



Modelamiento geometalúrgico en el proyecto La Granja

Chris Wright¹, Mark Fennel², Xyona Chávez¹, Percy Salazar¹, y Mark Bixley¹

¹ Rio Tinto Minera Peru, Av. Larco 1301, piso 15, Miraflores, Lima 18, Perú

² Rio Tinto Copper Projects, 4700 Daybreak Parkway, South Jordan, Utah, 84095 USA

RESUMEN

Las preguntas claves en la construcción de un modelo geometalúrgico son:

1. ¿Cuáles son los flujos de procesos aplicados o por ser evaluado?
2. ¿Cuáles son los controles principales en el valor y calidad del producto, y los costos de producción para cada flujo de procesos?
3. ¿Cuáles son las variables primarias que dan aporte a la respuesta metalúrgica del mineral?

Para construir un modelo geometalúrgico confiable, es importante que los controles geológicos de las variables primarias utilizadas en la estimación de respuesta metalúrgica estén modelados con precisión. Los controles geológicos pueden incluir litología,

alteración, procesos supergénicos, y estructura que tienen influencia en la mineralogía económica y de la ganga de la mena. El modelo geometalúrgico también requiere que las variables primarias y de respuesta metalúrgicas sean correctamente alineadas con el diseño de proceso y los ejercicios de planificación de minado. Por esta razón, la construcción y aplicación del modelo geometalúrgico es una actividad interdisciplinaria que necesita participación de las áreas de geología, minería, y metalurgia. El modelo geometalúrgico, que es el resultado de la integración de las disciplinas de geología, minería, y metalurgia, agregaría valor y disminuiría el riesgo del proyecto.

Se está presentando un ejemplo de modelamiento geometalúrgico en el proyecto La Granja.

1. Introducción

La Granja es un yacimiento de tipo pórfido de cobre, con brechas y skarns mineralizados asociados, en un área de aproximadamente 3 km x 3 km y en un rango vertical de 2000 m. El sistema se ubica en el cinturón miocénico de los Andes en el norte del Perú.

La litología predominante consiste en un pórfido dacítico donde las fases de intrusión son identificadas con rangos de composiciones que van desde diorita a riódacita, acompañadas por cuerpos de brecha hidrotermal que forman el núcleo de la mineralización. El depósito puede ser dividido en dos zonas:

1) El grupo de pórfidos Cerro Paja Blanca, al este del río Ayraca, fue identificado por los primeros propietarios y perforado parcialmente por Cambior y Billiton.

2) El grupo de pórfidos Mirador, hacia el oeste, cual ha sido identificado recién a partir de varios estudios y está siendo explorado por Rio Tinto Minera Perú SAC (RTMP).

La secuencia volcánica-sedimentaria, con buzamiento predominante 20° al sureste, consiste (1) de estratos

volcanoclásticos (Formación Oyotún) superpuestos por (2) cuarcitas-areniscas (Grupo Goyllarisquizga), sobreyacido a su vez por (3) secuencia de calizas y limolitas de las formaciones Inca, Chúlec, y Pariatambo, superpuestos a su vez por (4) productos volcánicos (andesitas-dacitas) de la Formación Llama del Grupo Callipuy.

Los intrusivos tempranos, controlados por fallas, varían de granodioritas a dioritas estériles. La intrusión principal y generadora de la mineralización consiste en un pórfido dacítico temprano, cuyas variedades más tempranas incluyen pórfidos dioríticos-dacíticos a cuarcíferos, con sus respectivos pórfidos interminerales de composición dacítica. El desarrollo de skarn en la secuencia sedimentaria calcárea se asocia principalmente a los pórfidos tempranos. Los cuerpos de brechas hidrotermales se desarrollan en ambos *clusters*, principalmente en los contactos entre pórfidos y skarn. Por lo general, albergan las más altas leyes de cobre, seguidos por los pórfidos tempranos y los skarns. Hacia el

centro del pórfido El Mirador, existe una fase final denominada "diatrema tardía", sin mineralización, en forma de embudo con contactos algo distintos, más angosto en profundidad y ampliándose cerca a la topografía.

RTMP ha explorado el depósito desde 2006, llevando a cabo investigaciones geológicas, geotécnicas, y metalúrgicas, y ha identificado que un flujo de procesos híbrido, compuesto de lixiviación en pilas para tratar mineral que no produzca concentrados viables, y de flotación para tratar mineral que no responde

favorablemente a lixiviación, es una opción atractiva para el desarrollo del proyecto.

2. Respuesta metalúrgica y variables primarias

La interpretación de resultados de pruebas metalúrgicas de lixiviación y flotación indica que hay una serie de variables primarias en el mineral que controla la respuesta metalúrgica durante los procesos de lixiviación y flotación (Tabla 1).

Tabla 1. Variables primarias y respuestas metalúrgicas.

Variable primaria	Respuesta Metalúrgica
Lixiviación	
Ley de cobre	Producción de cátodo
Mineralogía de cobre	Extracción y cinética de extracción
Pirita	Balance de ácido
Minerales de ganga reactivas	Balance de ácido, química de la solución
Arcillas	Permeabilidad de solución y aire
Molienda y flotación	
Dureza, mineralogía de ganga	Rendimiento, tipo y capacidad del circuito de cominución
Abrasividad y dureza	Tipo, capacidad de circuito de cominución
Ley y mineralogía de cobre	Recuperación de cobre
Mineralogía de ganga	Recuperación y ley de cobre en concentrado final
Tamaño y texturas de minerales	Liberación y recuperación
Leyes de co-productos	Valor de concentrado
Leyes de contaminantes	Calidad/viabilidad comercial de concentrado

En La Granja, las respuestas metalúrgicas más importantes están asociadas con la mineralogía de la mena. La mineralogía de cobre, predominantemente calcopirita, calcosina, covelina, y enargita, está relacionada a la cinética de lixiviación y la recuperación de cobre a cátodos y concentrados. La mineralogía de ganga, específicamente la concentración y tipo de arcillas, tiene una correlación fuerte con la dureza del mineral y su índice SPi para molienda, y su permeabilidad hidrodinámica de solución y aire durante el proceso de lixiviación.

3. Modelamiento geometalúrgico

3.1. El modelo geológico y modelo de recursos

La base del modelo geometalúrgico y el modelo de recursos de La Granja es el modelo geológico. La definición del modelo genético del yacimiento, mediante adquisición de datos geológicos por mapeo y perforación y la interpretación de la geometría de los controles geológicos como el piso de la capa lixiviada, los límites de los pórfidos, y las zonas de skarn, es fundamental en la precisión de las estimaciones de las leyes de cobre, cobre soluble, plata, zinc, arsénico, magnesio, calcio, hierro, aluminio, potasio, carbonato, y azufre en el modelo de recursos. Estas variables primarias, medidas por más de 70,000 ensayos de más de 200,000 m de perforación diamantina, están traducidos a minerales que tienen aporte a la respuesta metalúrgica del mineral, a través de

una serie de funciones de transformación.

3.2. Funciones de transformación

Las funciones de transformación, elaboradas desde la base de datos geometalúrgica, conectan las variables primarias en el modelo de recursos a minerales y luego a respuestas metalúrgicas. La base de datos geometalúrgica en La Granja está compuesta de ensayos multi-elementales, análisis de cobre secuencial, mineralogía detallada de QEMSCAN *rapid-scan*, y un análisis de la respuesta de lixiviación en ácido de 1500 muestras de intervalos de perforación diamantina en una malla de entre 100 m a 200 m.

El QEMSCAN es un sistema automatizado que trabaja en alto vacío y que utiliza un haz de electrones que incide sobre la muestra. Los electrones de la muestra son detectados por detectores EDS (*energy dispersive spectra*) y BSE (*back-scattered electron*). Posteriormente esta información es transmitida al software para cuantificar la composición mineralógica y elemental de la muestra. El QEMSCAN que tiene La Granja utiliza un SIP (*species identification protocol*) preparado para este proyecto para identificar las especies existentes (minerales económicos y ganga). Las muestras medidas son cuidadosamente preparadas para obtener briquetas con una distribución uniforme y superficie plana para que los resultados sean representativos y confiables.

Las funciones de transformación han sido desarrolladas para pirita, calcopirita, calcosina, covelina, enargita, esfalerita, galena, calcita, muscovita, granate, epidota,

esolecita, diópsido, tremolita, clorita, y un índice de arcillas que permite la identificación de material con mayor a 5 % de caolinita y pirofilita. Los dominios geometalúrgico están asignados por la mineralogía estimada en cada bloque.

3.3. Dominios geometalúrgicos

En base del modelo genético del yacimiento, los estudios geológicos y metalúrgicos, y la relación entre respuesta metalúrgica y variables primarias, una matriz de nueve dominios geometalúrgicos se ha utilizado para la construcción del modelo geometalúrgico y para asegurar la representatividad del muestreo metalúrgico (Tabla 2).

Tabla 2. Dominios geometalúrgicos.

		Sulfuros Primarios	Sulfuros Secundarios	As ≥ 250 ppm
Pórfido – <i>Phyllic</i>		1A	2A	3
Pórfido – <i>Argillic</i>		1B	2B	
Skarn	Granate	C		F
	Mixto	D		
	Clorita	E		

3.4. Caracterización metalúrgica

Las respuestas metalúrgicas del mineral de La Granja están caracterizadas por pruebas:

- de columna pequeña (~12 kg), mediana (~120 kg), grande (~4,500 kg), y *cribs* de tres (~120 t) y cinco (~320 t) metros de diámetro y diez metros de altura, con mineralogía de los compósitos originales y los ripios, además del modelamiento de las extracciones de cobre y reactividad de ganga por mineral;
- de permeabilidad de solución y aire en condiciones saturadas y no-saturadas con análisis mineralógico de los compósitos;
- de índices de chancado, SAGDesign (*Standard autogenous grinding design*), SPi, BMi (*Bond ball mill work index*);
- de flotación *rougher* y de limpieza *batch*, y de ciclo cerrado con análisis mineralógico por tamaño de los productos.

La respuesta metalúrgica de lixiviación y flotación de cada tipo de mineral ha sido caracterizada en función de la mineralogía del material tratado, y las respuestas están asignadas al modelo geometalúrgico a través de la mineralogía estimada en cada bloque.

Los compósitos metalúrgicos están seleccionados para cubrir el rango de los tipos de mineral, espacialmente y temporalmente por las fases de minado. Los compósitos incluyen intervalos de altura de banco para entender la variabilidad de la respuesta de mineral por dominio geometalúrgico y espacialmente, compósitos maestros tomados de intervalos distintos que reflejen mezclas de tipos de mineral de destinos de procesamiento y periodos de producción.

La matriz está compuesta de columnas en función de la mineralogía de cobre, y rangos en función de la mineralogía de la ganga. Es necesario que la definición de cada dominio sea rigurosa y que pueda ser determinada en:

- materiales de perforación y muestreo metalúrgico para permitir la selección de compósitos representativos para pruebas metalúrgicas;
- bloques en el modelo geometalúrgico a través de las leyes estimadas en el modelo de recursos para secuenciación y planificación de minado a largo plazo;
- operaciones por análisis de muestras de barrenos para valorización de mineral y selección del destino de proceso para planificación a corto plazo.

3.5. Modelo geometalúrgico

Las respuestas metalúrgicas están aplicadas al modelo geometalúrgico por asignación directa por dominio geometalúrgico, estimación por variable primario, o una combinación de ambos.

Los costos de procesamiento por flotación, consumo de ácido en lixiviación, y recuperaciones de los sub-productos a concentrados, están asignados al modelo directamente por valor promedio estimado para cada dominio geometalúrgico. La recuperación de cobre por flotación y lixiviación en pilas, y las leyes en concentrados finales están asignadas a cada bloque en el modelo en función de la ley del bloque, de una función de transformación a la mineralogía del bloque, de la respuesta metalúrgica de cada mineral, y de una función de escalamiento hacia la recuperación de cobre tomando en cuenta las pérdidas en el proceso a la escala industrial. La dureza e índice de molienda tienen una fuerte correlación con tipo de mineral y profundidad; en este caso, la respuesta de conminución está estimada en función de ambos parámetros.

3.6. Modelo de arcillas

La Granja está usando el NIR (*near infrared*), que es un espectrómetro que utiliza una técnica analítica que relaciona energía absorbida por la muestra con su composición química y física. El método es especialmente sensible a minerales hidratados como las arcillas. Con este equipo se puede hacer modelos quimiométricos para el manejo, interpretación, y predicción de datos. Los datos usados para la construcción y calibración del modelo de arcillas fueron del QEMSCAN. Con este modelo predictivo se puede cuantificar el contenido de arcillas por muestra.

3.7. Aplicación del modelo geometalúrgico

El modelo geometalúrgico de La Granja está siendo utilizado en ejercicios de planificación de producción estratégica. La caracterización de la respuesta metalúrgica de cada modelo de bloque, independiente de su ley, ubicación, o tipo de mineral, permite que el destino óptimo de cada bloque pueda ser seleccionado por su valor en función de las respuestas metalúrgicas posibles, de los costos de procesamiento del material (incluso su costo medio ambiental si no está tratado en la planta de procesamiento de mineral), en base de la combinación de procesos disponibles y la capacidad instalada de los procesos. La flexibilidad del modelo geometalúrgico permite la elaboración y evaluación de planes de producción en base a distintos aspectos de riesgo como:

- perfiles de precios de cobre a largo plazo;
- escenarios de inversión de capital;
- clasificación (medido, indicado, o inferido) o incertidumbre en los recursos minerales;
- escenarios de *ramp-up* de capacidad minera y procesamiento;
- tecnología metalúrgica;
- impactos socio-ambientales.

Una matriz de más de 500 casos de negocios ha sido evaluada utilizando el modelo geometalúrgico de La Granja y variando cronogramas y caminos de desarrollo, especificaciones de concentrados, y tolerancia de características de reactividad de ganga en material tratado por lixiviación en pila. Los resultados permiten la

evaluación de la relación entre valor presente neto (NPV) y riesgo, en que la diferencia entre la selección de un parámetro conservador o agresivo puede producir una varianza en valor presente neto de ~8 % a ~15 %.

4. Conclusiones

Los componentes claves en el desarrollo del modelo geometalúrgico que agregará valor y evaluará riesgo en el proyecto u operación son:

- Participación y comunicación interdisciplinaria entre las áreas de geología, minería, y metalurgia.
- Definición de respuestas metalúrgicas del proceso o procesos por ser aplicados.
- Identificación de las variables primarias responsables para las respuestas metalúrgicas.
- Modelo geológico y modelo de recursos que toma en cuenta los controles geológicos (litología, alteración, estructura) de las variables primarias.
- Dominios geometalúrgicos o tipos de mineral que representan la variabilidad del mineral a ser procesado.
- Pruebas metalúrgicas que cubren los dominios geometalúrgicos.
- Base de datos geometalúrgica que permite el desarrollo de las funciones de transformación de variables primarias a respuestas metalúrgicas.
- Aplicación de la respuesta metalúrgica del mineral en la planificación de minado y valorización de mineral.