



Categorización de Recurso Minero en un Pórfido Cuprífero, Región de Antofagasta, Chile

2026

Autor: Sr. Víctor Yanot Cid Márquez

Profesor Guía: Msc. Abraham Elías González Martínez

Profesores Comisión: Msc. Liubow González Martínez

Sr. Ramiro Bonilla Parra

Resumen

El proceso de categorización del recurso minero en un pórfido cuprífero de la Región de Antofagasta, de la franja contempla etapas de alta acuciosidad con procesos normados sistemáticos, de parámetros específicos para el depósito. Este alto conocimiento del proceso permite entregar información de alta confiabilidad para el compromiso de los planes de negocios asociados. En el presente estudio, de un depósito tipo, se determinan campañas sucesivas de perforación que se complementan para definir las variaciones e implicancias de estas en las matrices de sustentabilidad.

Palabras Clave: Pórfido Cuprífero, Categorización, Recurso Minero, Sondajes, Matriz Sustentabilidad.

1 Introducción

En un yacimiento tipo pórfido cuprífero, la certidumbre de la información geológica requerida para el desarrollo de la explotación minera y de planes de negocio es de suma relevancia, para cumplimiento de normativa legislativa, interna de cada compañía y para determinar la vida útil de una faena minera.

El proceso de categorización del recurso minero en un pórfido cuprífero de la Región de Antofagasta, de la franja contempla etapas de alta acuciosidad con procesos normados sistemáticos, de parámetros

específicos para el depósito. Este alto conocimiento del proceso permite entregar información de alta confiabilidad para el compromiso de los planes de negocios asociados. En el presente estudio, de un depósito tipo, se determinan campañas sucesivas de perforación que se complementan para definir las variaciones e implicancias de estas en las matrices de sustentabilidad.

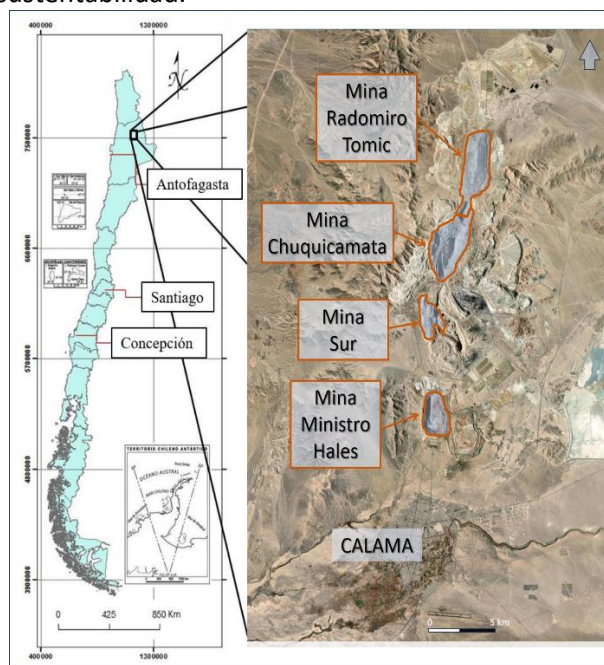


Figura 1. Mapa de Ubicación de pórfidos cupríferos mio-oligocénicos, zona de referencia en estudio, (Modificado de Peña, 2022).

Sobre la base de la información otorgada por los sondeos se determinan las asociaciones minerales, tipo de ocurrencia mineralógica, zonas minerales, dominios estructurales, concentración de elementos de mena y ganga, y de características geomecánicas.

La variabilidad de la interdependencia de los datos es la que determina, por simple distancia entre los especímenes, la categoría del recurso, denominada categoría por geometría. A mayor cantidad de muestras cercanas mejora la categoría en, y en torno, al punto definido; para una mayor certidumbre, lo que genera la capacidad de desarrollar matrices de sustentabilidad para un plan de negocios y desarrollo acorde a la normativa vigente.

Objetivo General

Generar modelo de categorías de recursos para comparación en matriz de sustentabilidad, por incorporación periódica de campañas de sondeos

Objetivos Específicos

Caracterizar proceso de categorización.
 Describir variables geológicas requeridas para el desarrollo del cálculo en un Pórfido Cuprífero.
 Construir Matriz de Sustentabilidad asociado a un Programa teórico de desarrollo minable.
 Analizar evolución de las Matrices de Sustentabilidad de Recurso Minero por incorporación sucesiva de campañas de sondeo.

2 Marco Geológico

Los pórfidos cupríferos Eoceno superior-Oligoceno en la región de Antofagasta se disponen en una franja de orientación NS, en el segmento septentrional de la Cordillera de Domeyko, con rocas definidas como el basamento de edad Carbonífero superior - Pérmico inferior, que incluye unidades metamórficas, volcánicas y sedimentarias (Complejo Metamórfico Limón verde, Complejo Meta Plutónicos Cerros de Chuquicamata, y la Fm. Agua Dulce de correlación temporal y litológica con la Fm. Collahuasi); durante el Mesozoico se disponen secuencias volcánicas y sedimentarias marinas y continentales en el Triásico (Complejo intrusivo Elena, Fm Quetena y Fm Tuina), durante el Jurásico (Fm. Moctezuma y Fm Cerritos Bayo) y ya en el Cretácico (Fm. Quebrada Mala y secuencias Intrusivas hipabisales), luego en el inicio del Cenozoico, el Paleógeno (Fm. Icanche, Complejo

Los Picos, Complejo Fortuna, Complejo Chuquicamata y Complejo Ministro Hales, Figura 2, (Tomlinson y otros, 2018; Peña, 2022).

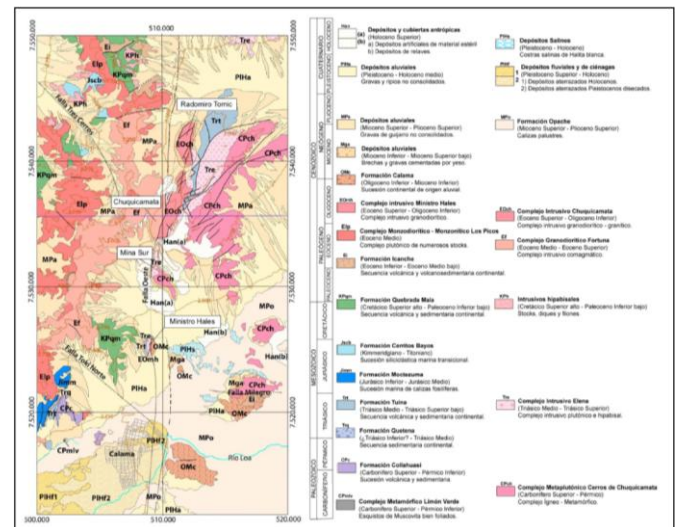


Figura 2. Mapa geológico de área en estudio (tomado de Tomlinson, 2018).

3 Metodología

Para la estimación de Recurso minero se requiere de una base de datos de sondeos validada que contenga los parámetros analíticos, de caracterización y de clasificación de los parámetros geológicos aplicables a la minería (Litología, Zonas Minerales, Dominios Estructurales, Clasificación de la Mena, Tipo y Ocurrencia de Mineralización), con la cual se generará un Modelo de Bloques definido por algún método geométrico o en base a variograma apropiado (ej.: Inverso a la distancia al cuadrado o Kriging Ordinario). Esta base de datos puede ser generada en cualquier programa computacional ofimático para planillas, que permita generar un archivo de valores que sea importables a programas especializados como Surpac, Gems, Vulcan, MinePlan, Leapfrog, RecMin, etcétera .

En conjunto, se preparan los volúmenes espaciales delimitadores (sólidos) de la zona a categorizar (dominios geológicos y envolventes económicas), y las especificaciones de estimación (variogramas, mallas de búsqueda y la definición de los mínimos y máximos de muestras a relacionar).

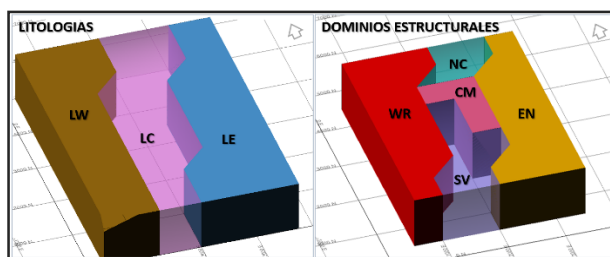


Figura 3. Imagen en perspectiva de sólidos litológicos y de dominios estructurales de la zona de estudio, vista en perspectiva.

El ejercicio definido para el presente estudio, se realiza con material inédito derivado de experiencia desarrollada en estos yacimientos, considerando un yacimiento tipo pórfido cuprífero de orientación N-S de 3km en este eje y de 2km en la dirección E-W. Definiendo tres unidades litológicas intrusivas de similar orientación, denominadas LW, LC y LE, que para efectos de este estudio corresponderían al mismo evento mineralizador, considerando la dispuesta en el centro como la mas reciente. (Figura 2). En conjunto, se determinan cinco dominios estructurales dentro del área a tratar WR, NC, CM, SV y EN (Figura 3), cada uno de los cuales presenta características que permiten unificar características geológicas estructurales (geometrización de los cuerpos) que permiten controlar la anisotropía de las búsquedas entre muestras, garantizar la homogeneidad estadística por tendencias direccionales de vetillas y estructuras con patrones mineralizadores similares y delimitan los tipos de mineralización estructural.

Se realiza inicialmente un proceso de incorporación de campañas sucesivas de sondajes a malla regular con trazas dispuestas orientadas hacia el este (azimutal 90°) e inclinaciones constantes de -60°; En la Tabla 1 se indica la cantidad de sondajes y metros perforados, considerando en primera instancia distanciamiento de 200m (176 sondajes para esta malla) con longitudes que varían aleatoriamente entre 200 y 600m que tienen como objetivo el reconocimiento litológico del área, luego un ejercicio en que al proceso anterior se le adicionan campaña de sondaje con collares dispuestos en puntos medios del anterior, o sea, distanciados regularmente a 100m (475 sondajes de longitud 600m), cuyo objeto es generar las zonas de asociaciones mineralógicas, sistemas estructurales, la definición de las cuerpos litológicos y un primer alcance de los Dominios

Estructurales; y en una tercera etapa se subdividen cuatro campañas para información detallada de sondajes dispuesto en puntos medios de las anteriores a 50m (1850 sondajes, de longitudes 600m), la distribución de los sondajes para cada una de estas subcampañas, para este estudio, se encuentran definidas al azar para no condicionar las matrices resultantes.

Tabla 1 : Tabulación de cantidad de sondajes y metros perforados por cada campaña, temporalmente progresiva.

Campaña	N° Sondajes	Metros	Metros Acumulados
P1	176	69,000	69,000
P2	475	285,000	354,000
P3.10	472	283,200	637,200
P3.20	436	261,600	898,800
P3.30	457	274,200	1,173,000
P3.40	485	291,000	1,464,000

Esta última campaña representa el requerimiento de perforación en el tiempo, para cumplimiento de las etapas definidas en el plan de producción y desarrollo (trienios, quinquenios, decenios, etc.), Figura 4.

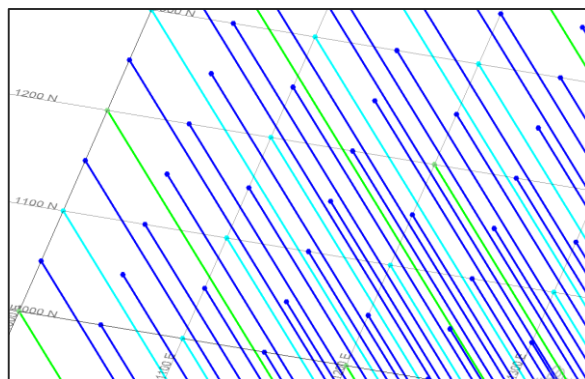


Figura 4. Mapa con distribución de collares de campañas regulares de perforación. P1, campaña inicial a 200m, verde; P2 distanciamiento a 100m, cian; P3 malla intermedia a 50m, azul. Grilla 100x100m.

La ejecución del proceso se inicia con la validación espacial, codificación y geometría de los datos de sondajes, cuerpos geométricos y características modelo de bloques. Para continuar con la revisión de la información del valor resultante de la estimación de ley en el modelo de bloques, contrastado con el dato del sondaje, que en este ejercicio es constante, pero se debe ejecutar para cumplir con la metodología y validar la correcta disposición de la información. Esta información es compositada para una disposición regular de la información y la

generación del cálculo de la distancia entre las muestras; es común definir en los parámetros de homogeneización de la data por medio de “Run Length” o por “Bench Compositing”; en el primer método se reduce la manipulación de los datos y se presenta una buena adaptación a los límites geológicos definidos sobre todo en el ejercicio presentado con datos regulares, sin embargo, al disponerse de datos propios de un depósito en explotación las orientaciones de los sondajes serán muy diversas, resultando en información con distribución espacial irregular. En el método de Composición por Banco, se dispondrá de información regularmente espaciada a lo menos en la vertical, y que podría representar de mejor manera la certidumbre de información por cada nivel a explotar, se sugiere incluso definir una composición por este método pero en fracciones de la altura definida para la explotación, según el plan de desarrollo. Para el presente ejercicio se dispondrá del desarrollo de la información a partir del primer método.

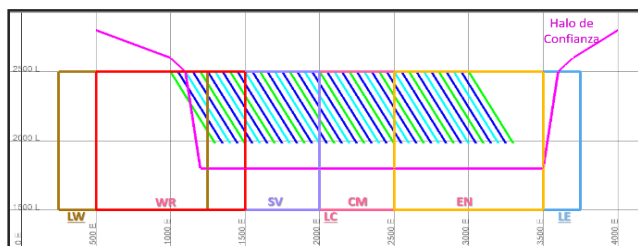


Figura 5. Sección 2400N, evidenciando las relaciones espaciales de Litologías (LW, LC y LE), Dominios Estructurales (WR,SV, CM y EN), junto a Halo de Confianza (nótese que corresponde a una superficie delimitadora, para selección de data).

En un pórfido cuprífero es común que se presenten zonas económicas de oxidación, enriquecimiento secundario y zonas sulfuradas, definidas por su proceso genético y para la obtención de la mena; por lo que la malla de estimación tendrá distintos valores para el análisis del supergeno y del hipógeno, producto de la variación en la homogeneidad de la distribución de los datos, así también, se concebirán sólidos separados para restringir las zonas de estimación y dominios estructurales, según el nivel de confianza geológica. En el caso en estudio, se desarrollan con información que simula únicamente la mineralización en el hipógeno.

La definición del modelo de bloques se configura de bloques de 20x20m en la base por 15m de alto (altura

menor utilizada en la explotación en estos depósitos en Rajos a Cielo Abierto, en esta franja metalogénica). En el modelo de bloques se incorporan las nuevas variables que se utilizan en el cálculo geométrico, la preclasificación, la distancia de las muestras, categoría y el número de datos utilizados en cada espécimen.

Luego se genera el proceso de cálculo por el método al Vecino más Cercano (NN, Nearest Neighbor) , se considera en esta configuración que solo se obtengan solo dos datos del propio sondaje y que sus preferencias de búsqueda se determinen por lo indicado en la Tabla 1, para definir mediante la distancia obtenida su clasificación como Medido (para valores de alta certidumbre geológica y estructural, por lo general malla en torno a los 50x50m), Indicado (zonas que se pueda dar continuidad a las leyes y a la geología para producción a mediano plazo con confianza razonable, que pueden estar en la malla hasta 100x100m) y por sobre esta distancia, pero dentro del área de confianza, el Recurso Inferido (sin continuidad conocida de la geología y de las leyes completamente confirmada). Esta área de confianza se define como una envolvente que incorpore la información disponible de sondajes y el plan final de desarrollo del depósito, en este ejercicio es de 200m, Figura 5.

Tabla 2: Características de búsqueda de por Vecino mas Cercano, por dominio estructural.

Dominio Estructural	Rumbo Búsqueda		Longitud Búsqueda Medido m			Longitud Búsqueda Indicado m		
	Acimut	Inclinación	Eje Mayor	Semi Eje	Eje Menor	Eje Mayor	Semi Eje	Eje Menor
WR	40°	75°	75	60	50	80	50	80
NC	60°	55°	75	50	50	90	60	90
CM	10°	80°	75	50	50	90	60	90
SV	15°	75°	75	50	50	90	60	90
EN	45°	80°	75	60	60	80	50	80

Las características de este proceso de cálculo se pueden generar por medio de programas computacionales con códigos de programación desarrollados con los parámetros requeridos para cada depósito, actualmente el lenguaje Python es una herramienta que presenta librerías especializadas para geoestadística y que han sido utilizadas en este trabajo (Scpy, NumPy, PyVista, Pandas, etc.).

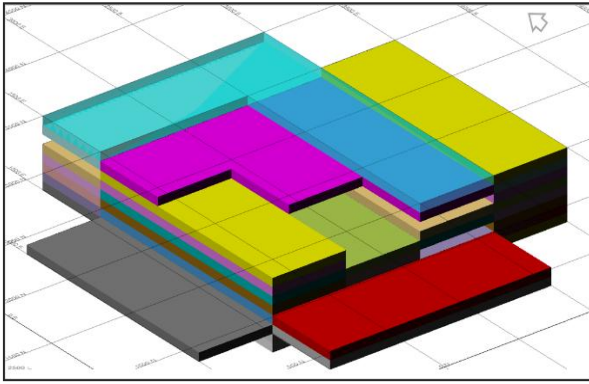


Figura 6 . Plan de Desarrollo diseñado para el presente ejercicio, desde periodo P1 a P32, se han ocultado los primeros años para evidenciar la estructura del diseño de producción.

La categorización del recurso se efectúa de acuerdo con el Plan de Desarrollo vigente, Figura 6, que se tiene para el yacimiento, esto es, el diseño de las fases por periodo, considerando el desarrollo en material estéril y con destino a proceso de obtención y concentración (Cu, Mo, Au, etc.), por lo que se cuantifica la cantidad de mena contenida, denominada Fino, y su evolución en cada año del plan, que en el presente estudio corresponde a 32 periodos. Las proporciones entre el fino definido en cada categoría indican proporcionalmente, llevado a porcentaje, el reporte de la Categorización del Recurso.

4 Resultados

Para el presente estudio la categorización del recurso desplegada en la Gráfica 1, indica el impacto de la incorporación de nuevos sondeos en la certidumbre de la información. Dado que los distanciamientos de Para evidenciar esta mejora, en la Figura 7, se representa para las plantas 1975z, 2275z y 2485z, despliegue de los sondeos de las diversas campañas acumuladas y la resultante de categorías. En la Figura 8, los sondeos de las campañas P1, P2 y P3.10 determina un área importante al este de Recurso Inferido, debido a que no se presentan muestras de sondeos en el sector; en la planta superior es posible evidenciar ciertos lineamientos en rojo de orientación NW, que corresponden a ausencia de muestras dentro del elipsoide de búsqueda definido para el Dominio Estructural WR y SV.

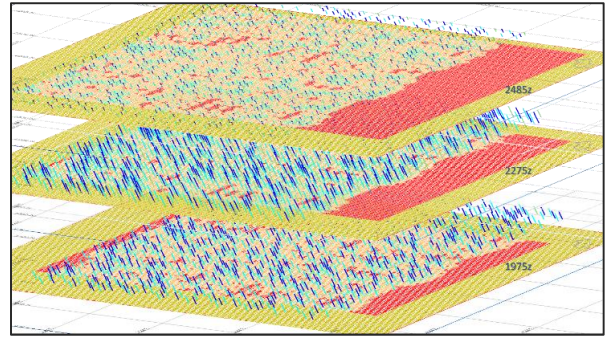


Figura 7 . Sucesión de plantas con intercepto de sondeos de las campañas hasta P3.10, en rojo se evidencia categoría Inferido, en naranja Recurso Indicado y en Verde Recurso Medido.

La evolución hasta el cumplimiento de la Campaña P3.40, se evidencia en la Figura 8, en que el borde occidental del Recurso Inferido se presenta con un borde lineal para las tres secciones, así también en el límite oriental de la planta inferior (1975z), dado que los elipsoides de búsqueda en WR y EN incorporan en sus ejes de menor distancia la regularidad de las muestras entre sondeos adyacente (50m). Se distingue en la planta superior una zona de cinco bloques en el contacto de los dominios CM y En y NC con categoría Inferido.

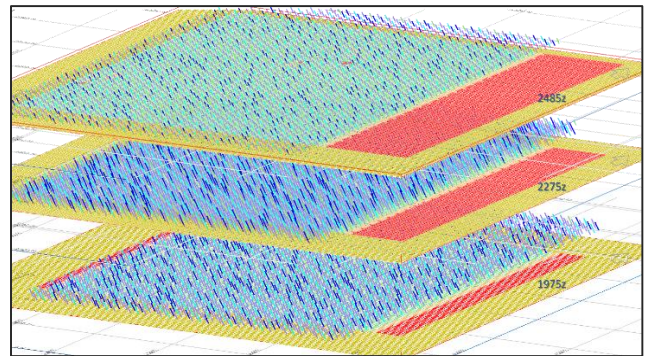


Figura 8. Plantas con cumplimiento de campañas hasta P3.40, distanciamiento de 50m

La evolución de las campañas, llevado a matrices de Sustentabilidad de Recurso, representado en la Figura 9, indican el aporte de las muestras de cada campaña de sondeo para la categorización, el gráfico superior presenta la incorporación de campañas hasta P3.10, el segundo gráfico la resultante hasta la campaña P3.20, en el tercero se incorpora la campaña P.30 y en la gráfica inferior todas las campañas.

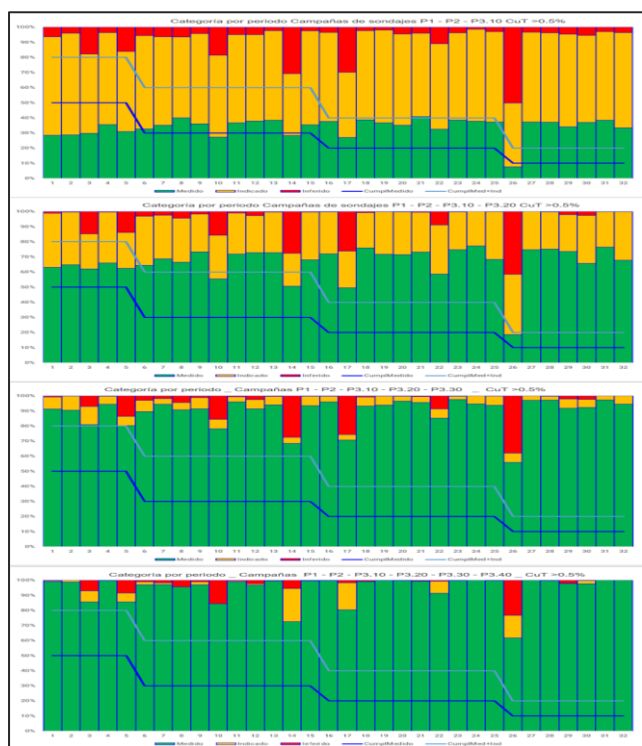


Figura 9 . Matriz de Sustentabilidad del Recurso, se indica en verde Recurso Medido, naranja para Indicado y en Rojo el Inferido. Las plantas con cumplimiento de campañas hasta P3.40, distanciamiento de 50m.

Las líneas continuas subhorizontales en los gráficos indican cumplimientos requeridos a criterio de cada compañía minera como recurso mínimo para la explotación, la línea inferior indica la exigencia para el Recurso Medido y en celeste (o línea superior) es la meta de la sumatoria de los recursos de mayor certidumbre; evidenciándose desde la segunda campaña de perforación el cumplimiento de la matriz requerida para el Recurso Medido y de la sumatoria del Medido con el Indicado, exceptuando el periodo 26. Estas gráficas son susceptibles de cambio respecto a la ley de corte que se defina, lo que impactará en las proporciones y en la cantidad total de fino que se represente.

5 Discusión

Las campañas generadas para este ejercicio y el cumplimiento que se muestra en las gráficas de matrices indican sobrecumplimiento de las metas requeridas para la explotación del depósito, esto conlleva a uso de capitales no necesarias, dicho sea mejor, aumento de los costos asociados al proceso

que no aportarán a las normativas internas de Recursos Mineros.

El análisis del incumplimiento del Recurso Medido y Medido+Indicado luego de las dos campañas de la tercera etapa de perforación, se constituye bajo el fundamento de que se encuentra diseñada casi en su totalidad en la periferia oriental (Dominio Estructural EN); esto debiere generar alerta a los planificadores dado que el material fino para dicho periodo es en torno a un décimo de los periodos previos, Figura 10.

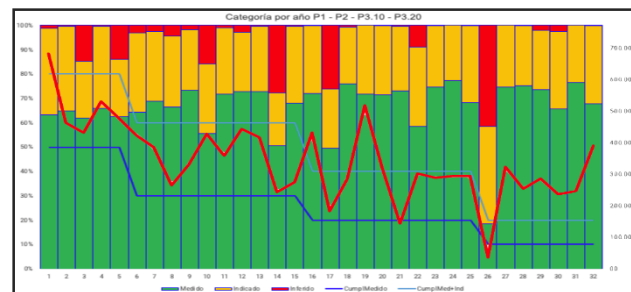


Figura 10 . Gráfico de matriz de sustentabilidad, indicando en línea roja la evolución por periodo de la cantidad de fino categorizado.

6 Conclusiones

Las matrices de sustentabilidad, a través del cálculo de la categorización del recurso, se deben desarrollar sistemáticamente en el tiempo, a modo de optimizar los recursos económicos, y que sean replicables en el tiempo.

Toda la información generada debe ser respaldada, sistemática y reproducible en el tiempo; debiendo estar en cumplimiento con la normativa definida para el depósito, en el caso de los descritos en esta franja metalogénica, por normativa chilena, debe ser con lo estipulado en CH 20235.

Toda variación en la interpretación de los modelos de Dominios Estructurales debe conllevar actualización del cálculo efectuado en el presente estudio.

El análisis de las matrices de sustentabilidad permite generar alertas para posibles variaciones al plan de negocios y de desarrollo del largo plazo, en particular este ejercicio define que la variación del cobre fino categorizado es alta, y que se deben hacer ajustes para enfocar un plan económico mas constante.

Referencias

Moreno, B. 2023. Geología y Modelamiento del Sector Carmen Este, División Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título de Geólogo (inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 93pp. Concepción.

Peña, D. 2022. Modelo Estructural de la Fase 35 del Yacimiento Radomiro Tomic, Región de Antofagasta, Chile. Memoria de Título de Geólogo (inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra: 160pp. Concepción.

Tomlinson y otros, 2018. Carta Calama, región de Antofagasta: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica N°199, 1 mapa escala 1:100.000