

Criterios para la determinación de unidades geometalúrgicas.

Rubicelia García Garnica R. ^{1*}, Roel Cruz ²

¹Facultad de ingeniería, UASLP. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, 78290 San Luis Potosí, S.L.P.

²Instituto de Metalurgia-Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Sierra Leona 550, Lomas 2ª sección, 78210 San Luis Potosí, S.L.P., México.

*rubicelia.garnica@uaslp.mx

RESUMEN

La geometalurgia ofrece beneficios apreciables a través de toda la cadena de valor de la industria minera, particularmente en el nivel operativo, en el que se puede colocar de manera efectiva para ayudar a optimizar la utilización de recursos minerales ya que reduce significativamente el impacto de incertidumbre en el planeamiento de la mina, debido a que documenta la variabilidad geológica y mineralógica de un depósito y permite conocer su impacto en el rendimiento metalúrgico y de molienda.

La aplicación de la geometalurgia ha tomado gran auge en los últimos años y el avance en caracterización de minerales junto con el aumento de las capacidades de modelado han contribuido al aumento de la producción de investigación en esta área. México presenta un rezago en el desarrollo de programas geometalúrgicos, sin embargo, las perspectivas a largo plazo de las difíciles condiciones del mercado en el contexto de una economía global en transformación, además de un rápido agotamiento de los yacimientos ricos en minerales de valor, deben impulsar a la industria de la minería en México para examinar la aplicación de técnicas geometalúrgicas.

El Instituto de Metalurgia es pionero en estudios de investigación con este enfoque, por lo que en este trabajo se presenta una evaluación de los criterios usados para la formación de composites de mineral, denominados unidades geometalúrgicas, que permitieron correlacionar diferentes variables geológicas de los yacimientos de estudio con la respuesta metalúrgica en los procesos de molienda, concentración por flotación y lixiviación.

Lo anterior ha permitido generar modelos matemáticos predictivos que correlacionan diferentes variables geológicas que son la base para ajustar los procesos y tener una máxima recuperación de los minerales y metales de interés y así optimizar los recursos y reducir los costos operativos para contribuir a una minería más eficiente y responsable, minimizando el impacto ambiental.

PALABRAS CLAVE: *geometalurgia, lixiviación, flotación, molienda.*

ANTECEDENTES

La geometalurgia es una disciplina encargada de predecir la respuesta metalúrgica de un yacimiento mineral al cuantificar la variabilidad mineral y los parámetros del proceso metalúrgico, integrando información geológica, mineralógica y del procesamiento de minerales para el desarrollo de modelos que permiten predecir el comportamiento del mineral en las diferentes etapas del proceso (Alfaro, 2012; Parian *et al.*, 2015). Estos modelos son cruciales para la planificación minera y la optimización de los procesos metalúrgicos, como la molienda, flotación y lixiviación, ya que permiten simular el comportamiento del mineral en diferentes condiciones operativas.

Además, la geometalurgia permite definir las zonas del depósito donde el mineral es factible técnicamente de ser procesado, como también, proyectar las primeras ecuaciones de recuperación y el consumo de los principales insumos del proceso (Rosales, 2012)). Los estudios geometalúrgicos se definen en general sobre dominios o unidades geometalúrgicas (UGM), es decir, regiones del espacio con un comportamiento geológico y metalúrgico similar.

La geometalurgia ha ganado atención en los últimos años y para su desarrollo es necesario generar un programa con base en datos geológicos obtenidos a partir de la selección de una serie de muestras representativas del yacimiento, las cuales se evalúan con una metodología estándar para determinar los parámetros metalúrgicos, tales como leyes de alimentación, dureza, mineralogía, cinética de lixiviación, etc. Con los resultados obtenidos se puede crear un modelo matemático para explicar la respuesta metalúrgica basada en las características geológicas del yacimiento (Dobby *et al.*, 2004; Bulled y McInnes, 2005; David, 2007; Lamberg, 2011).

Una vez obtenidos estos parámetros es posible cuantificar la variabilidad del depósito mineral usando técnicas geoestadísticas a través de modelos de bloques o planes de minado, lo que permitirá posteriormente definir alternativas que permitan plantear las medidas necesarias para el desarrollo de diseños, planificación de la operación, desempeño económico, reducción de riesgo técnico, etc., por lo que la geometalurgia desempeña un papel importante en las diferentes operaciones metalúrgicas durante el desarrollo y operación de una mina. Un bloque o unidad geometalúrgica es una porción tridimensional de mineral de yacimiento el cual debe ser caracterizado de modo tal que el rendimiento metalúrgico y su valor económico queden determinados mucho antes de que el mineral ingrese a la planta (Williams, 2013).

México presenta un rezago en el desarrollo de programas geometalúrgicos principalmente para el diseño de una mina, siendo Australia, Sudáfrica y Chile donde se reportan avances significativos en su desarrollo. En los últimos años en el Instituto de Metalurgia de la UASLP varios investigadores han desarrollado modelos predictivos en proyectos de investigación dentro de un marco geometalúrgico.

La base de la geometalurgia radica en el entendimiento detallado de la mineralogía del yacimiento, ya que cada yacimiento presenta variabilidad en su composición. Los estudios de caracterización mineralógica (Tabla 1) permiten identificar las fases minerales presentes, así como su distribución y textura. La variabilidad mineralógica impacta directamente en el comportamiento del mineral durante los procesos de conminución, concentración y lixiviación y es usado como puente para correlacionar la información geológica con la información metalurgia.

Tabla 1. Niveles de información y los métodos de análisis de uso común en los estudios mineralógicos para la geometalurgia (Lamberg *et al.*, 2013).

Nivel	Resultado de análisis	Métodos de análisis utilizados
1. Composición Elemental	Composición química de las muestras	Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF); disolución + espectroscopia de absorción atómica (AAS) / de plasma acoplado inductivamente con espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) / ICP-MS (ICP-MS)
2. Mineralogía cualitativa	Lista de minerales presentes en las muestras, litología.	Difracción de rayos X (DRX); Microscopía óptica
3. Mineralogía cuantitativa	Mineralogía Bulk, es decir, la proporción de masa de minerales en muestras (composición modal)	DRX cuantitativa; Conversión de elemento a mineral (EMC); Mineralogía automatizada basada en MEB (MLA, QEMSCAN, Inca Mineral, etc.); Análisis de imagen óptico (OIA, CSIRO Recognition3 / Mineral3); Imágenes hiperespectrales (SisuRock)
4. Textura Mineral	Composición química de los minerales (medida adicional para evaluar el grado de minerales vs grado elemental). Tamaños de grano del mineral, minerales asociados, liberación de los minerales en las muestras.	Microsonda electrónica de barrido (EPMA) con espectrómetro de energía dispersiva (EDS) / espectrómetro de Longitud de onda dispersiva (WDS) Análisis de imágenes basada en MEB (MLA, QEMSCAN, TIMA, mineralógico, Inca Mineral, RoqSCAN); Análisis de imagen óptico (CSIRO Recognition3/Mineral3); Retrodispersión de difracción de electrones (EBSD); Hiperespectrales Imaging (SisuRock)

Por lo anterior es de vital importancia definir los criterios que nos permitan formar las unidades geometalúrgicas para el estudio de diferentes yacimientos minerales. Ya que en la evaluación de yacimientos un aspecto importante es conocer la distribución espacial de variables regionalizadas (atributos geológicos, geoquímicos, metalúrgicos, etc.), así como su continuidad espacial. Este último concepto es utilizado en todas las fases del proceso de evaluación y permite obtener resultados que son confiables y lo más parecidos a la realidad bajo diferentes escenarios. El conocer cómo se distribuyen los atributos de interés en una región determinada no es el único aspecto crucial en las fases del proceso minero, pues existen factores determinantes que pueden condicionar la factibilidad técnica y económica de los proyectos.

Muchas veces, estos factores están relacionados con características geológicas y metalúrgicas de los depósitos.

Dado que el objetivo es determinar relaciones entre la geología y la metalurgia, incorporando datos de interés como litología, alteración, mineralogía, ley del metal de interés, etc; a fin de retroalimentar a la exploración y realizar la estimación de reservas (Hallewell, 2009)). Como producto se obtiene una agrupación de unidades geometalúrgicas con un comportamiento metalúrgico determinado, a las cuales se les asigna las mismas ecuaciones de recuperación y de consumo de insumos de proceso. De esta forma se realiza una estimación más exacta de los recursos y reservas a partir del estudio de compositos a nivel laboratorio.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Identificación de la geología del yacimiento

Un análisis detallado de la estructura geológica permite definir zonas con características particulares, facilitando la formación de UGM que incorporen la composición mineral y sus propiedades metalúrgicas.

A partir de la información geológica y geoquímica del yacimiento se forman compositos con atributos similares que puedan tener un efecto en la variable de respuesta del proceso metalúrgico seleccionado.

Preparación de las unidades geometalúrgicas

Las UGM fueron formadas por un número determinado de muestras que fueron clasificadas con base en sus características de litología, alteraciones, textura mineral, contenido de materia orgánica, etc.

Para formar las UGM se tomó un porcentaje en peso, del 20 % al 50 % de cada muestra destinada para cada unidad dependiendo de los kg de muestra necesaria para los estudios, formándose compósitos los cuales se homogenizaron y se separó una porción para los estudios de caracterización y la porción restante para la experimentación (Figura 1).

Caracterización elemental

La caracterización elemental de las muestras se realizó usando un Espectrómetro de Absorción Atómica, marca Perkin Elmer Analyst, modelo 3110. La forma de disolución de la muestra es por digestión ácida en agua regia.

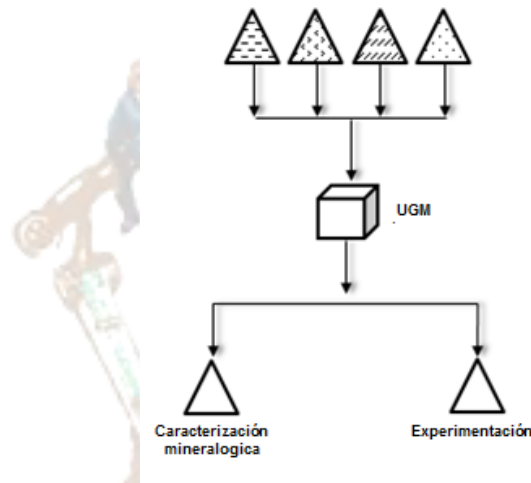


Figura 1. Diagrama de flujo de preparación de las unidades geometalúrgicas.

Caracterización mineralógica

Minerales mayores

El análisis de DRX se empleó para determinar los minerales mayoritarios (>5%) de la muestra de cabeza, así como corroborar los resultados con las demás técnicas de caracterización. El equipo utilizado fue un difractómetro de Rayos X-Bruker, modelo D8-Advance Davinci (Figura 22). La preparación de muestra consiste en reducir el tamaño de partícula a un tamaño menor de 37 μm y compactarlo como una película delgada sobre una superficie adherente (porta muestras de vidrio), evitando orientaciones preferenciales.

Minerales menores

Las muestras fueron caracterizadas por microscopía óptica en un equipo marca Nikon modelo H600L de aumentos hasta 100X con luz reflejada y transmitida y por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en un equipo marca Philips modelo XL-30 y marca JEOL modelo JSM-6610LV equipado con detector de electrones retrodispersados, detector de electrones secundarios y detector de dispersión de energía de rayos X. Las imágenes se obtuvieron por medio de electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BES) y el análisis elemental semicuantitativo (porcentaje en peso) por dispersión de energía de rayos X (EDS).

Estudios de molienda

En los diferentes estudios el análisis granulométrico para cada muestra se llevó a cabo mediante el cribado del mineral en tamices de malla secuenciada (Tyler®); la cantidad de mineral acumulada en cada tamiz se pesa y con ella se generan las curvas de distribución granulométrica.

Índices de trabajo de molienda.

Se realizaron pruebas de índice de trabajo de molienda para el cálculo de la energía requerida para el rompimiento de las partículas en cada una de las UGM; la metodología utilizada es la de Bond.

El índice de trabajo de molienda (BWi) se realizó en un molino estandarizado de Bond (Bico® modelo 71636), de 12" de diámetro y 12" de largo; la carga de bolas utilizada fue la estándar de laboratorio; se usó la malla número 80 como referencia, para el cálculo del F80, se utilizaron las mallas 5, 8, 10, 14, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 y 140, y para el P80 las mallas 80, 100, 120, 140, 200, 230, 270 y 325.

Cinética de Molienda

Las pruebas de cinética de molienda se realizaron para determinar el tiempo necesario para alcanzar el tamaño de grano (partícula) requerido para exponer los minerales de cobre en los procesos de flotación y lixiviación.

Las moliendas se realizaron en fase húmeda con 1 kg de muestra con un 66% de sólidos en molino de bolas estandarizado, el cual tiene un diámetro de 20.5 cm y un largo de 27 cm, con un collar de bolas de 11.75 kg. Los tiempos de molienda fueron de 5, 10, 15 y 20 min. Se realizó un cribado en húmedo al mineral de alimentación y después de la molienda el cribado fue hecho por los tamices 10, 20, 40, 60, 80, 100, 140, 200, 230, 325 y 400.

Estudios de flotación

Las pruebas de flotación se llevaron a cabo en una celda de flotación Denver marca METSO® serie D12V-033, con un recipiente de 3 litros, flujo de aire por succión y una velocidad de agitación constante de 1200 rpm.

Estudios de lixiviación

Se realizaron pruebas de lixiviación dinámica (prueba de rodillo de botella). Cada prueba se realizó con 200 g de mineral, en botella ámbar de 4 L, con una velocidad de agitación de 60 rpm en una mesa de rodillos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Yacimiento Pórfido Cupríferos zona óxidos y de transición.

Para el diseño y optimización de un proceso de recuperación de los minerales pórfidos de cobre es fundamental conocer cómo el cobre está instalado en las diferentes zonas (Gregory et al., 2013), y por lo tanto se debe determinar el porcentaje en cada una; considerando que el depósito está compuesto de

varios tipos de minerales y la distribución de los elementos valiosos en ellos es compleja, deben relacionarse con los minerales de ganga.

Una revisión general de las muestras de barreno recibidas permitió determinar que existen tres tipos de litología en dos zonas de estudios (CP y CT), las cuales fueron Granodiorita (Gd), Brecha Granodiorítica (Gd-Bx) y Brecha (Bx).

Cada una de las muestras se pesó para asegurar el dato proporcionado, después se agruparon por una misma litología para el peso total y se calculó su porcentaje en peso. Para la formación de las unidades geometalúrgicas (UGM), se tomó un porcentaje de cada muestra y se mezclaron perfectamente.

Los cálculos para obtener una ley promedio en cada uno de las UGM se basaron en el porcentaje en peso y la ley elemental en la geoquímica. Los elementos mayores de roca reportados fueron Fe, Ca, Mg, K y Na. En total se obtuvieron seis UGM.

El análisis por DRX mostró que las especies predominantes son los silicatos; no se reportó ninguna especie de cobre ni de óxidos de hierro debido a que las UGM contienen menos del 5% de estas especies. El análisis semicuantitativo por el método de RIR permitió determinar un grado de abundancia de los minerales, los cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición mineralógica porcentual de los minerales de ganga en las UGM por litología para CP y CT (García-Garnica, 2016).

Nombre	Formula	CP Gd	CP Gd-Bx	CP Bx	CT Gd	CT Gd-Bx	CT Bx
Quarzo	SiO ₂	52.16	27.85	29.17	34.53	35.81	34.28
Microclina	KAlSi ₃ O ₈	5.99	26.83	19.85	17.30	5.73	11.94
Ortoclasa	K(AlFe)Si ₂ O ₈	11.22	0	19.84	17.29	15.67	11.96
Clinocloro	(Mg ₅ Al)(Si ₄ Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	11.48	21.40	10.58	9.50	9.33	16.56
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	0	3.08	3.55	4.48	15.55	4.64
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	8.02	4.36	0	7.47	8.18	6.52
Otros Silicatos		6.12	11.49	12.03	4.42	4.74	9.49

En la Tabla 3 se presenta un resumen de la composición mineralógica de los minerales de Cu y Fe presentes en cada litología para CP y CT.

Tabla 3. Minerales de cobre y hierro en los BGM Cerro Pelón y Cerro Túnel (García-Garnica, 2016)

MINERAL \ UGM	CP Gd	CP Gd-Bx	CP Bx	CT Gd	CT Gd-Bx	CT Bx
Óxidos de Fe	3.143	3.395	4.409	4.166	3.210	3.467
Malaquita	0.200	0.191	0.181	0.118	0.086	0.677
Cuprita	0.029	0.079	0.077	0.041	0.021	0.054
Silicatos Cu	0.376	0.104	0.147	0.254	0.046	0.128
Calcopirita	0.096	0.067	0.062	0.084	0.047	0.001
Bornita	0.006	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006
Calcocina	0.000	0.022	0.013	0.016	0.006	0.053

Un comparativo de los Wi obtenidos para las mismas litologías en las áreas de CP y CT (Figura 2) indica una variabilidad en los Wi, aunque correspondan a la misma litología. La mayor variación se observó en el caso de la granodiorita (Gd) ya que para CP se obtuvo un Wi de 12.59 kWh/t y para Cerro Túnel de 10.74 kWh/t, este último incluso por debajo de las obtenidas para los otros BGM, sin embargo, la desviación estándar entre ellas es de 1.31 lo cual puede considerarse dentro del error de la precisión estimada para la misma prueba que es del 2% (Sepulveda, 2006).

A partir de los porcentajes de los minerales mayores presentados en la Tabla 2, se calculó un Wi teórico y correlacionaron estadísticamente tanto el Wi teórico como el Wi experimental, asimismo se calculó una desviación estándar la cual fue menor a 1. En la Figura 3 se muestra gráficamente la comparación de los resultados de Wi teórico con el Wi experimental, corroborando la eficiencia del método para predecir las Wi de las UGM formadas, lo cual es de relevancia cuando el número de muestras para determinar la variabilidad en la molienda de todo un yacimiento es limitada; como es el caso de los estudios geometalúrgicos.

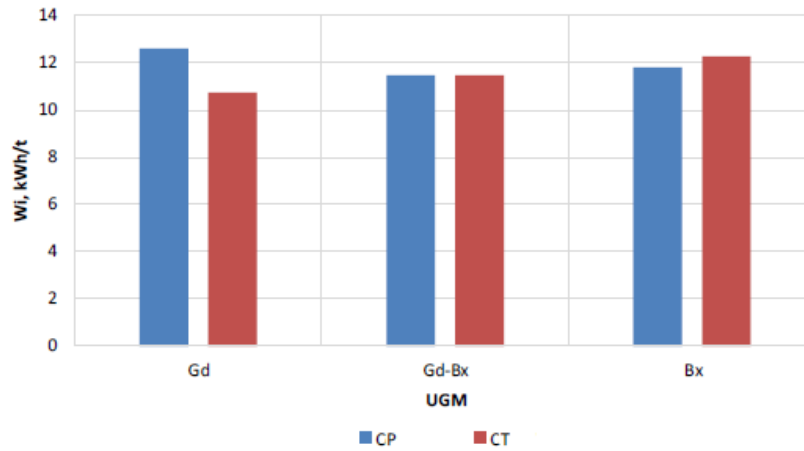


Figura 2. Comparación de los Wi de molienda por litología para las áreas de CP y CT.

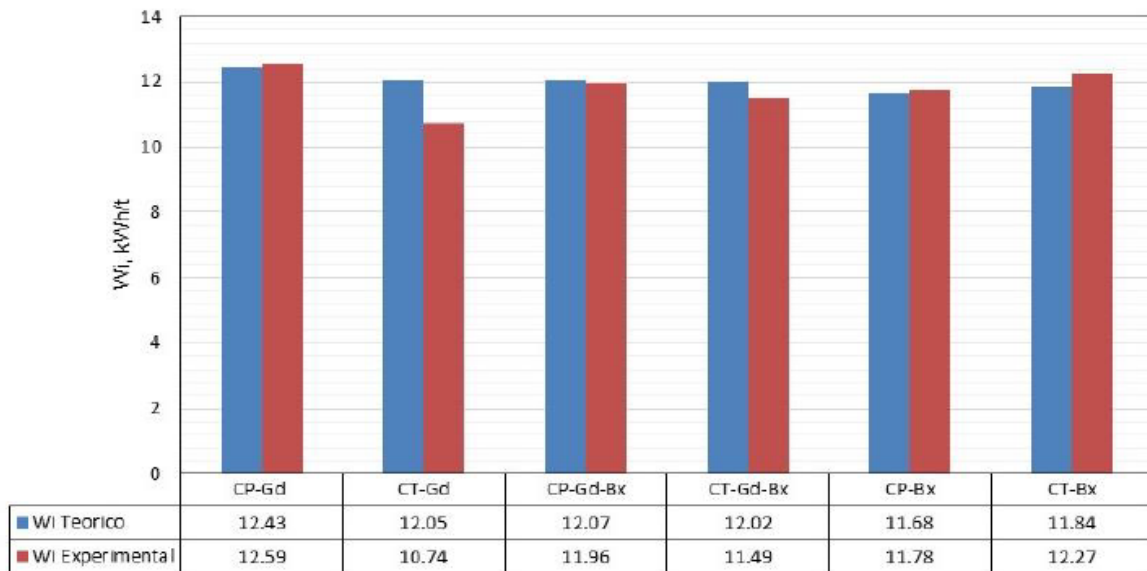


Figura 3. Comparación del Wi teórico calculado con el Wi experimental para cada UGM.

En el caso de la recuperación de cobre por lixiviación ácida con H_2SO_4 , se encontró una alta correlación para el contenido de malaquita y cuprita en las UGM con %Cu. Como se observa en la Figura 4 hay un alto grado de relación mutua tanto para CP ($R^2 = 0.8562$) como para CT ($R^2 = 0.814$), sin embargo, para CT se correlaciona linealmente contrario a Cerro Pelón que presenta una correlación polinómica de grado 2.

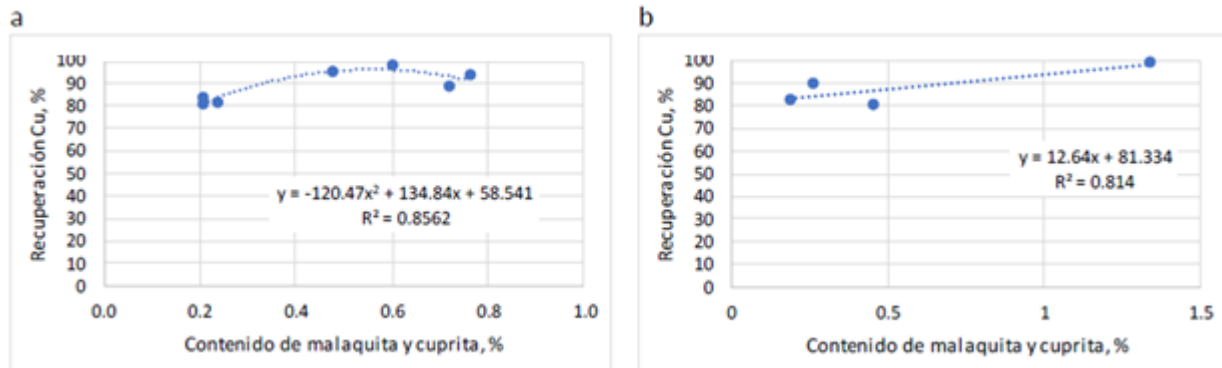


Figura 4. Diagramas de dispersión para correlacionar el contenido de malaquita con la recuperación de Cu en CP (a) y con la recuperación de Cu en CT (b).

De acuerdo con los resultados la predicción del Wi con la correlación de la composición mineralógica de cada litología con un % de error aceptable al igual que la recuperación de Cu por La relación con el contenido de malaquita y cuprita, por lo que se pueden usar como modelos predictivos del yacimiento.

Yacimiento tipo skarn

Aragón (2018) Estudió el efecto de las partículas asociadas de cobre y el tamaño de estas en el proceso de flotación, en un yacimiento tipo skarn, con base en los resultados de la caracterización mineralógica, la muestra de cabeza fue clasificada en cuatro tipos de texturas; que son:

- Textura simple: Unión física entre dos fases minerales que se encuentran en contacto a través de líneas que tienden a ser rectas o curvas muy abiertas (Figura 5a).
- Textura semi-envolvente: Una de las fases se encuentra rodeando a la otra, de manera que queda cubriendo una parte de la superficie (Figura 5b).
- Textura compleja: Minerales intercrecidos con formas irregulares, por lo que los granos están expuestos más separados (Figura 5c).
- Textura en inclusión: Partículas en las que una de las fases se encuentra atrapada o diseminada dentro de la otra fase (Figura 5d).

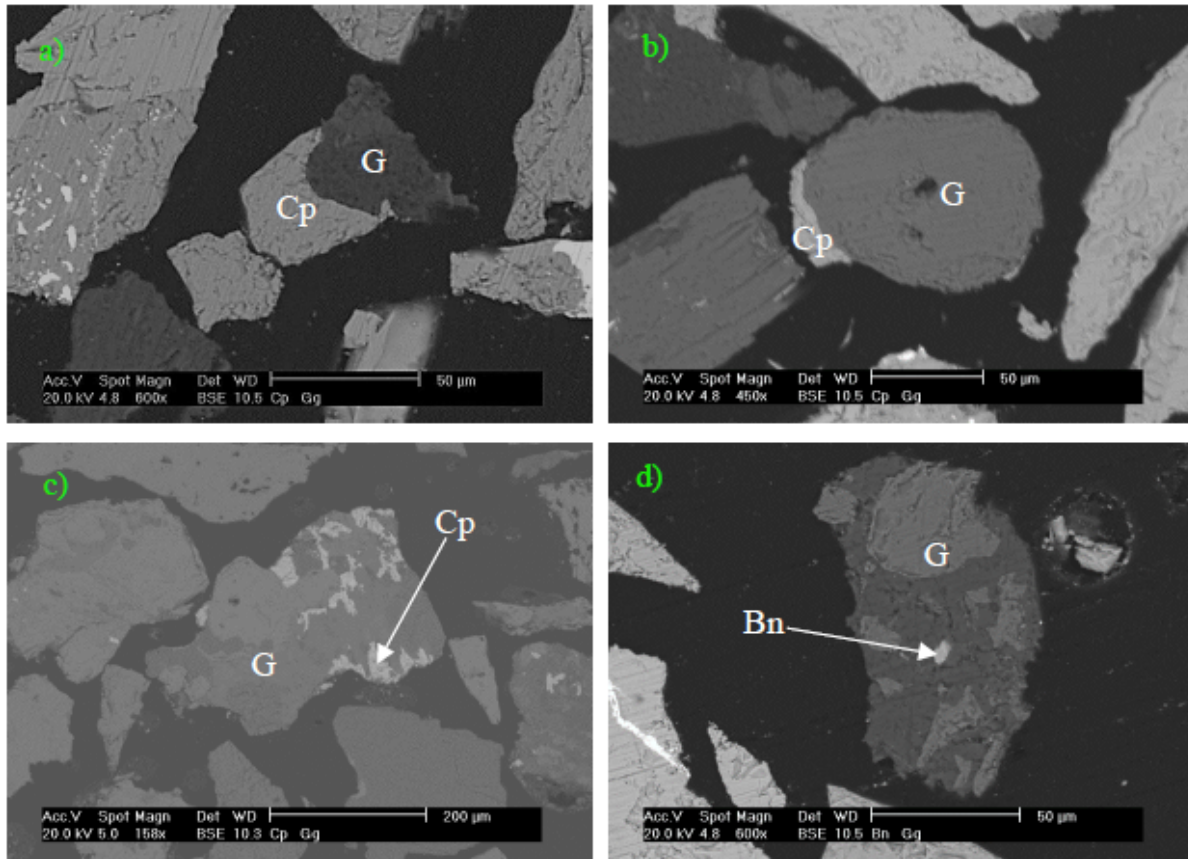


Figura 5. Fotomicrografías de tipos de texturas. a) Textura simple. b) Textura semi-envolvente. c) Textura compleja. d) Textura en inclusión (Tomado de Aragón, 2018).

Los minerales de cobre identificados fueron calcopirita y bornita, estos se clasificaron con base a su liberación y tipo de textura. Los minerales asociados a los sulfuros de cobre fueron principalmente ganga no sulfurosa, y en menor proporción pirita, bismuto y wittichenita. Por medio de los análisis modales, se realizó un estudio para comprender la flotación de las texturas a los diferentes tamaños de partícula analizados (+200, +325, -325). Estos atributos se correlacionaron con la recuperación de cobre en el proceso de flotación en árbol que se comparó con una cinética de flotación y como se puede observar en la Figura 6 la respuesta fue similar por lo que el análisis de flotación para la correlación con el tamaño de partícula se hizo por la metodología de flotación en árbol, teniendo como resultado:

Textura simple

La flotación de la bornita en partículas con textura simple fue más rápida a comparación de la calcopirita, esto observado en las 3 fracciones de tamaño. La mejor respuesta a la flotación de bornita fue en las partículas de tamaños +200 mallas, recuperando el 33% en la primera salida. En relación a la calcopirita, su flotación fue preferente en los tamaños +325 mallas, no obstante, gran parte de la recuperación se fue

hacia las colas, en especial en la fracción -325 mallas. Éste tipo de partículas tienen mayor área superficial expuesta de mineral cobre, por lo que existe mayor área de contacto para que pueda haber interacción con el colector y ayude a que su flotación sea preferencial.

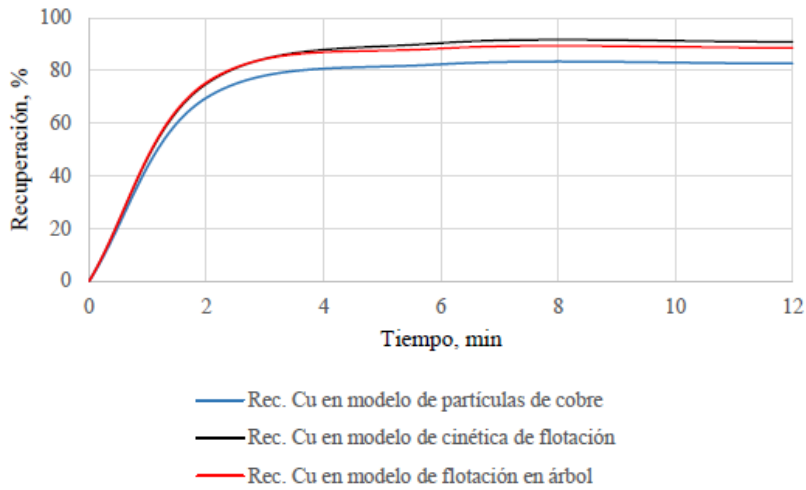


Figura 6. Comparación de la recuperación de cobre en modelo de partículas de cobre, modelo de cinética de flotación y modelo de flotación en árbol (Tomado de Aragón, 2018).

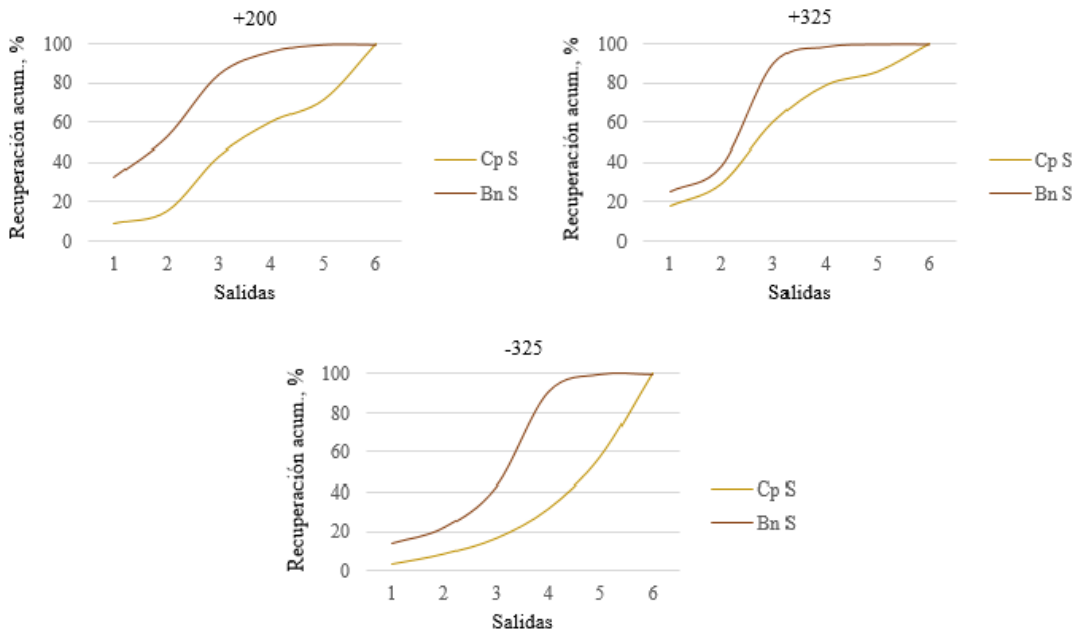


Figura 7. Recuperación de partículas con textura simple de calcopirita y bonita (Tomado de Aragón, 2018).

Textura semi-envolvente

De forma general, la textura semi-envolvente tuvo una recuperación lenta en los 3 tamaños de partículas, recuperando menos del 25% en la primera salida. La asociación semi-envolvente tiene una cierta proporción del mineral de interés rodeando al mineral de ganga, por lo cual se tiene la ventaja de que éste tipo de asociación está expuesto en la superficie pero solo cubre una proporción del área superficial total de la partícula, no obstante, esto puede ser favorable para la flotabilidad de las partículas, considerando que puede perjudicar el grado debido a la cantidad de ganga que existe en éstas partículas.

Textura compleja

La textura compleja en partículas de bornita fue mejor a comparación de la calcopirita, obteniendo mejores resultados en las fracciones +325 y +200, no obstante, su recuperación es lenta. En la calcopirita la recuperación es aún más lenta, específicamente en la fracción +200, en donde se recupera sólo el 18%, quedando el resto en las colas. La asociación compleja consiste en mineral de mena intercrecido con mineral de ganga, esto puede ser en diferentes formas irregulares, en donde se tiene mineral valioso expuesto en la superficie de la partícula de forma desordenada.

Textura en inclusión

La textura en inclusión fue la más lenta de todas las asociaciones, quedando más del 75% en las colas para todos los tamaños de partícula. Se observó una mejoría en las partículas de menor tamaño, lo cual puede deberse a que pudo haber flotado por arrastre mecánico (Figura 8). La textura en inclusión se refiere a minerales de mena atrapados o diseminados dentro de mineral de ganga, lo cual afecta la flotabilidad de estas partículas debido a que no se tienen granos expuestos del mineral de valor, por lo que no hay contacto con el reactivo, y debido a esto, estas partículas se van principalmente a las colas de flotación. El efecto que se observó en los productos fue que en los concentrados de mayor grado se encontró baja proporción de asociación en inclusión, y fue aumentando considerablemente hacia las colas.

Finalmente para predecir la recuperación máxima que se puede obtener de cada tipo de partículas de cobre, (calcopirita y bornita libres, calcopirita y bornita asociadas entre ellas en las 4 texturas, y calcopirita y bornita asociadas a ganga en las 4 texturas) se realizó el cálculo del contenido de los 18 tipos de partículas de forma ponderada (3 fracciones de tamaño) que aporta cada una para lograr conocer su recuperación, y esto se reconstruyó en todo el circuito de la flotación en árbol para determinar la recuperación en los productos de flotación. La textura en emulsión se consideró como partícula libre, puesto que su recuperación actúa de la misma forma. Se aplicó el modelo flujo-tapón en los tipos de partículas, obteniendo 18 valores de $R_{m\acute{a}x}$ y k , consiguiendo un buen coeficiente de correlación y desviación estándar entre los datos experimentales y el modelo (Tabla 4).

Las partículas libres de calcopirita y bornita obtuvieron valores aproximados al 100% en $R_{m\acute{a}x}$, así como también las partículas asociadas entre bornita y calcopirita. También se puede observar que las partículas

asociadas de bornita con ganga obtuvieron buenas recuperaciones máximas, excepto cuando la bornita está en inclusión. Las $R_{m\acute{a}x}$ y k de partículas de calcopirita asociadas a ganga indicaron valores bajos, siendo las texturas simple y semi-envolvente las más altas. Por lo que con base en estos resultados se logra una buena correlación entre los resultados de flotación y la textura del mineral.

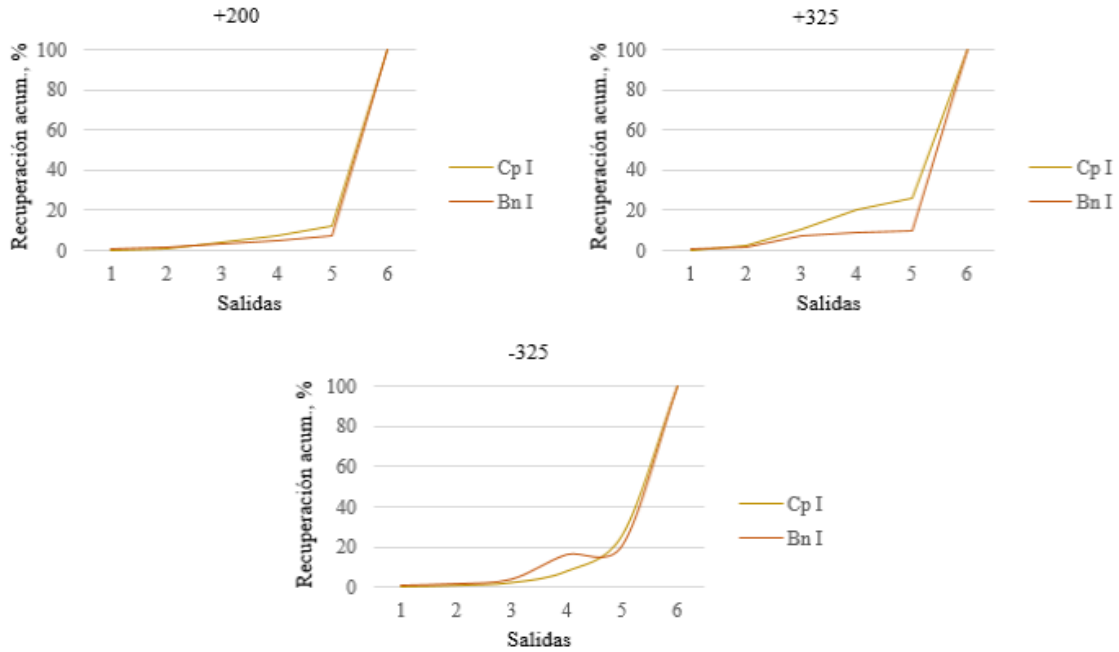


Figura 8. Recuperación de partículas con inclusión de calcopirita y bornita (Tomado de Aragón, 2018).

Tabla 4. Resultados de $R_{m\acute{a}x}$ y k del modelo de flotación de partículas de cobre.

Textura	Mineral	$R_{m\acute{a}x}$, %	k , min^{-1}	Coef. de correlación	Desv. estándar
Libre	Cp	93.08	0.015	0.998	0.412
Libre	Bn	99.32	0.017	1.0	0.444
Simple	Cp-Bn	100.0	0.021	1.0	0.452
Semi-envolvente	Cp-Bn	100.0	0.021	1.0	0.452
Compleja	Cp-Bn	100.0	0.021	1.0	0.452
Inclusión	Cp-Bn	100.0	0.021	1.0	0.452
Simple	Bn-Cp	100.0	0.023	1.0	0.454
Semi-envolvente	Bn-Cp	100.0	0.023	1.0	0.454
Compleja	Bn-Cp	100.0	0.023	1.0	0.454
Inclusión	Bn-Cp	100.0	0.023	1.0	0.454
Simple	Cp-G	77.00	0.008	0.972	0.298
Semi-envolvente	Cp-G	75.24	0.012	0.991	0.329
Compleja	Cp-G	32.23	0.003	0.962	0.111
Inclusión	Cp-G	15.40	0.002	0.964	0.042
Simple	Bn-G	97.18	0.014	0.999	0.428
Semi-envolvente	Bn-G	92.58	0.008	0.980	0.393
Compleja	Bn-G	97.07	0.012	0.998	0.424
Inclusión	Bn-G	9.77	0.009	0.985	0.042

Yacimiento tipo stockwork

García-Sánchez (2022) estudio un yacimiento polimetálico tipo stockwork con mineralización diseminada, con el objetivo de correlacionar el efecto de la materia carbonosa en la recuperación de especies minerales de valor en una flotación plomo-zinc.

Las variables independientes seleccionadas definir los compositos (UGM) para realizar el análisis estadístico por su efecto en el resultado metalúrgico fueron el contenido de calcita, el grado de alteración y el contenido de materia carbonosa (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros correspondientes a las variables geológicas y su distribución en los compositos (UGM) (Tomado de García-Sánchez, 2022).

Compósito	% CaCO ₃	(%) min. alteración	% Corg
1	21.14	25	0.34
2	19.15	37.5	0.27
3	16.91	50	0.19
4	13.93	62.5	0.12
5	12.18	75	0.04

La primera correlación realizada fue del contenido de calcita contra el tiempo calculado en la cinética de molienda, la cual tiene una relación inversa entre variables con un valor de -6.61, es decir, entre mayor sea el contenido de carbonato de calcio en la roca, menor será el tiempo de molienda. Estas variables tuvieron un coeficiente de correlación lineal de -0.985, lo cual se considera una alta correlación, permitiendo realizar un modelo matemático a partir de una regresión lineal (Figura 9).

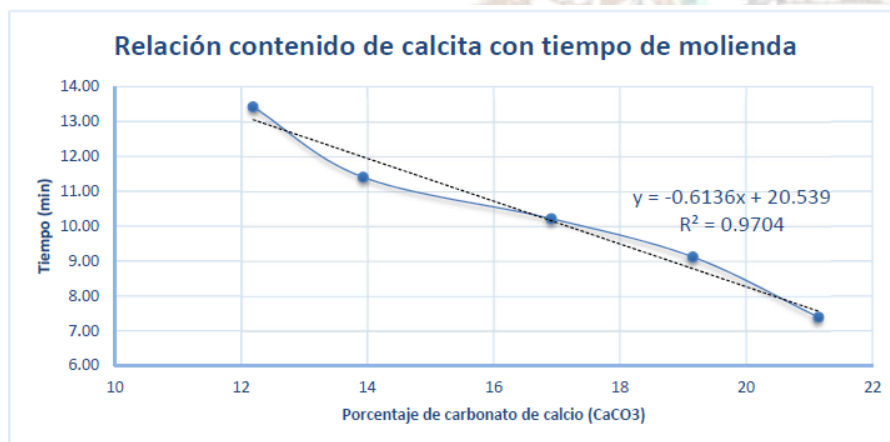


Figura 9. Relación de porcentaje de carbonato de calcio respecto al tiempo de molienda (Tomado de García-Sánchez, 2022).

Se obtuvo una relación directa de la recuperación de plomo con el contenido de minerales de alteración e inversa respecto al contenido de carbono orgánico (Figura 10 y 11). Esta relación inversa entre los parámetros geológicos es de esperarse debido a que el contenido de carbón en un yacimiento es eliminado durante los procesos de alteración hidrotermal. De acuerdo con los resultados se generaron dos modelos matemáticos de correlación lineal múltiple, para determinar la recuperación de plomo a partir del porcentaje de minerales de alteración y el porcentaje de materia carbonosa presente en la muestra.

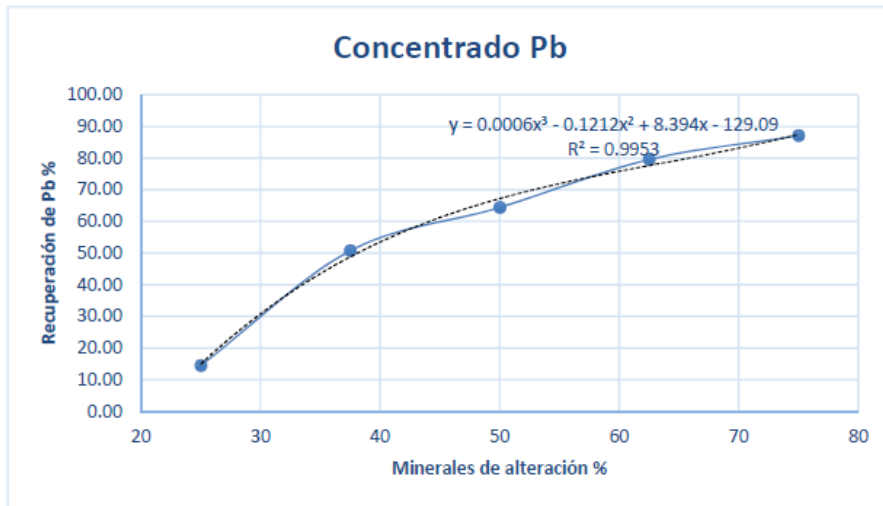


Figura 10. Gráfica de recuperación de plomo en función del porcentaje de minerales de alteración en la flotación plomo-zinc (Tomado de García-Sánchez, 2022).

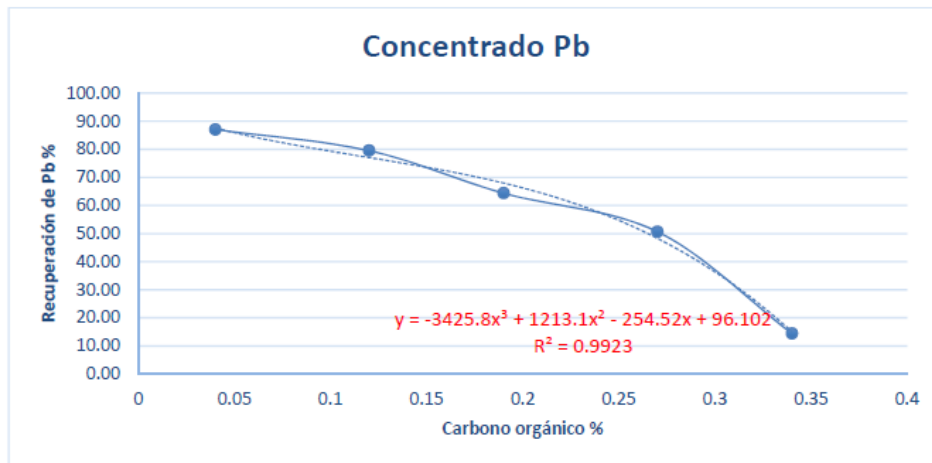


Figura 11. Gráfica de recuperación de plomo en función del contenido del porcentaje de carbono orgánico en la flotación plomo-zinc.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los estudios analizados se puede concluir que los principales atributos a considerar para la definición de unidades geometalúrgicas que permitan correlacionar la información para la predicción de la recuperación del metal o mineral de interés son la litología, el tipo de roca, la textura mineral, tipo de intercrecimiento, tamaño de partícula, contenido de materia carbonosa y mineralogía.

Los atributos geológicos o mineralógicos afectan directamente en la etapa de molienda tanto en el consumo de energía, como en el grado de liberación alcanzado; en la interacción entre reactivos y minerales en los procesos de flotación y lixiviación ya que pueden incrementar el consumo de reactivos y reducir la recuperación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a la Maestra María del Carmen Ojeda Escamilla y al Dr. Juan Luis Reyes Bahena por la dirección y contribución de conocimientos en cada uno de los trabajos con enfoque geometalúrgico que se desarrollaron en el Instituto de Metalurgia. También se agradece el apoyo del MIMM. José Manuel Gutiérrez y del MIM. Francisco Galindo Murillo (Lab de procesamiento y MEB), LQ. Izanami López (AA) y MIM. Rosa Lina Tovar (DRX).

REFERENCIAS

- Alfaro E. (2009). La geometalurgia: prospectiva en minería y formación académica de especialistas, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Aragón Escoto, C.G. (2018). Correlación empírica del grado/recuperación en función del tamaño y textura mineral de las partículas de cobre. Tesis maestría, Instituto de Metalurgia UASLP.
- Bulled, D., McInnes, C. (2005). Flotation plant design and production planning through geometallurgical modeling. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, Publication Series, 809–814.
- García-Garnica, R. (2016). Características del tipo de roca relacionadas a la recuperación de cobre por el proceso de lixiviación. Tesis maestría, Instituto de Metalurgia UASLP.
- García-Sánchez, G.D. (2022). Correlación del efecto de la materia carbonosa en la recuperación metalúrgica de plomo-zinc y subordinados, para una mena diseminada de un yacimiento tipo stockwork en función del impacto hidrotermal. Tesis maestría, Instituto de Metalurgia UASLP.
- Parian, M., Lamberg, P., Möckel, R., Rosenkranz, J. (2015). Analysis of mineral grades for geometallurgy: Combined element-to-mineral conversion and quantitative X-ray diffraction. *Minerals Engineering*, 82, 25-35
- Williams, ST. (2013). A Historical Perspective of the Application and Success of Geometallurgical Methodologies. *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 10, 37-49.