

Geometalurgia y el análisis de la data. Importancia y aplicaciones en Perú

Geometallurgy and data analysis. Importance and applications in Peru

Julio Alejandro Castro Andrade¹, Renzo Paolo Mario Dávila Medina²,
Jesús Alberto Torres Guerra³, Vidal Sixto Aramburú Rojas⁴

Recibido: 15/03/2021 – Aprobado: 19/05/2022 – Publicado: 30/06/2022

RESUMEN

La geometalurgia se define como el estudio de la génesis de los minerales respecto al desempeño de su procesamiento metalúrgico. La construcción de modelos geometalúrgicos es de suma importancia para la evaluación técnico - económica del yacimiento. La robustez del modelo depende de la cantidad de recursos invertidos para generar información potencial que servirá en la toma de decisiones. La relevancia del modelo geometalúrgico tiene un alto valor en la gestión minera, el cual sirve de instrumento para la planificación, explotación y diseño de los procesos metalúrgicos según el tipo de yacimiento. Usar la información para maximizar el rendimiento económico en los procesos de concentración tiene un potencial enorme y un desafío para los operadores de la planta. En este artículo se discutirá el uso del análisis de datos y sus aplicaciones en varios casos de éxito para depósitos tipo pórfido, teniendo en cuenta el uso de métodos estadísticos tradicionales y algoritmos de clasificación supervisados.

Palabras claves: geometalurgia; modelos; depósitos; metalurgia.

ABSTRACT

Geometallurgy is defined as the study of the genesis of minerals with respect to the performance of their metallurgical processing. The construction of geometallurgical models is of the utmost importance for the technical-economic evaluation of the deposit. The robustness of the model depends on the number of resources invested to generate potential information that will serve in decision making. The relevance of the geometallurgical model has a high value in mining management, which serves as an instrument for the planning, exploitation and design of metallurgical processes according to the type of deposit. Using the information to maximize economic performance in concentration processes has enormous potential and challenge for plant operators. This article will discuss the use of data analysis and its applications in several successful cases for porphyry-type deposits, taking into account the use of traditional statistical methods and supervised classification algorithms.

Keywords: geometallurgy; models; deposits; metallurgy.

- 1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú. Ing. Metalúrgico. Autor para correspondencia: julio.castro7@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0507-6680>
- 2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú. Ing. Metalúrgico. E-mail: renzo.davila@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2103-1530>
- 3 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú. Docente. E-mail: jesus.torres5@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8186-5249>
- 4 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado. Lima, Perú. Docente. E-mail: varamburur@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>

I. INTRODUCCIÓN

Las nuevas tecnologías para el desarrollo de proyectos mineros emplean a la geometalurgia como modelo de negocio para la explotación de recientes yacimientos de minerales. Además, la falta de pruebas metalúrgicas en la etapa de exploración genera incertidumbre en las evaluaciones económicas de explotación. Por esta razón, es de consideración en las etapas de exploración generar una metodología de caracterización geo minero metalúrgica. Las pruebas necesarias varían, según sus requisitos específicos (previsión de producción, optimización o diseño Brownfield o Greenfield). El trabajo permanente de desarrollo puede requerir pruebas adicionales u otros tipos de pruebas, según la tecnología empleada o sugerida. De esta manera se tendrá una adecuada planificación geometalúrgica del diseño de vida de mina con un riesgo de carácter razonable.

En tal sentido, es conveniente de que las empresas dedicadas a la explotación de yacimientos mineros dispongan de herramientas de prospectiva minera, para evaluar las ventajas - limitaciones de sus herramientas de planificación y determinar la cadena de valor productivo.

Las constantes actualizaciones de la geometalurgia en Perú, tienen una interesante dependencia de los holdings minero extranjeros y de las prácticas en gran minería. Por tal motivo, con la finalidad de unificar los criterios geometalúrgicos de modelamiento, el presente artículo tiene como objetivo identificar los criterios base de la analítica de exploración y condicionamiento de los datos geometalúrgicos, en función de un instrumento de gestión para la planificación y procesamiento del yacimiento.

II. MÉTODOS

Se planteó una metodología con el objetivo de llevar a cabo el desarrollo de la aplicación del análisis estadístico en la geometalurgia de yacimientos de tipo pórfidos de cobre, a partir de la introducción de técnicas de análisis de datos, con el fin de buscar tendencias y optimizaciones del costo - beneficio. Con el propósito de lograr este objetivo de ver la importancia y aplicación del análisis de datos, se seleccionaron dos casos de éxito que mostraron la aplicabilidad del uso de la estadística en gran minería.

Un modelo cuantitativo de tipos e intensidades de alteración hidrotermal es fundamental, esto debido a la relación demostrada que existe entre parámetros de moliendabilidad y los distintos tipos de alteración. De esta manera, consideramos a esta investigación no experimental de tipo descriptivo correlacional, ya partimos de la descripción y análisis de los datos y luego evaluamos la relación que existe entre ellos, incluyendo dos casos de estudio.

III. RESULTADOS

Se presenta en este capítulo un resumen de los conceptos más relevantes, esto concerniente a la búsqueda y determinación de parámetros geoquímicos multi-elementos para la clasificación geoquímica de los principales tipos

de alteración hidrotermal existentes en los yacimientos porfídicos. La determinación de variables geoquímicas para el desarrollo de modelos de alteración hidrotermal, permiten la aplicación de herramientas de análisis geoestadísticos. Lo anterior hace posible estudiar la distribución espacial y temporal de los distintos ambientes (dominios) de alteración, los eventos de superposición y zonas de transición existentes.

3.1 Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal, es un intercambio químico en función de la ocurrencia interaccionada del fluido hidrotermal con la roca encajante. De esta interacción la roca sufre un desequilibrio de temperatura entre fases (cambio termodinámico) conllevando una variación en la química, morfológica y de caracterización mineralógica de la misma. El cambio de la roca original por procesos termodinámicos abiertos es producto de un metasomatismo. De lo observado en la Figura 1, se reconocen en la naturaleza a una variedad de alteraciones hidrotermales como argílico, propilítico, filico y potásico. Estas alteraciones al igual que su intensidad dependen de factores: relación roca/agua, ph, temperatura, fluido hidrotermal y la composición de la roca encajante.

3.2 Caracterización del mineral

3.2.1 Caracterización de meso texturas

La textura de la roca en el logueo geológico es un método para describir la estructura y el estilo de ensamblaje (Figura 2.) de cómo se cultivan los granos minerales a medida que se forma la roca. Es por este motivo que la medición de tamaños de grano es un componente clave para la geometalurgia.

3.2.2. Caracterización por análisis de imagen

El análisis de imagen se basa en los avances de la tecnológicos de caracterización y el incremento computacional de los sistemas operativos, mediante el uso de cámaras ópticas y rayos X para el logueo de taladros de perforación diamantina (Uysal, Zaccarini, & Garuti, 2009). Lo que permite el aumento de efectividad en la caracterización geometalúrgica. Centros de estudios como el Centro de Investigación de Minerales Julius Kruttschnitt, tienen tecnologías de toma de imágenes que pueden ser recopiladas, agrupadas y clasificadas de acuerdo a la litología y geología del yacimiento (Figura 3.).

En la Figura 4 muestra un ejemplo de un árbol de clasificación de imágenes. En algunos ejemplos (casos basados en litología donde la roca de la firma se veía muy diferente), las firmas del comportamiento del proceso pueden diagnosticarse por proxy (con menos precisión). Esto representa un diagnóstico muy rápido y temprano del núcleo para firmas previamente entendidas. Este método también proporciona un posible vínculo entre métodos como la mineralogía automatizada, la microscopía óptica y los métodos de caracterización a mayor escala, como la geofísica o los ensayos químicos.

3.3. CORESCAM (caracterización hyperspectral)

La imagen hiperespectral es uno de estos métodos y muestra un gran potencial para el trabajo futuro. Las imágenes

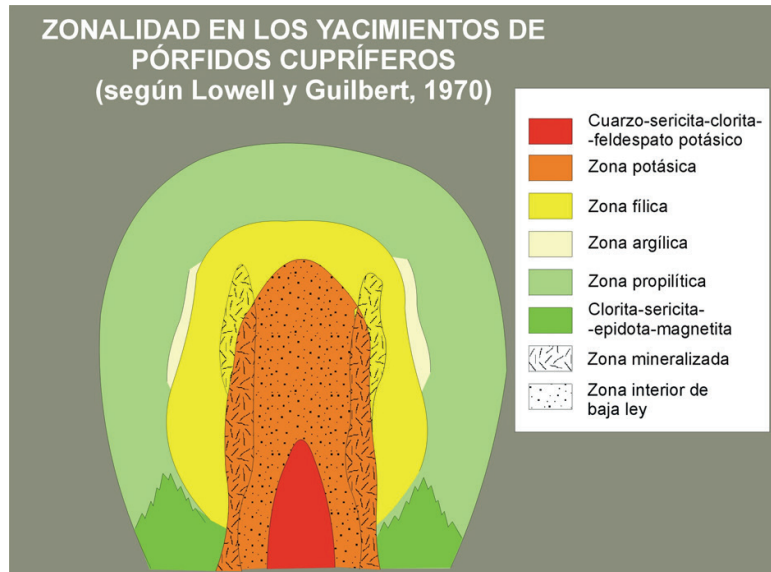


Figura 1. Tipos de alteración más comunes en un yacimiento del tipo pórfido de Cu-Mo (Corbett & Leach, 1997)

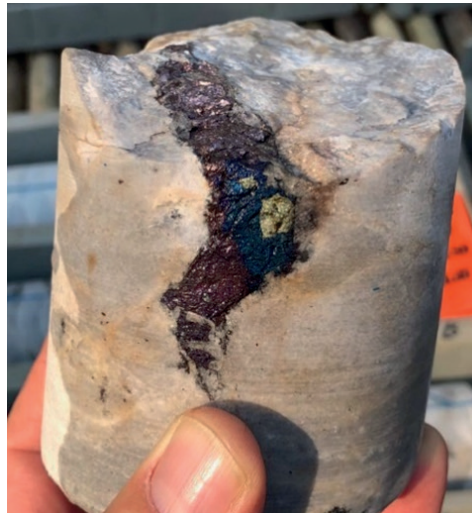


Figura 2. Logeo de drill Hole a la escala de Meso Texturas (Halley et al., 2016)

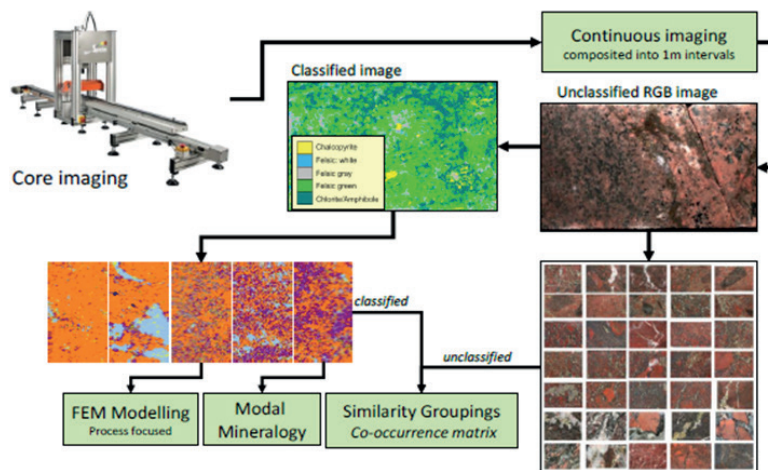


Figura 3. Campaña de Drill Hole en análisis de imagen Core Scam (Michaux, 2020)

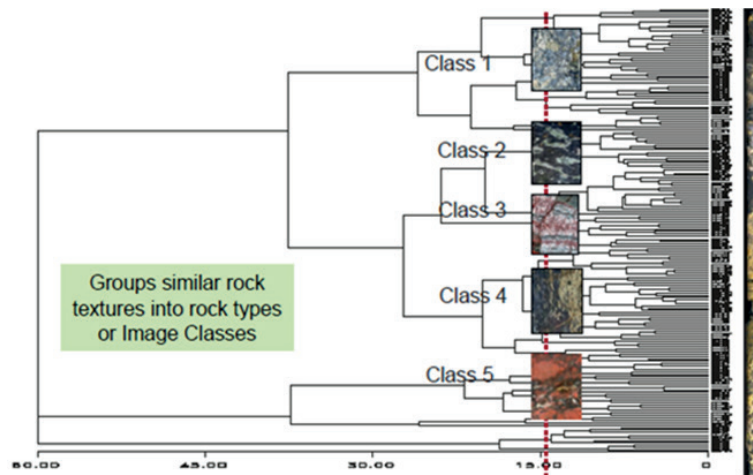


Figura 4. Cluster de similares tipos de rocas con algoritmo de imagen para campaña de Drill Hole (Michaux, 2020)

hiperespectrales, como otras imágenes espectrales, recopilan y procesan información de todo el espectro electromagnético.

El objetivo de las imágenes hiperespectrales es obtener el espectro para cada píxel en el área de adquisición, con el fin de encontrar objetos e identificar la mineralogía, o simplemente información elemental. El ojo humano ve el color de la luz visible en su mayoría en tres bandas (rojo, verde y azul), las imágenes espectrales dividen el espectro en muchas más bandas. Esta técnica de dividir imágenes en bandas puede extenderse más allá de lo visible. La caracterización de imágenes hiperespectrales brinda una oportunidad única, nuevamente si el presupuesto y el alcance lo permiten. Este método técnico se considera la herramienta del geólogo de próxima generación.

El tipo de precisión de diagnóstico de minerales y meteorización de rocas normalmente solo fue posible por un geólogo experimentado que registra el núcleo. Ahora, este método puede proporcionar mediciones repetibles. Si bien este método no puede captar muchos de los subtítulos del diagnóstico de minerales que solo un geólogo puede observar, esta forma de caracterización podría capacitar a un geólogo inexperto en uno experimentado.

La Figura 5 muestra un ejemplo de esto con datos presentados. Cada bandeja de núcleo (en forma continua en el mismo taladro) se muestra como una línea de horizonte coloreada (caracterizada por el tipo de mineral) a través de cada columna. Por lo tanto, cada columna muestra una bandeja de muchos núcleos en forma continua verticalmente.

El instrumento hiperespectral midió cada bandeja (4 m de núcleo) en una sola pasada de medición. La Figura 6 muestra 10 espectros diferentes en la misma longitud de núcleo de 290 m (y una columna con la imagen original en escala de grises). Cada bandeja de núcleo (4 m de longitud) está representada por una pequeña línea de color. Las líneas se apilan en función de la profundidad. Cada columna representa un espectro diferente.

3.4. Caracterización de mineralógica en masa

La determinación de la mineralogía de mena y ganga es de importancia para comprender los procesos, posibles complicaciones y optimización de acuerdo a sus fases, liberación y asociaciones.

Se define a la ganga como la parte que no tiene un valor comercial, pero que guarda una relación estrecha con la geología del yacimiento. Por lo tanto, su caracterización de incluso de mayor importancia que el de la mena. Para su caracterización actualmente existen varios métodos de bajo costo y de buena efectividad (Figura 7).

3.5. Difracción de rayos X

Es una caracterización de la composición de fases que se realizan a muestras en polvo con la finalidad de comprender la mineralogía bulk de la muestra. Las fases son identificadas debido al comparativo del patrón del espectro de rayos X respecto a una base de datos de referencia, la cual debe ser particular para cada morfología de yacimiento. (Figura 8). Este método me permite con una sola medición, identificar las fases de minerales (cualitativas) y su cuantificación en porcentaje.

3.6. Medición manual de XRF

Los analizadores XRF se utilizan en todo el mundo para monitorear la ley del mineral en minas activas a cielo abierto y subterráneas. Específicamente, los analizadores XRF se utilizan para el análisis directo de los recortes de los pozos de voladura en minas, como una guía preliminar sobre las rocas directas subterráneas, las fachadas a cielo abierto y dentro de los laboratorios mineros de Ni después de la preparación de la muestra. Las ventajas de usar una unidad portátil podrían incluir:

- Indicación rápida de la potencial mineralización de Au a través del análisis XRF de elementos de la sonda en el suelo, cortes de perforación y núcleos de perforación.

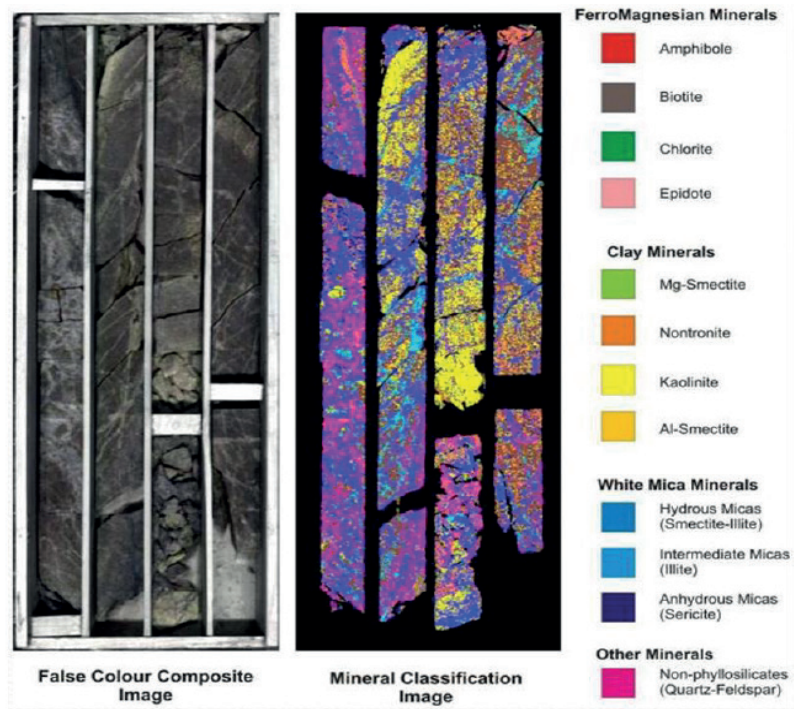


Figura 5. Análisis hiperespectral (CoreScam) para campaña de Drill Hole (Michaux, 2020)

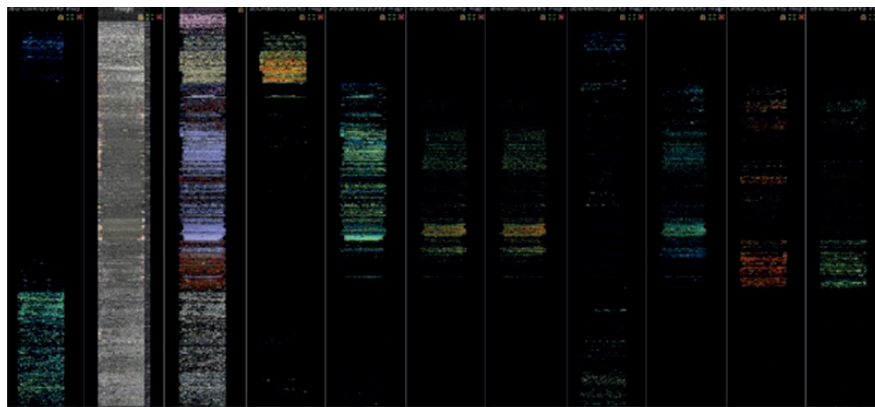


Figura 6. Imagen hiperespectral (CoreScam) de kilómetros continuos de Drill Hole (Michaux, 2020)



Figura 7. Laboratorio de estudios mineralógicos de la Universidad de Chile (Pérez Barnuevo, 2014)

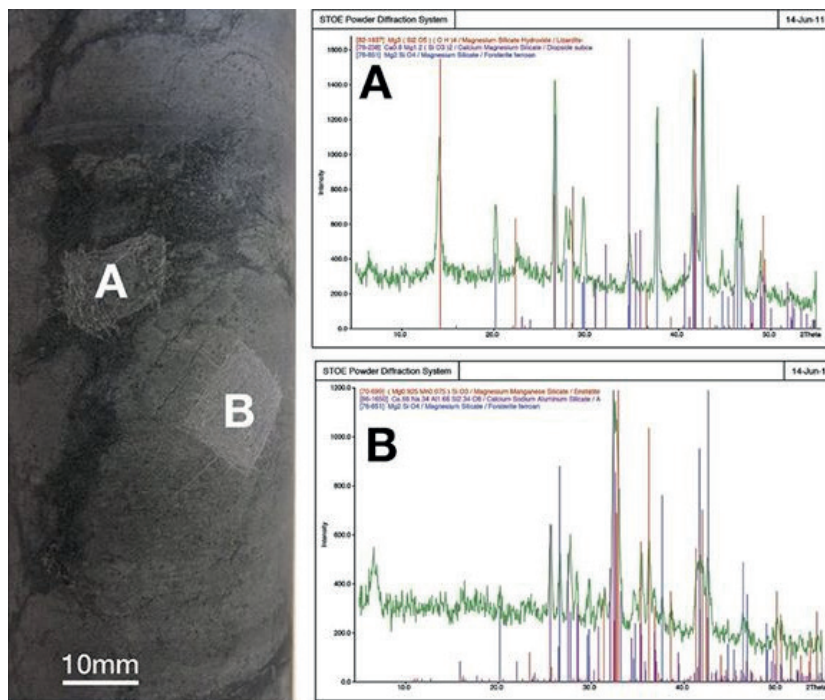


Figura 8. Foto micrografía de una litología gris clara de grano fino (B) entremezclada con una unidad más oscura, ultramórfica y magmática (A) y las identificaciones de los minerales realizados por el analizado TERRA XDR (Coleman, 1999)

- Selección de muestra prioritaria, maximización de presupuestos analíticos y generación mejorada de objetivos de perforación mediante preselección de muestras con XRF.
- Mejor comprensión, modelado y sectorización de depósitos de mineral con menos dilución y mejor recuperación de Au mediante mapeo XRF de características estructurales e identificación de zonas mineralizadas y alteradas.
- Tipificación de rocas económica y rápida utilizando XRF para lito geoquímica.

3.7 Caracterización de micro textura

Es el estudio de la forma de ensamblaje mineral a escala de grano mineral (100µm). Una de sus aplicaciones es ayudar a conocer la mineralogía de las gangas, las que también es de interés para muchas preguntas analíticas geometalúrgicas, la microscopía óptica automatizada es útil (Figura 9). Este es un método más barato y rápido en comparación con la mineralogía automatizada, pero requiere un conocimiento experto y un usuario bien capacitado.

La Figura 10 es un ejemplo de una microscopía óptica de escritorio con un bloque de resina y una segunda imagen con luz polarizada cruzada (sección delgada), que exhibe claramente la mineralogía de las gangas en una variedad de colores reflejados.

3.8. Pruebas de caracterización del proceso

Se deben realizar múltiples pruebas del comportamiento del proceso objetivo para cada una de las muestras de

miembros finales. Las pruebas a mayor escala en las que la industria confía en los estudios de factibilidad se conocen como pruebas "financiables". Estas pruebas se consideran el estándar de la industria al caracterizar minerales para el diseño de ingeniería de procesos.

La Tabla 1 a continuación muestra una lista de estas pruebas y una referencia para cada una para un examen más detallado.

Los resultados de las pruebas se utilizan como entradas de caracterización en la ingeniería de procesos. Los objetivos de la campaña de geometalurgia son comprender la mineralogía que controla la respuesta del comportamiento del proceso y luego mapear la variabilidad de esa respuesta del proceso.

Esto significa que la mineralogía de las muestras de alimentación debe ser conocida y coherente en todo el volumen de la muestra. Cada una de estas pruebas financiables a mayor escala requiere una cantidad relativamente grande de masa. Muchas campañas de trabajo de pruebas metalúrgicas convencionales anteriores no han sido tan precisas para garantizar que los orígenes de las muestras sean consistentes y entendidos en términos de mineralogía de origen.

3.9. Unidades geometalúrgicas

La estrategia geometalúrgica en el plan y el diseño minero de planta se basa en identificar las diversas propiedades del mineral que contribuyen a establecer más acertadamente el valor de un recurso. Para un mejor control de dichos recursos es importante la definición de unidades geo metalúrgicas



Figura 9. Uso de XRF manual en lecturas de Core (Pérez Barnuevo, 2014)

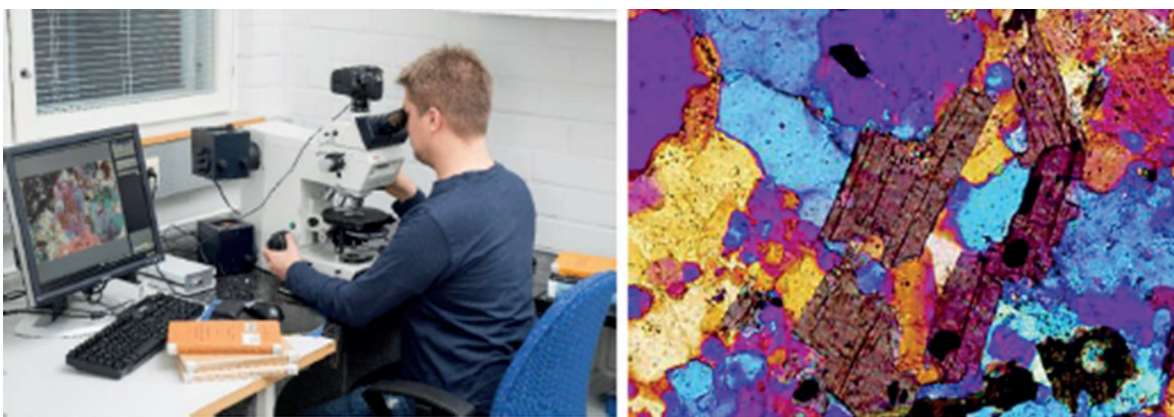


Figura 10. Microscopio óptico de escritorio (Pérez Barnuevo, 2014)

Tabla 1. Pruebas de caracterización del proceso

Procesos de Ingeniería	Comportamiento del proceso caracterizado	Test	Referencia
Geotecnia	Fuerzas de compresión	UCS	Brady & Brown 2006
	Fuerza de tensión	Brazilian Disc	
	Tenacidad de Fractura	KiC	
Conminución	Rotura por Impacto	Drop weighth test	Napier Munn et at. 1996
	Cama de rotura	Pruebas de laboratorio por rodillos de alta presión (HPGR)	Wills & Napier Munn 2015
		Bond work index (Bwi)	Napier Munn et at. 1996
	Molienda	Isa Mill (remolienda)	Napier Munn et at. 1996
	Molienda Fina	Allis Chalmers Abrasion Test	Wills & Napier Munn 2015
	Abrasión		
Flotación	Recuperación por flotación	Test de flotación Batch	Runge 2010
Lixiviación	Recuperación por lixiviación	Test de columnas	In House
Drenaje de mina ácido	AMD	Test de cinética	Parbhakar-Fox 2013-2016

(UGM's), donde expertos recomiendan no solo incluir los atributos tradicionales tales como ley económica de los elementos constituyentes, sino también variables menos tradicionales como se detalla en la Figura 11.

Nuevas tendencias de caracterización indican el uso de herramientas para encontrar una representatividad y caracterización adecuada para la correcta definición de UGM. Dentro de los principales tipos de caracterización

geometalúrgica se consideran el Mapeo de sondajes, Petrografía/Calcografía, DRX, SEM& QEMSCAN, CoreScan, HyLogger, Geoquímica – Litogeoquímica, caracterización cualitativa, semicuantitativa & cuantitativa (Figura 12).

Los resultados involucran el análisis estadístico de datos y su aplicación geometalúrgica para un yacimiento de cobre-oro, soportado en la revisión a modelos tipo de

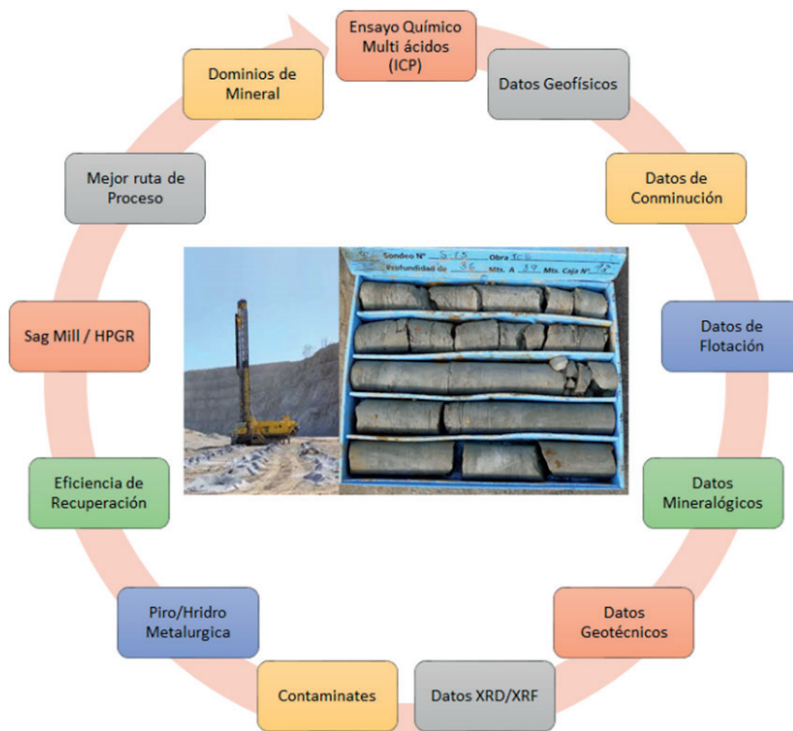


Figura 11. Pruebas de caracterización Geometalúrgicas para un pórfido de cobre (Castro, 2020)

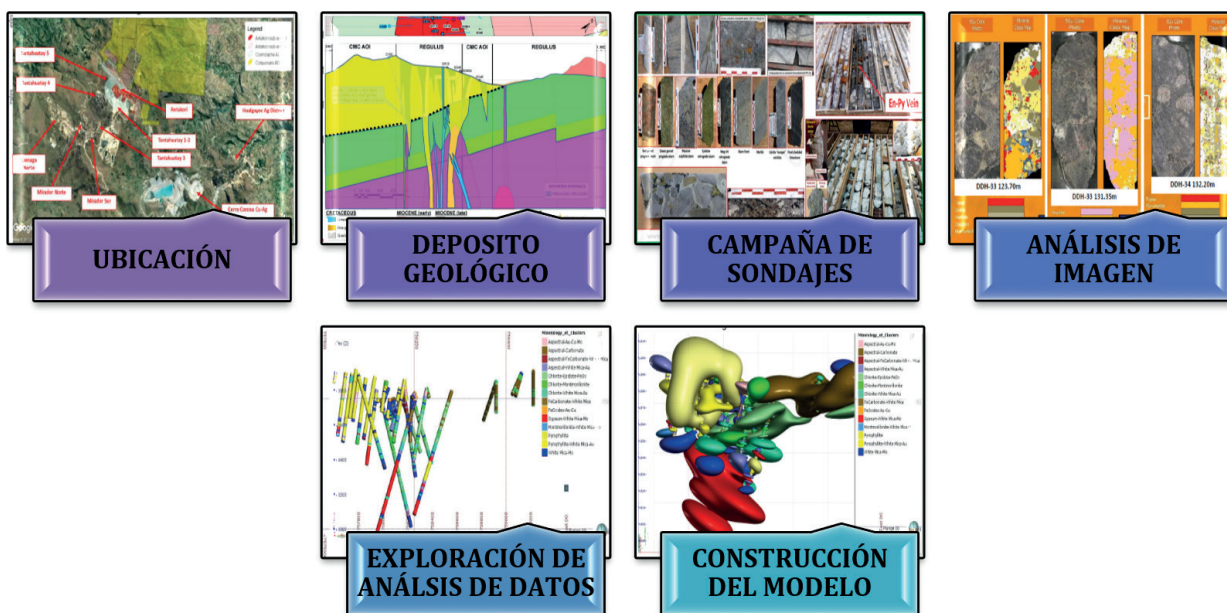


Figura 12. Campaña de caracterización de UGM con métodos Hiperespectral en Corona (Castro, 2020)

tonelaje, recuperación y concentración de arsénico, que implica el control estadístico de procesos y su aplicación Mine to Mill.

3.10. Análisis estadístico de datos

El presente artículo se usará la metodología CRISP-DM para métodos supervisados y no supervisados (Figura 13). Basados en que la estadística se fundamenta en recopilar de datos, interpretarlos y, finalmente y su validación. La ciencia de los datos es un tipo de investigación cuantitativa que busca cuantificar los datos y, por lo general, aplicar algún criterio fundamentado de análisis estadístico. En el análisis de datos geometalúrgicos no solo se cuentan con datos cuantitativos, también involucran datos descriptivos, como datos de dureza geológica, litología, alteración y mineralización.

3.11 Aplicación del análisis de datos aplicados a la geometalurgia

Se presenta a continuación caso de éxito en algunos yacimientos mineros del Perú, así como buenas prácticas

en donde se empleó el análisis de datos aplicada a la Geometalurgia.

3.11.1 Estimación multivariada de un yacimiento de tipo pórfido cobre-oro

El presente estudio tenía como objetivo revisar las variables presentadas por el área de Geometalurgia que corresponden a proyecto de desarrollo en UM La Cima (Cajamarca-Perú). Los datos fueron obtenidos de una campaña sondajes diamantinos en donde las variables relacionadas comprenden a información de: Litológica, Geoquímica, Espectrológica, Textural, Mineralógica, Alteración, Recuperación metalúrgica (Figura 14).

Este proceso iterativo se realizó empleando los softwares ioGAS 7.2, Python y todas las herramientas (supervisadas y no supervisadas) de esta plataforma. El fin es encontrar las variables críticas que puedan intervenir en la definición de alteraciones hidrotermales. El proceso de revisión se aborda en las áreas definidas en la Figura 15.

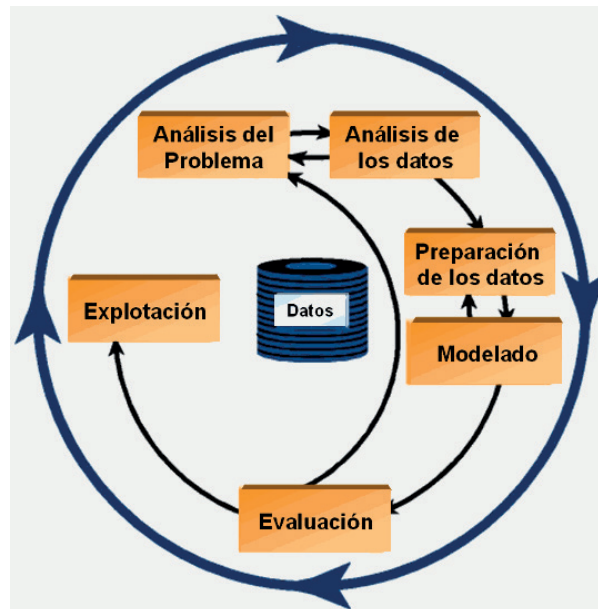


Figura 13. Diagrama de flujo de la metodología de análisis estadístico CRISP-DM (Gómez Sánchez, 2015)

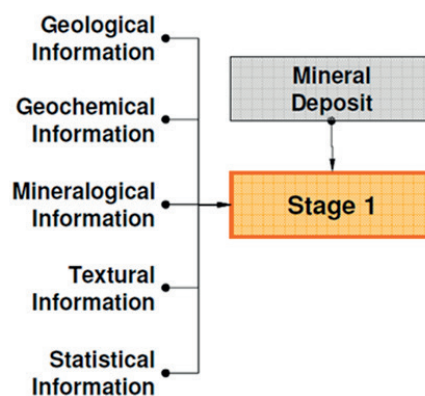


Figura 14. Variables relacionadas al depósito de mineral para la identificación de unidades mineras (Halley et al., 2016)

El estudio inicio con un análisis exploratorio de la base de datos teniendo una población de estudio que constaba de 130 columnas y con 40000 filas, debido a la cantidad de los datos se tuvo que hacer un análisis de las tendencias en el campo de Big Data. La base del presente estudio fue el análisis el multi-elemental de la geoquímica de roca.

En la búsqueda de las variables más significativas para la generación de dominios de alteración que permitan manipular límites más duros entre contactos, se realizó la

comparación entre el logueo de los sondajes respecto al valor de las leyes multielementales.

En la distribución de alteraciones (Figura 16) logueadas se observa una sobre imposición, no mostrando una tendencia determinada para la generación de dominios. Además, en el análisis de la Big data no se pudo determinar las tendencias esperadas. La sobre imposición nos hizo buscar nuevas formas de encontrar grupos de poblaciones de valores medios cercanos, por tal motivo se usó métodos

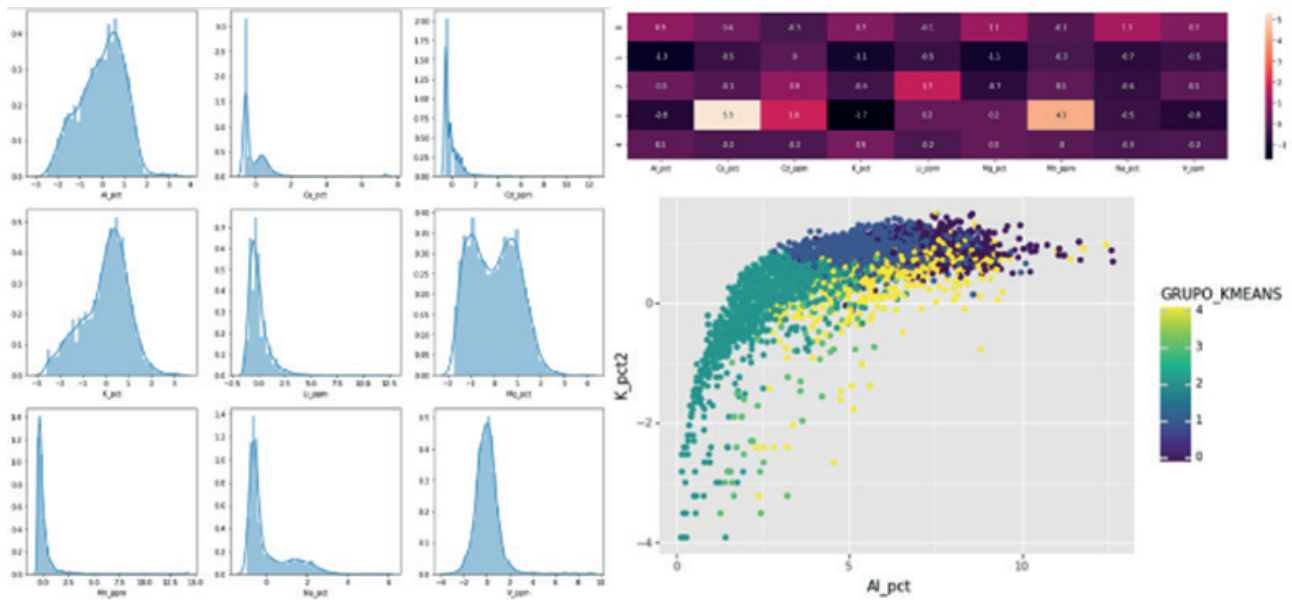


Figura 15. Distribución de la información geoquímica en escala semi log y nueva clasificación de dominios de valores de medias parecida (Halley et al., 2016)

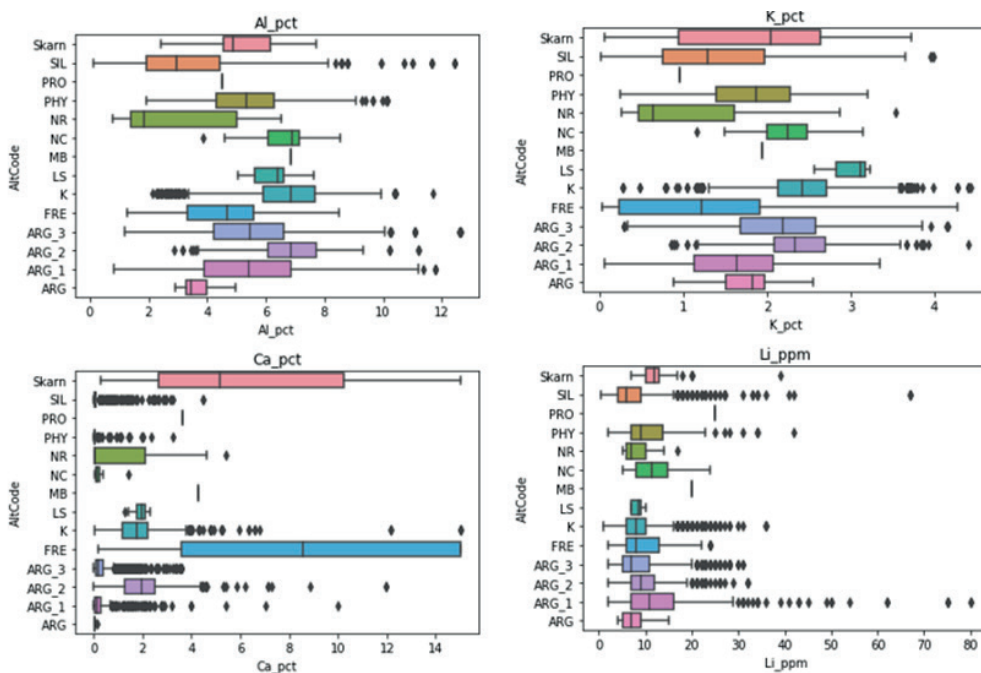


Figura 16. Box plot de distribución de alteraciones logueadas respecto de las leyes ICP (Townley, 2020)

de Machine Learning para poder redefinir los cluster y crear así dominios de afinidad de alteración que me permitieran tener un sentido geológico (Figura 17).

Estos nuevos dominios fueron comparados y validados encontrándole un sentido geológico con el multielemento como se muestra en la Figura 18. Una vez validados estos cluster se llevó a poblar el modelo de bloques y compararlo en campo para verificar la significancia de la nueva generación de dominios de alteración (Figura 18).

3.11.2 Análisis de modelos geoestadísticos

En la cadena de valor del modelamiento geometalúrgico es importante buscar una generación de modelos de bloques económicos que me permitan valorizar el yacimiento, así como definir los planes de minado en un futuro. La cadena de valor económico del modelamiento (Figura 19) es dependiente de las siguientes variables:

- Leyes de elementos de interés o subproductos: Cu, Mo, Au, Ag, etc.

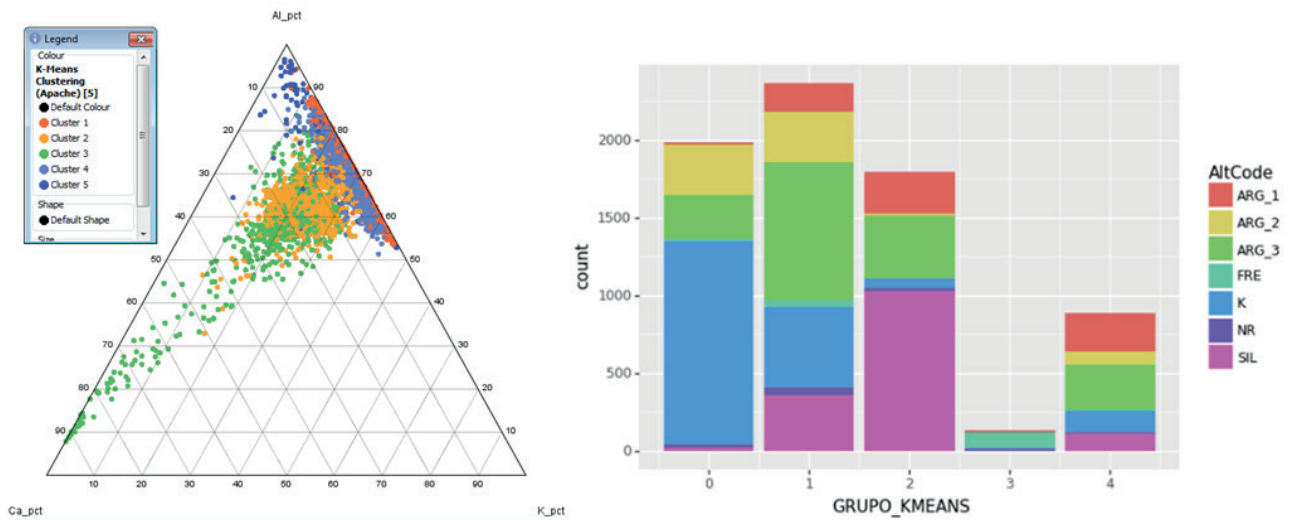


Figura 17. Comparativo de dominios sintéticos y la tendencia de la alteración de mayor grado (Townley, 2020)

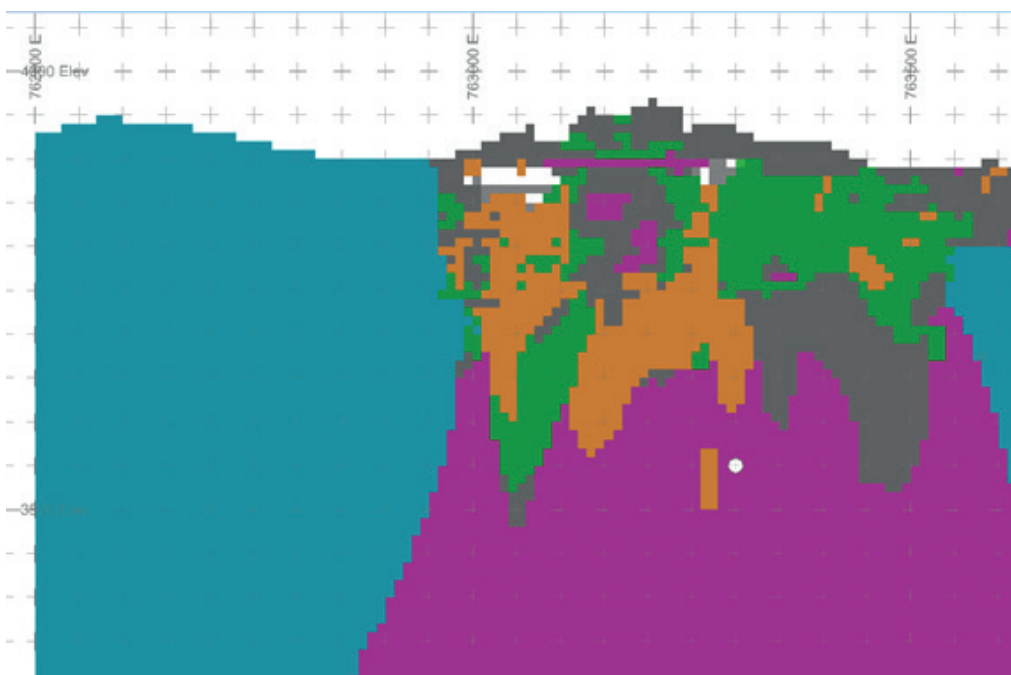


Figura 18. Modelamiento de nuevos dominios de alteración (Castro, 2020)

- Leyes de contaminantes: As, Sb, etc.
- Potencia de una veta, acumulaciones de metal en la veta.
- Densidad de roca.

Pero muchas veces este modelamiento se ve impedido debido a que muchas veces no se cuenta con los recursos de ejecutar sondajes en todo el yacimiento, es allí donde el análisis de datos cobra fuerza, ya que hay métodos de

imputación para poder poblar los dominios correspondientes (Figura 20). Es de esta forma que el modelo de bloques es generando a través de un modelamiento implícito (Figura 21), el cual consiste en una simulación de todos los posibles escenarios que se puedan determinar con estos datos en el sentido geológico más adecuado al yacimiento.

3.12 Generación de modelos geometalúrgicos

El análisis de datos es muy bien empleado en la generación de modelos Geometalúrgicos, porque permite alertar y

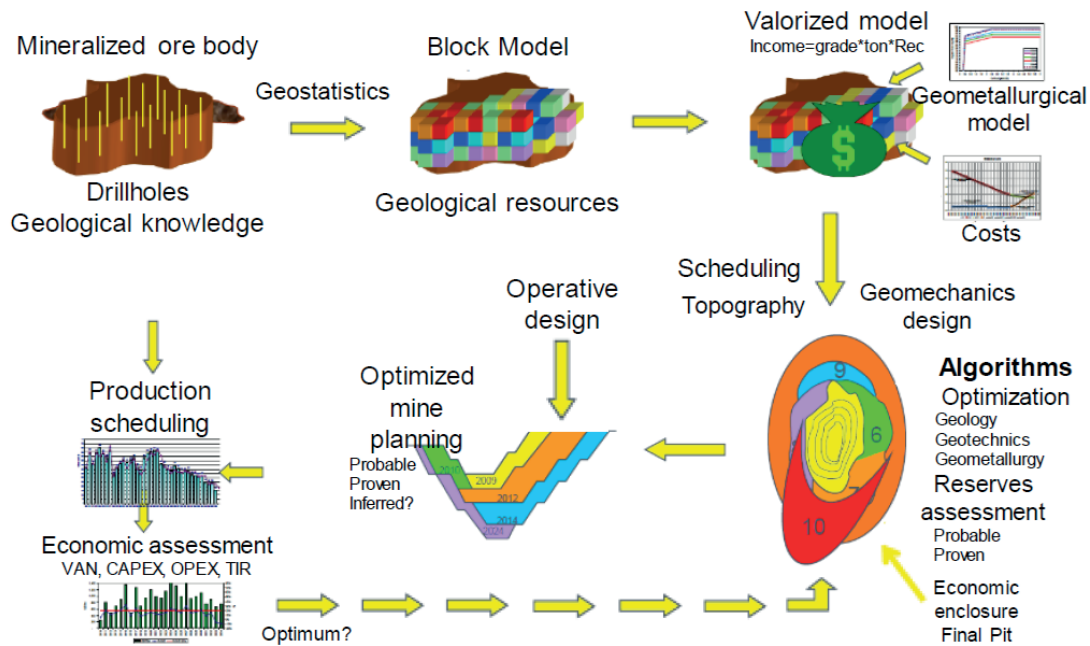


Figura 19. Cadena de valor para generación de modelos geostatísticos y su importancia económica (Garrido et al., 2020)

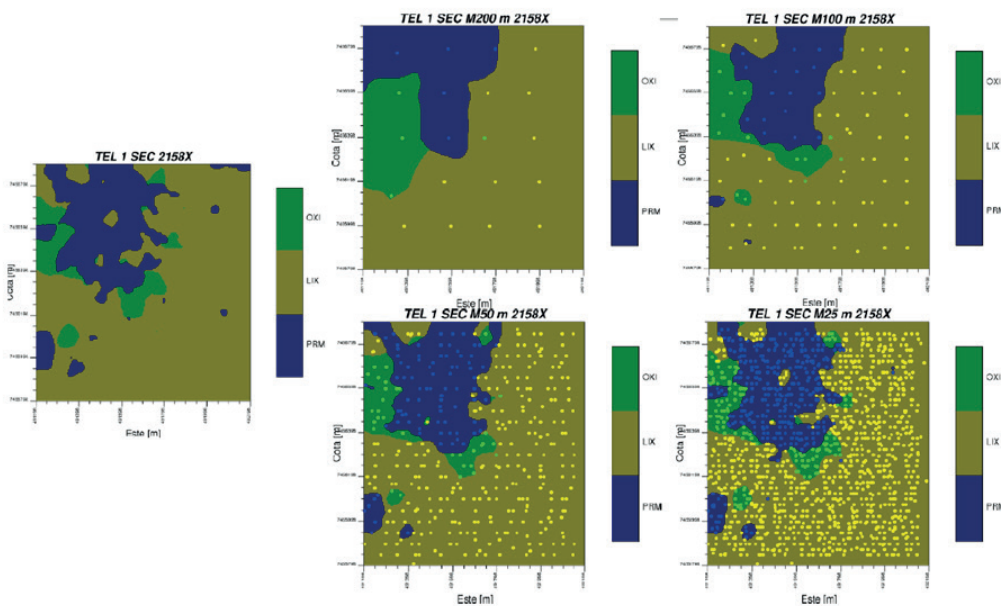


Figura 20. Vista de sección del muestreo inicial y la secuencia de imputación de datos (Garrido et al., 2020)

gestionar desviaciones a la promesa del negocio, generando aprendizaje operacional que lleven a tomar decisiones oportunas. Este aprendizaje es plasmado en un modelo específico, para su manipulación.

3.12.1 Modelos de tonelaje

Para los planes de minado futuros se está observando una proyección de un incremento en alteraciones de alta competencia (potásico / sílice), lo que generan en su procesamiento es el incremento del consumo de energía

específico en la molienda, pudiendo verse este efecto en el tonelaje horario (Figura 22).

Por tal motivo se realizó un modelamiento de escalamiento, en donde valores de competencia de roca del yacimiento se correlacionaron con el tonelaje horario procesado. Además, los modelamientos de estas variables geológicas también se pueden usar en la creación de unidades geológicas de fragmentación (Figura 23), con la finalidad de simular el producto granulométrico de la voladura y un posible ahorro en los sobre costos en factor

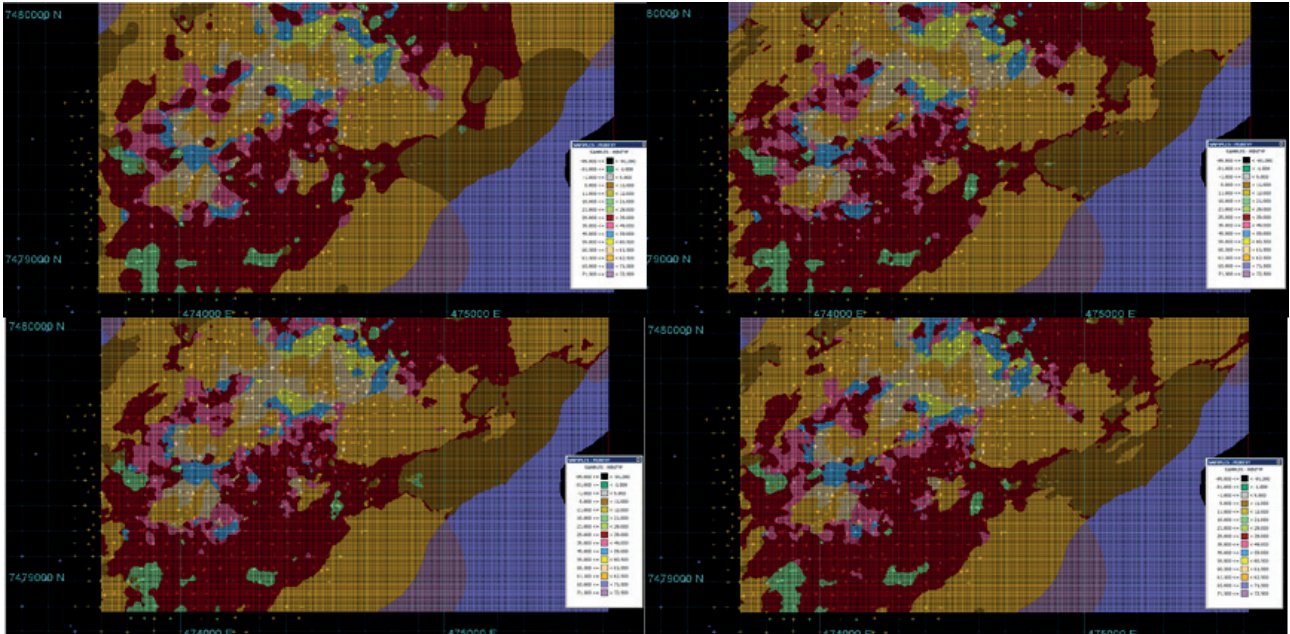


Figura 21. Simulación condicional de los posibles escenarios que se puede determinar con este método de imputación datos (Garrido et al., 2020)

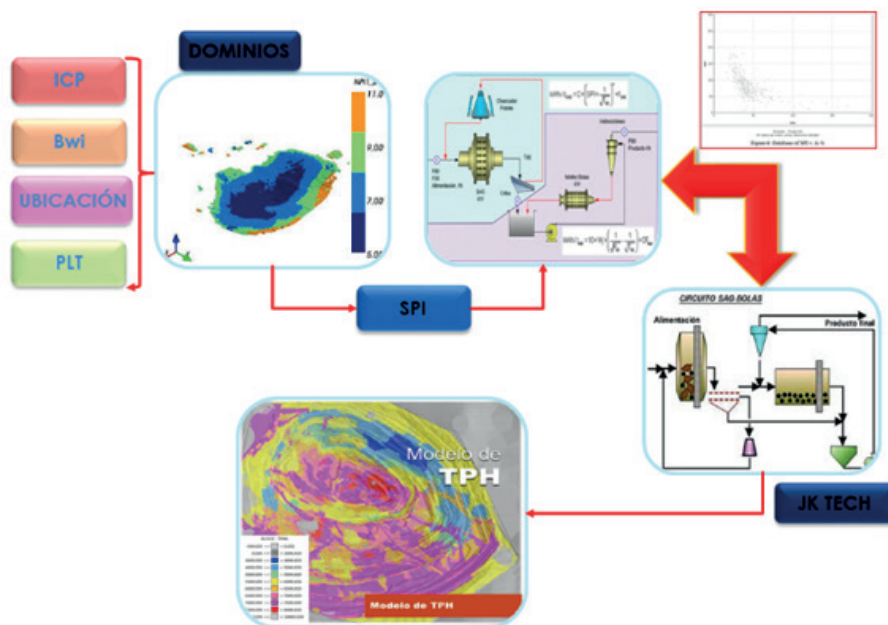


Figura 22. Esquema mental del procedimiento para la estimación del tonelaje horario procesado en planta (Delboni & Morrell, 2002)

de carga. Teniendo en cuenta que el tonelaje ya se ve influenciado desde un F80 mayor 5.5 pulgadas (Figura 24).

3.12.2 Modelo de recuperación

La necesidad económica de saber qué tipos de rocas tienen una performance metalúrgica determinada, lleva a la generación de algoritmos matemáticos que se sustentan en el análisis exploratorio de datos el cual ayuda a poblar los bloques (Figura 25) con valores de recuperación los cuales serán ajustados con pruebas de flotación.

3.12.3 Modelo de concentrabilidad de arsénico

Las mejoras en la determinación del *blending* se produce por una buena administración de los elementos contaminantes del proceso, en el caso de Cerro Corona el principal contaminante es el arsénico, el cual está presente en grados bajos, pero debido a la flotación natural es fácil concentrarse en el proceso de flotación y no hay reactivos u otra forma de reducir el impacto de la concentración. Debido a esto en la realización de la mezcla identificamos el grado de arsénico en el mineral enriquecido en el

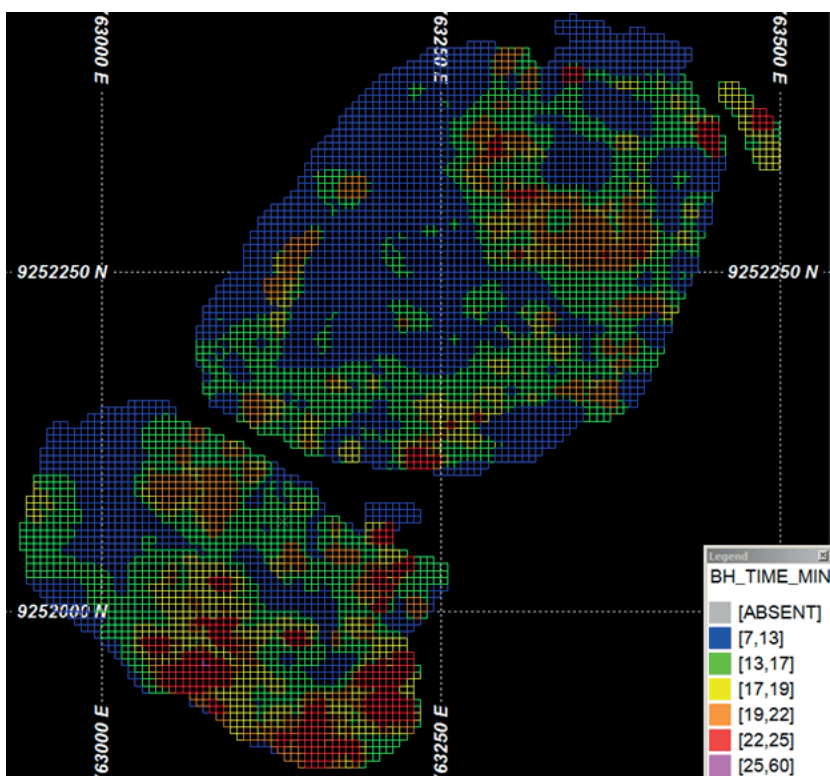


Figura 23. Unidades Geológicas de Fragmentación.

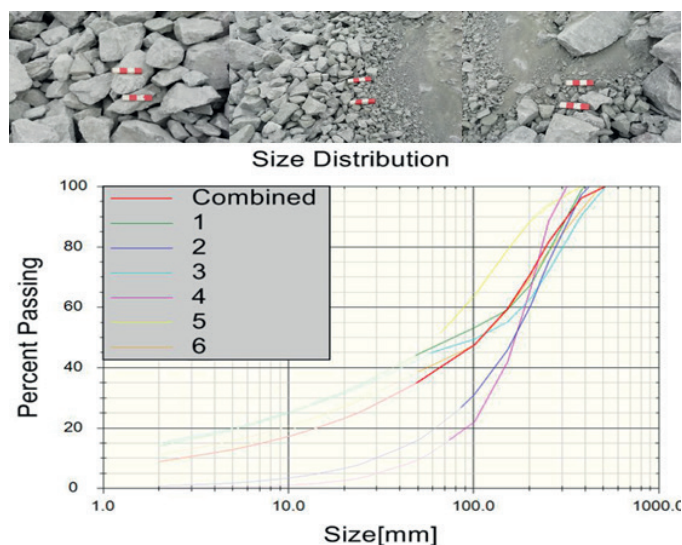


Figura 24. Predicción de Fragmentación (Castro, 2020)

concentrado final que varía entre 10 - 5 veces la razón de concentración (Figura 26).

3.13. Control estadístico de procesos

El Análisis de datos también es aplicado en el procesamiento, estimación y validación de parámetros de operación con el modelado en bloques, esta estadística de procesos permite la determinación de posibles sesgos en la operación por fallas de errores operativos.

Es de esta forma que a través del análisis de datos se pueden determinar parámetros en línea y toma de decisiones en tiempo real. (Figura 27).

3.14. Análisis de datos Mine To Mill

Las mejoras en voladuras abarcan los sectores de mineral y su impacto se mide en los procesos de conminución. Su

finalidad es aumentar la capacidad de procesamiento de los equipos de conminución (Figura 28), a través de una mejora en la fragmentación proveniente de la voladura, es decir aumentar la cantidad de mineral fino para un menor consumo de energía en molienda.

En el proyecto el análisis de datos preexistente permitió generar dominios de litología alimentada al circuito de conminución, con la finalidad de determinar si existe un cambio en los indicadores de dureza creando una sub-clasificación del cruce de dominios de dureza mina-planta y dominios litológicos (Figura 29). La determinación de estos dominios permitió que los diseños de mallas de voladura sean ajustados, aumentando el porcentaje de mineral con alto % finos (<1 pulgada), teniendo una disminución del consumo específico de energía (kWh/t), lo que permite un mayor procesamiento (Figura 30).

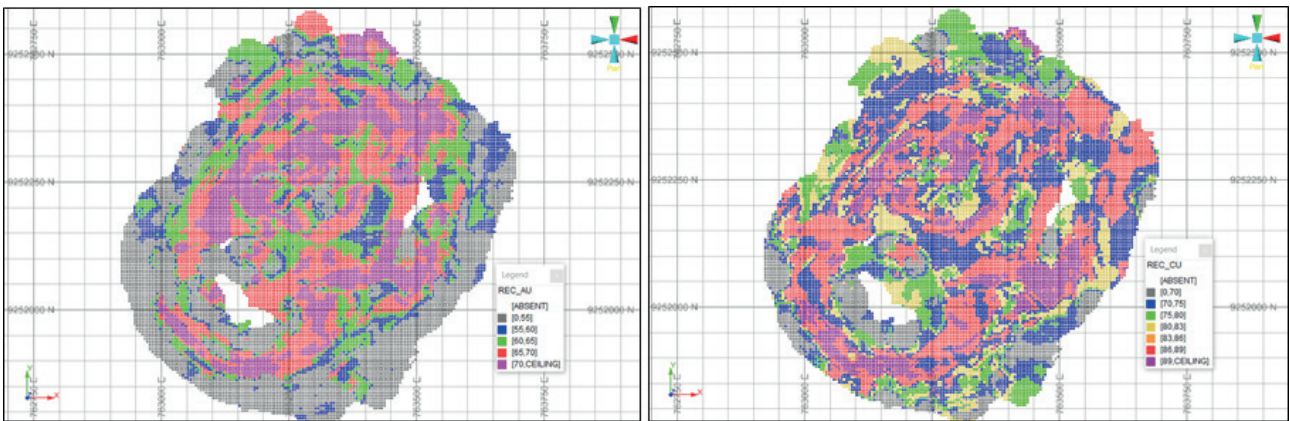


Figura 25. Relación de las variables de litología y alteración con la recuperación de cobre – oro (Castro, 2020)

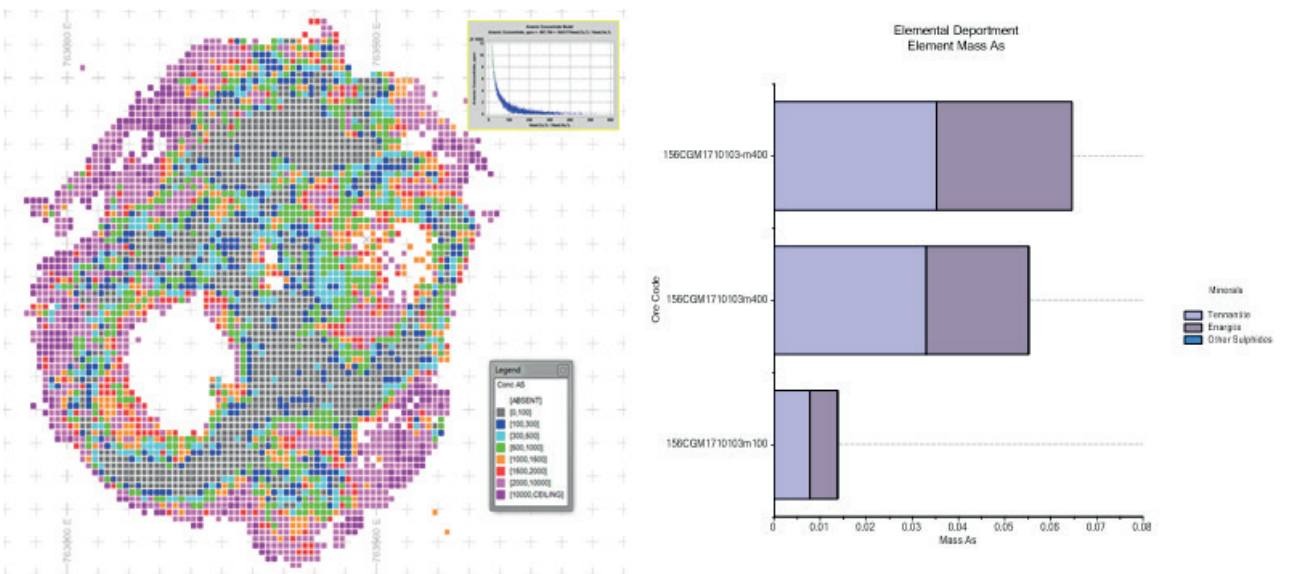


Figura 26. Estudio de la concentrabilidad de arsénico para diferentes zonas del pit y su identificación de especies mineralógicas (Castro, 2020)

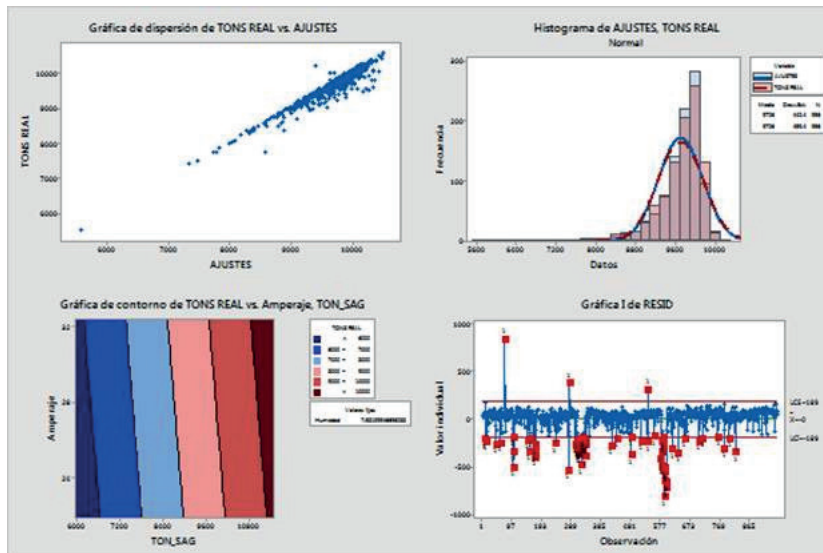


Figura 27. Análisis del sesgo en la conciliación del modelo de tonelajes y su posible desfase por temas operativos (Castro, 2020)

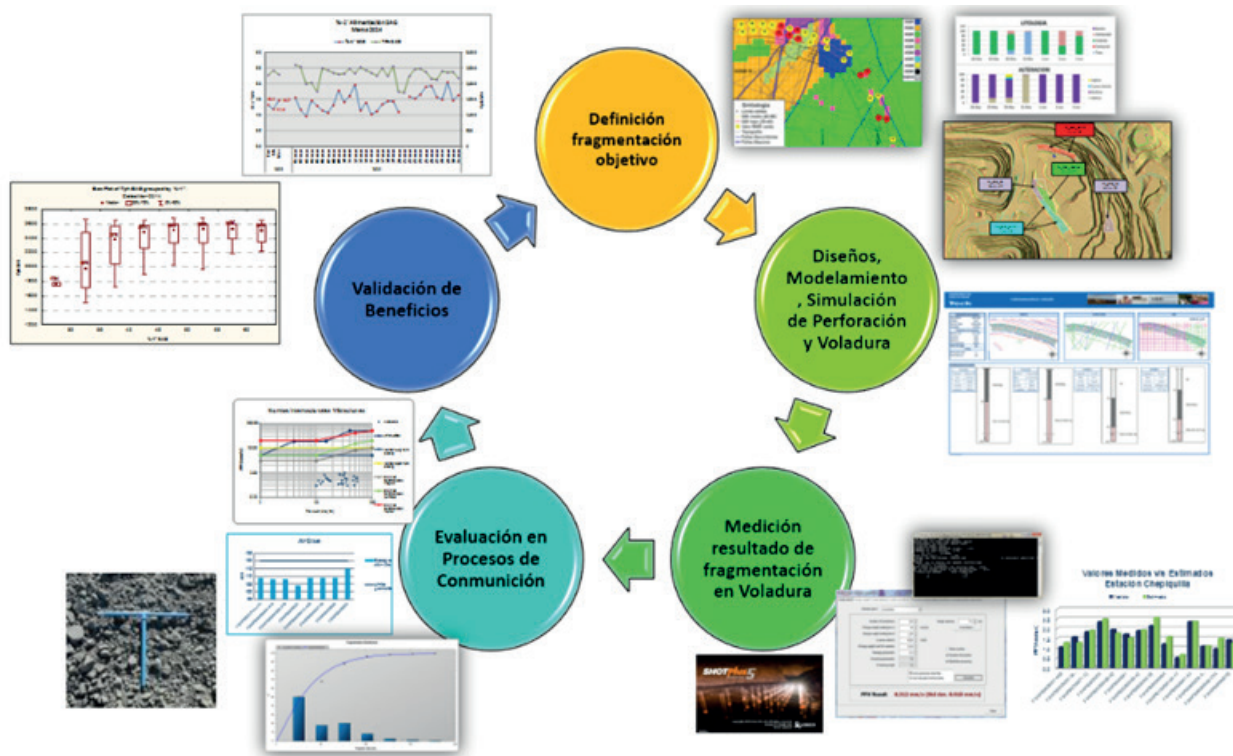


Figura 28. Metodología de trabajo para lograr la mejora continua (Foggiatto & Bianca, 2017)

Litologías	Wi (kWh/t)	Compressive Strength (Mpa)		Tensile Strength (Mpa)	
Kuc	14,46	80	120	6	12
Bxm	14,40	130	190	8	14
Bxi	15,77	130	190	8	14
lbx	18,86	200	230	10	16
QFP	19,48	200	230	10	16
Fel	12,68	130	190	8	14
Gpd	16,53	---	---	---	---

Figura 29. Clasificación por litologías e indicadores de dureza (Foggiatto & Bianca, 2017)

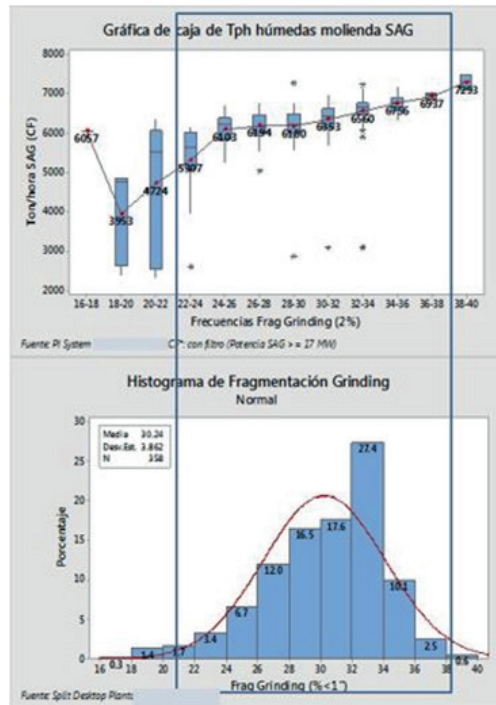


Figura 30. Registro de las toneladas molidas en función de rangos de % de mineral fino, proveniente de voladuras optimizadas (Foggiatto & Bianca, 2017)

IV. DISCUSIÓN

La importancia del análisis de datos aplicado a la Geometalúrgica radica fundamentalmente en permitir una generación y manejo de los datos de una forma rápida y consistente, de esta manera la caracterización geotécnica, geoquímica, geofísica, hidrogeológica y metalúrgica del yacimiento de minerales puede ser integrada en una base de datos para la determinación de las unidades geometalúrgicas y su impacto económico en los proyectos de optimización como el mine to mill.

El soporte que genera el análisis de datos geo minero metalúrgico, es determinar las tendencias (algoritmos matemáticos) que pueden ser usados en campo por las distintas áreas de la cadena de valor en la producción.

La relación entre a geometalúrgia y análisis de datos facilita la toma de decisiones en tiempo real, ya que su análisis en detalle y con el uso de herramientas que permitan procesar la gran ingesta de información potenciará reconocer patrones que puedan describir algún tipo de dominio o envolvente. Lo que permite un dinamismo en el proceso de encontrar distintos escenarios con simulaciones que no demandan de mucho tiempo operativo, facilitando la optimización de procesos analizando y eliminando así ineficiencias y ahorro de gastos innecesarios. De esta manera lo que genera es poder tener una evaluación técnico – económica de la integración de las tres disciplinas básicas del negocio minero (geología, metalurgia y minería) a través de modelos matemáticos.

Finalmente, la generación modelos multivariados que puedan predecir el comportamiento a futuro de variables que generen ganancias, así como perdidas por contaminantes, con una eficiente planificación de minado, su operación y procesamiento en las plantas concentradoras, son el principal objetivo, para optimizar el incremento de las ganancias y el beneficio global al negocio minero.

V. CONCLUSIONES

- Es necesario contar con información geometalúrgica que permita evaluar la factibilidad técnico-económica de la explotación de los recursos minerales. De lo anterior se establece la necesidad de generar un análisis de datos para la fabricación de los modelos geo-metalúrgicos en adición a los modelos de recursos, de tal forma que permitan establecer, predecir y optimizar los comportamientos de los minerales que serán alimentados a planta.
- Los modelos geometalúrgicos se basan normalmente en la información geológica de un yacimiento, combinada con información determinada a partir de ensayos metalúrgicos realizadas a muestras obtenidas en forma discreta a modo de representar dominios específicos de unidades de roca definidos en un yacimiento.
- La determinación de variables geoquímicas para el desarrollo de modelos de alteración

hidrotermal del yacimiento permite la aplicación de herramientas de análisis geoestadísticos, que permitieron estudiar la distribución espacial y temporal de los distintos dominios de alteración, los eventos de superposición y zonas de transición existentes.

- Los análisis de las abundancias relativas de la mineralogía reportados por QEMScan se pueden usar para establecer que no cambia en mayor proporción al estudiar cada fracción granulométrica.
- Es conveniente tener indicadores de dureza asociados a la molienda SAG, ya sea SPI, Dwi, o Axb, con la finalidad mejorar el análisis de los sectores que requieran mayor energía a partir de la voladura, concibiendo la voladura como la primera etapa de la conminución. La consolidación de datos en un modelo empírico de fragmentación que involucra estos indicadores de dureza y la caracterización de los dominios geológicos y geometalúrgicos permite el tratamiento y simulación de los parámetros óptimos de perforación y voladura.
- Es de suma importancia el análisis de datos geometalúrgicos en el campo de la minería, debido a que permite generar patrones de comportamiento que puedan resultar en tendencias que beneficien al negocio minero-metalúrgico.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente artículo desean expresar su más profundo agradecimiento; En primero lugar, a Dios por sus bendiciones que nos otorga diariamente. Al Mg. Jesús Alberto Torres Guerra, por su labor de enseñanza y ser parte en la realización de esta investigación, la misma que es de gran importancia pues nos ha permitido afianzar nuestros conocimientos. A la Universidad Mayor de San Marcos porque nos brinda la oportunidad de continuar creciendo profesionalmente en nuestra línea de carrera, y a aquellos profesionales que con sus investigaciones han permitido consolidar este trabajo. Finalmente, y no menos importante a nuestros familiares que siempre están motivándonos e impulsando a dar lo mejor.

VII. REFERENCIAS

- Castro, J. (2020). *Rol y desafíos de la geometalurgia operacional en Cerro Corona, Cajamarca, Perú*. Revista Minería. <https://revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/rol-y-desafios-de-la-geometalurgia-operacional-en-cerro-corona-cajamarca-peru>
- Coleman, R. G. (1999). *Prospecting for ophiolites along the California continental margin*. The Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2349-3.351>
- Corbett, G., & Leach, T. (1997). *Southwest pacific rim gold-copper systems: structure, alteration, and mineralization*. <https://corbettgeology.com/wp-content/uploads/2016/07/short-course-manual-1997.pdf>

Delboni, H., & Morrell, S. (2002). A load-interactive model for predicting the performance of autogenous and semi-autogenous mills. *KONA Powder and Particle Journal*, 20(March), 208–222. <https://doi.org/10.14356/KONA.2002023>

Foggiatto, & Bianca. (2017). *Modelling and simulation approaches for exploiting multi-component characteristics of ores in mineral processing circuits* [The University of Queensland]. <https://doi.org/10.14264/UQL.2017.715>

Garrido, M., Sepúlveda, E., Ortiz, J., & Townley, B. (2020). Simulation of Synthetic Exploration and Geometallurgical Database of Porphyry Copper Deposits for Educational Purposes. *Natural Resources Research* 29(6), 3527–3545. <https://doi.org/10.1007/S11053-020-09692-6>

Gómez Sánchez, P. R. (2015). *Correlaciones entre espectrometría de reflectancia, geoquímica y mineralogía de sedimentos fluviales de la cuenca del río Elqui, IV región, Chile* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/133271/Correlaciones-entre-espectrometría-de-reflectancia-geoquímica.pdf?sequence=1>

Halley, S., Wood, D., Stoltze, A., Godfroid, J., Goswell, H., & Jack, D. (2016). *Using Multi-Element Geochemistry to Map Multiple Components of a Mineral System. Case Study from a Sediment Hosted Cu-Ni Camp, NW Province Zambia*. Society of Economic Geologist. https://www.researchgate.net/publication/315804896_Using_Multi-Element_Geochemistry_to_Map_Multiple_Components_of_a_Mineral_System_Case_Study_from_a_Sediment_Hosted_Cu-Ni_Camp_NW_Province_Zambia

Michaux, S. (2020). How to Set Up and Develop a Geometallurgical Program. *Geological Survey of Finland*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16170.24005>

Pérez Barnuevo, L. (2014). *Caracterización automatizada de las texturas de menas mediante análisis digital de imagen para su aplicación geometalúrgica* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/23458/1/LAURA_PEREZ_BARNUEVO_a.pdf

Townley, B. K. (2020). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. *INGLOMAYOR. Section C, 19*, 1–90. <https://inglomayor.cl/edicion19/c/paper1.pdf>

UYSAL, I., ZACCARINI, F., SADIKLAR, M. B., TARKIAN, M., THALHAMMER, O. A. R., & GARUTI, G. (2009). The podiform chromitites in the Dagküplü and Kavad mines, Eskisehir ophiolite (NW-Turkey): Genetic implications of mineralogical and geochemical data. *Geologica Acta*, 7(3), 1–90. <https://revistes.ub.edu/index.php/GEOACTA/article/view/105.000001442>

Contribución de autoría:

Conceptualización, análisis formal, metodología y redacción – revisión: Julio Alejandro Castro Andrade.

Administración del proyecto, supervisión, validación y redacción - revisión y edición: Renzo Paolo Mario Dávila Medina.

Curación de datos, adquisición de fondos, investigación: Jesús Alberto Torres Guerra.

Recursos, Software, visualización y redacción - borrador original: Vidal Sixto Aramburú Rojas.