos simple y otro a largo plazo (*long term planning*) con flujos de caja variables en función de las cortas óptimas, implementado con herramientas específicas del software RecMin.

Del primero de los estudios se extrajo un VAN de 7.46 millones de USD, con una tasa interna de retorno (TIR) del 15 %, mientras que el segundo de los estudios



emite un VAN acumulado de 64.4 millones de USD al que, restándole el desembolso de capital inicial queda en 14,406,410.62 MUSD.

El incremento entre el VAN calculado con el RecMin aplicando flujos de caja variables vendría explicado por una mejor planificación, haciendo que el proyecto sea más rentable de este modo.

Para ambos estudios se especificó un coste de capital inicial de 50 millones de USD, con un interés del 10 %.





REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Howe, P. D., Dobson, S. (2002). Silver and Silver compounds environmental aspects
- ATSDR. (1990) Toxicological profile for silver. Atlanta, GA, US Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (TP-90-24)
- Russel, A. B., Kramer, J. R. (1999). Structural chemistry and geochemistry of silver-sulfur compounds: Critical review. Departments of Chemistry, Geography and geology, McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4M1, Canada
- Smith, I., Carson, B. (1977). Trace metals in the environment. Volume 2. Silver. Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, 469 pp
- Fowler, B., Nordberg, G. (1986). Silver. In: Friberg L, Nordberg G, Vouk V, eds. Handbook on the toxicology of metals. Volume II. Specific metals. New York, NY, Elsevier, pp. 521–530
- Eisler, R. (1997). Silver hazards to fish, wildlife, and invertebrates: A synoptic review. Washington, DC, US Department of the Interior, National Biological Service, 44 pp. (Biological Report 32 and Contaminant Hazard Reviews Report 32)
- Freeman, R. (1979). Ecological kinetics of silver in an alpine lake ecosystem. In: Marking L, Kimerle R, eds. Aquatic toxicology. Proceedings of the 2nd annual symposium on aquatic toxicology. Philadelphia, PA, American Society for Testing and Materials, pp. 342–358 (ASTM Special Technical Publication 667)
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú. Mapas geológico, geomorfológico, geográfico
- Ross, D. (2017). Technical Report of the Mineral Resource Estimate for the Ayawilca Property, Department of Pasco, Perú
- Peralta, E., Colquhoun, W., El Rassi, D., Johnston, A., Searston, S. (2019). Technical Report
- Pfiffner, A., González, L. (2013). Mesozoic-Cenozoic Evolution of the Western Margin of South America: Case Study of the Peruvian Andes
- Cobbing, J., Sánchez, A. W. (1996). Mapa geológico del cuadrángulo de Yanahuanca, departamento de Pasco (Hoja 21-j): INGEMMET
- Coney, P. J. (1971). Structural evolution of the Cordillera Huayhuash, Andes of Peru: Geological Society of American Bulletin asdad
- Silitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems
- Davenport, W. G., Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C. (2011). Extractive Metallurgy of Copper. Elsevier
- Wadsworth, M. E., Miller, J. D. (1979). Hydrometallurgical processes



- Domic Mihovilovic, E. M., (2004). Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones
- Johnson, C. M., Beard, B. L., Roden, E. E. (2008). The iron isotope fingerprints of redox and biogeochemical cycling in modern and ancient Earth
- Ghorbani, Y., Becker, M., Mainza, A., Franzidis, J. P., Petersen, J. (2011). Large particle effects in chemical/biochemical heap leach process - A review
- Escapule, C. B., Escapule, L. W., Bailey Escapule, B. (1981). Heap leaching and silver recovery at the state of Maine
- Krzemien, A., Riesgo, P., Suárez, A., Diego, I. (2016). Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources, and reserves. Elsevier



PÁGINAS WEB CONSULTADAS

<https://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad44.pdf>

<https://www.ingemmet.gob.pe/>

<http://www.iimp.org.pe/mineria-en-el-peru/legislacion>

<https://www.cites.org/eng/disc/what.php>

<https://www.iucnredlist.org/>

<https://www.bnamericas.com/es/perfil-empresa/wood-plc>

<https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/GEOVIA/PDF/brochure/GEOVIA-Surpac2019-Brochure.pdf>

<https://www.mining-technology.com/features/feature-the-10-biggest-silver-mines-in-the-world/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687511001178>

<https://www.911metallurgist.com/heap-leaching-silver/>

<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/cianuracion-oro-plata/>

https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/Lixiviaci%C3%B3n_con_cianuro

<https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS-SERVICES/GEOVIA/PDF/brochure/GEOVIA-Surpac2019-Brochure.pdf>

https://www.dailyfx.com/espanol/analisis_del_mercado/cotizacion_materias_primas/2020/03/16/Precio-del-oro-y-de-la-plata-en-cada-libre-los-activos-de-refugio-no-escapan-a-la-presion-de-venta-hoy.html

<https://oro.bullionvault.es/>



REFERENCIAS FOTOGRÁFICAS

Figura 1. <https://andina.pe/agencia/noticia-tinka-granted-drill-permit-for-tibillos-copper-porphyry-project-in-peru-341081.aspx>

Figura 2. Elaboración propia (datos catastrales extraídos de <https://www.ingemmet.gob.pe/mapas2>) **Error! Marcador no definido.**

Figura 3. <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>

Figura 4. <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>

Figura 5. Elaboración propia (información extraída de <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>

Figura 6.

<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/CDROM/2013/files/LGMESPANOL.pdf>

Figura 7. Elaboración propia (información extraída de <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>)

Figura 8. Elaboración propia (información extraída de <http://hub.arcgis.com/datasets/15967717c96a43869f380ac2c7213d0a>)

Figura 9. <http://hub.arcgis.com/datasets/15967717c96a43869f380ac2c7213d0a>

Figura 10.

<http://hub.arcgis.com/datasets/15967717c96a43869f380ac2c7213d0a>

Figura 11. <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>

Figura 12. Silitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems

Figura 13. <https://www.tinkaresources.com/projects/technical-reports>

Figura 14. Elaboración propia (datos catastrales extraídos de <https://www.ingemmet.gob.pe/mapas2>)

Figura 15. <https://blog.hexagonmining.com/paring-the-processes-faster-ore-control-and-reconciliation-at-penasquito/>

Figura 16. <https://polska-org.pl/3973362,foto.html>

Figura 17. <https://www.paginasiete.bo/economia/2020/6/14/desde-1952-en-promedio-bolivia-tuvo-un-ministro-de-mineria-por-ano-258354.html>

Figura 18. <https://kghm.com/es/negocio/extraccion-y-enriquecimiento/lubin>

Figura 19. <https://kghm.com/es/negocio/extraccion-y-enriquecimiento/rudna>

Figura 20. <https://www.mineria-pa.com/noticias/fresnillo-avanza-en-un-nuevo-distrito-minero-en-mexico/>

Figura 21. <https://energiminas.com/antamina-produjo-145100-toneladas-de-cobre-de-enero-a-diciembre-de-2018/>

Figura 22. <http://iminco.net/jumbo-operator-cannington-mine-fifo-townsville-qld/>

Figura 23. <https://www.mining.com/heap-leach-minings-breakthrough-technology/>

Figura 24. <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixiviacion-en-pilas/>

Figura 25. <https://www.aquaroyalspring.com/gallery>

Figura 26. <https://www.statista.com/statistics/264640/silver-production-by-country/>



- Figura 27. Elaboración propia
- Figura 28. Elaboración propia (sondeos representados con QGis)
- Figura 29. Elaboración propia (sondeos representados con QGis)
- Figura 30. Elaboración propia
- Figura 31. Elaboración propia
- Figura 32. Elaboración propia
- Figura 33. Elaboración propia
- Figura 34. Elaboración propia
- Figura 35. Elaboración propia
- Figura 36. Elaboración propia
- Figura 37. Elaboración propia
- Figura 38. Elaboración propia
- Figura 39. Elaboración propia
- Figura 40. Elaboración propia
- Figura 41. Elaboración propia
- Figura 42. Elaboración propia
- Figura 43. Elaboración propia
- Figura 44. Elaboración propia
- Figura 45. Elaboración propia
- Figura 46. Elaboración propia
- Figura 47. Elaboración propia
- Figura 48. Elaboración propia
- Figura 49. Elaboración propia
- Figura 50. Elaboración propia
- Figura 51. Elaboración propia
- Figura 52. Elaboración propia
- Figura 53. Elaboración propia
- Figura 54. Elaboración propia
- Figura 55. Elaboración propia
- Figura 56. Elaboración propia
- Figura 57. Elaboración propia
- Figura 58. Elaboración propia
- Figura 59. Elaboración propia
- Figura 60. Elaboración propia
- Figura 61. Elaboración propia
- Figura 62. Elaboración propia
- Figura 63. Elaboración propia
- Figura 64. Elaboración propia
- Figura 65. Elaboración propia
- Figura 66. Elaboración propia
- Figura 67. Elaboración propia
- Figura 68. Elaboración propia
- Figura 69. Elaboración propia
- Figura 70. Elaboración propia



- Figura 71. Elaboración propia
Figura 72. Elaboración propia
Figura 73. Elaboración propia
Figura 74. Elaboración propia
Figura 75. Elaboración propia
Figura 76. Elaboración propia
Figura 77. Elaboración propia
Figura 78. Elaboración propia
Figura 79. Elaboración propia
Figura 80. Elaboración propia
Figura 81. Elaboración propia
Figura 82. Elaboración propia
Figura 83. Elaboración propia
Figura 84. Elaboración propia
Figura 85. Elaboración propia
Figura 86. Elaboración propia
Figura 87. Elaboración propia
Figura 88. Elaboración propia
Figura 89. Elaboración propia
Figura 90. Elaboración propia
Figura 91. Elaboración propia
Figura 92. Elaboración propia
Figura 93. Elaboración propia
Figura 94. <https://oro.bullionvault.es/Precio-de-la-plata.do#>
Figura 95. <https://oro.bullionvault.es/Precio-de-la-plata.do#>
Figura 96. Elaboración propia
Figura 97. Elaboración propia
Figura 98. Elaboración propia
Figura 99. Elaboración propia
Figura 100. Elaboración propia
Figura 101. Krzemien, A., Riesgo, P., Suárez, A., Diego, I. (2016). Beyond the pan-european standard for reporting of exploration results, mineral resources and reserves. Elsevier
Figura 102. Elaboración propia
Figura 103. Elaboración propia
Figura 104. Elaboración propia
Figura 105. Elaboración propia
Figura 106. Elaboración propia
Figura 107. Elaboración propia
Figura 108. Elaboración propia
Figura 109. Elaboración propia
Figura 110. Elaboración propia
Figura 111. Elaboración propia



Figura 112. Elaboración propia

Figura 113. Elaboración propia

Figura 114. Elaboración propia

Figura 115. Elaboración propia

Figura 116. Elaboración propia

Figura 117. Elaboración propia

Figura 118. Elaboración propia

Figura 119. Elaboración propia

Figura 120. Elaboración propia

Figura 121. Elaboración propia



