

Modelos Metalúrgicos para Geometalurgia de Sulfuros

Miguel Becerra
Teck



VISION

1 Hacia donde debería ir el desarrollo de modelos metalúrgicos para geometalurgia?



CONMINUCIÓN

2 Revisión de los principales modelos empleados (y disponibles) en la industria.



FLOTACIÓN

3 Discusión sobre las distintas aproximaciones empleadas en esta área.



MODELOS INTEGRADOS

4 Que modelos adicionales deberían ser incorporados? Que herramientas tenemos disponibles hoy?

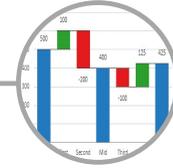
Hacia donde debería
ir el desarrollo de
modelos
(geo)metalúrgicos?



Variabilidad y Potencial

Vision:

Los modelos metalurgicos deben ser flexibles y estar conectados, de manera simple



TRONADURA

CONMINUCIÓN

FLOTACIÓN

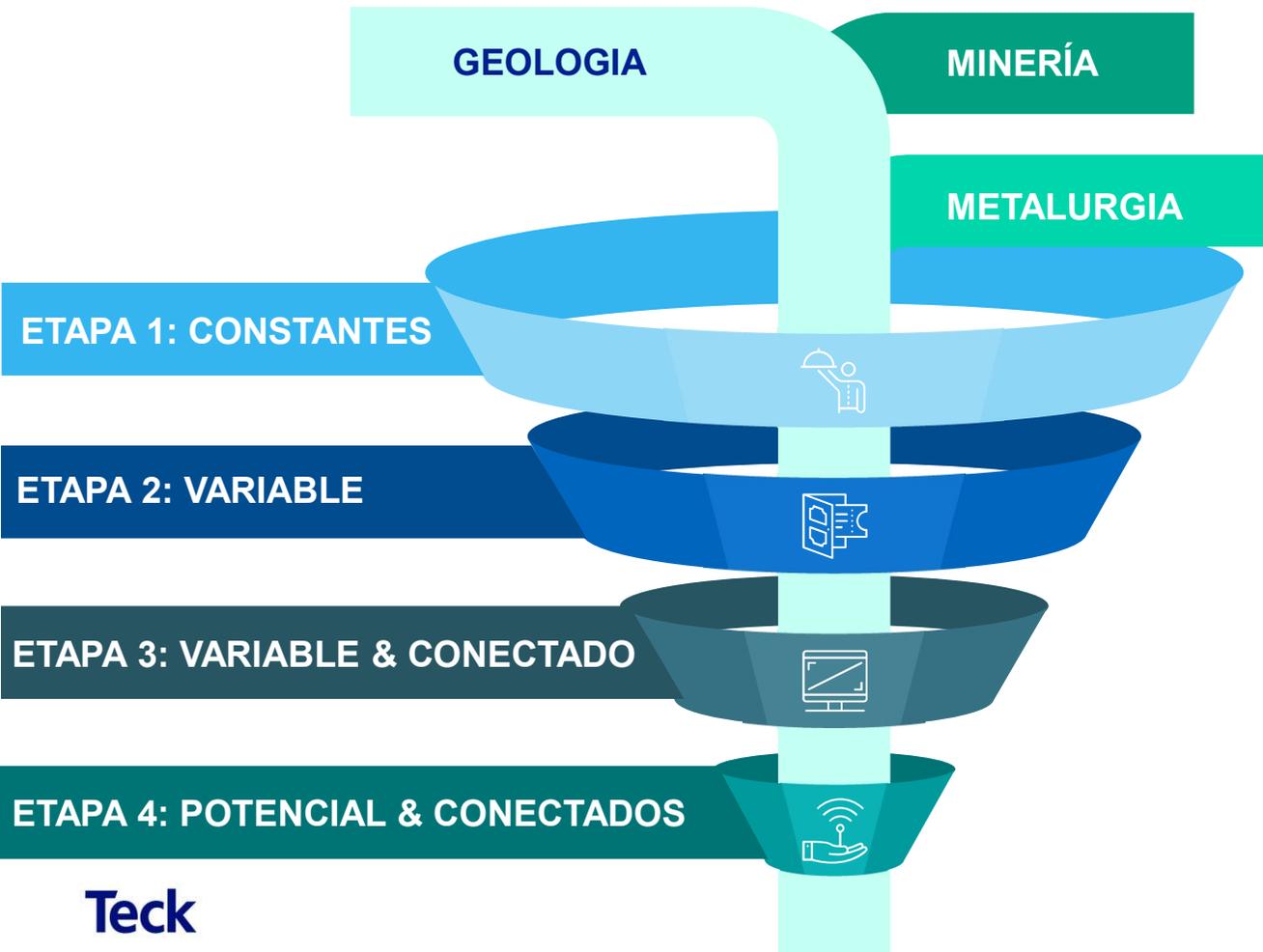
**CONTROL
& MONITOREO**

RECONCILIACIÓN



Vision:

Los modelos metalurgicos deben ser flexibles y estar conectados, de manera simple



RUTA DE MODELOS (GEO)METALÚRGICOS

- Definición de un rendimiento y recuperación, fijos y por dominios geológicos
- Incorporando muestras, capturando variabilidad a través de los modelos
- Métodos de interpolación
- Refinando los modelos metalúrgicos que permita conectarlos
- Los modelos desarrollados deben dar cuenta del **potencial del mineral**

Revisión de modelos de Conminución

Teck



Modelos para conminución

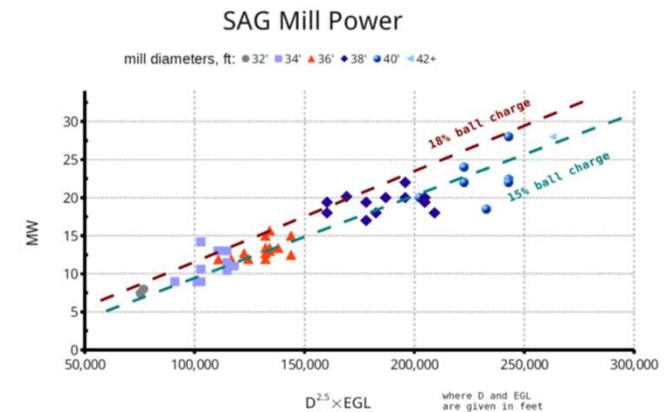
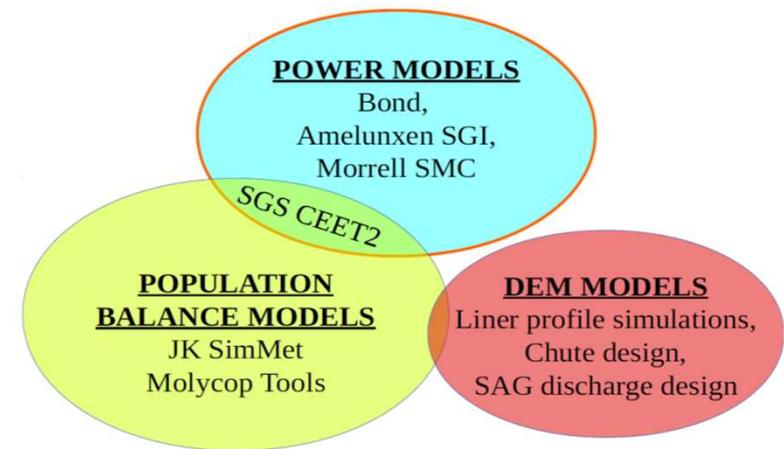
Uso de modelos apropiados para proyectos, operación y análisis de resultados (*)

BOND – BARRATT – MORRELL – AME – IGS...

- Modelos tipo “Power Based” son bastante flexibles y fáciles de utilizar en geometalurgia
- Incorporan parámetros de dureza ampliamente reconocidos y utilizados
- Estimación de rendimiento basada en consumo específico de energía
- Es necesario definir un consumo de potencia o emplear alguna ecuación para ello

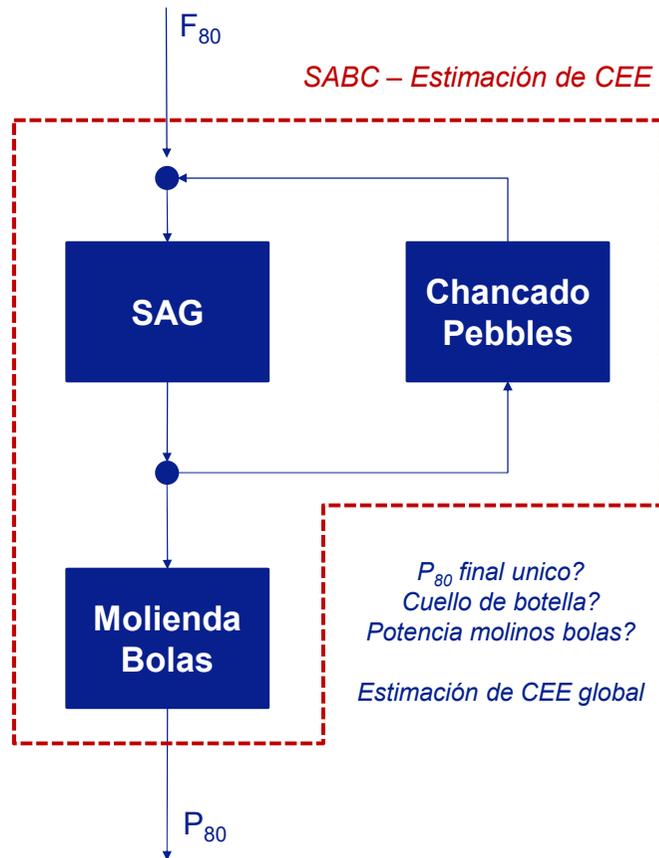
JKSIMMET – MOLYCOP (J-TOOLS) – USIMPAC – IES...

- Modelos tipo “Population Balance” son más complejos de utilizar y programar pero entregan mayor detalle del proceso
- Pueden incorporar parámetros de dureza desarrollados en laboratorio
- Requieren un mayor grado de experiencia en su uso
- Es posible utilizar aproximaciones empíricas y “customizadas” (o híbridos) para una operación en específico



Ejemplo: Modelo Morrell

Estimación de CEE global



$$W_i = M_i 4 \left(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)} \right)$$

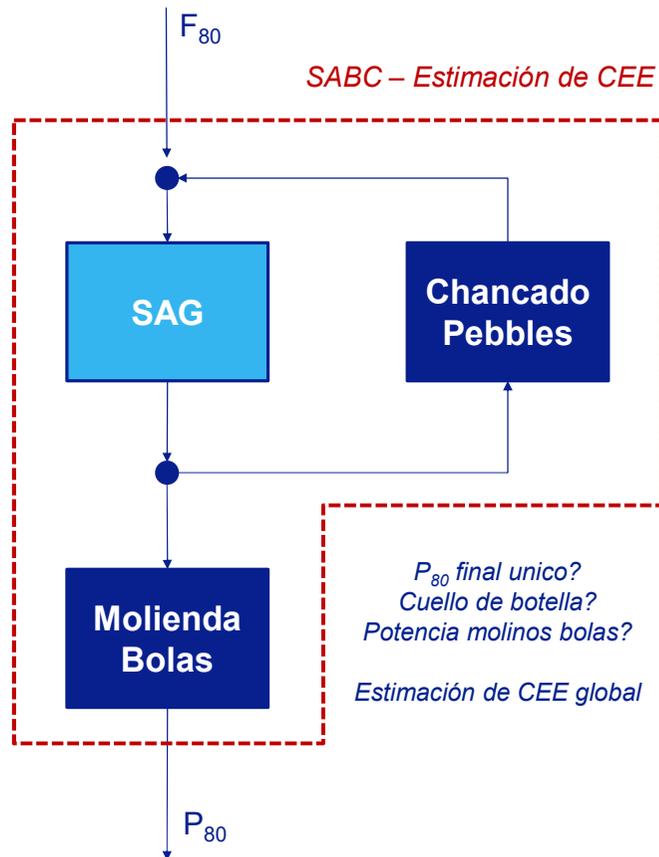
$$f(x_j) = - \left(0,295 + \frac{x_j}{1 \times 10^6} \right)$$

$$W_t = W_a + W_b + W_c + W_s$$

Donde:	
W_i :	Consumo de energía específico, kWh/t
M_i :	Indice de trabajo relacionado con las propiedades de fractura del mineral, kWh/t
x_1 :	80% pasante acumulado en la alimentación, μm
x_2 :	80% pasante acumulado en el producto, μm
W_t :	Consumo de energía específico global, kWh/t
W_a :	Consumo de energía específico para tamaños gruesos en molinos rotatorios, kWh/t
W_b :	Consumo de energía específico para tamaños finos en molinos rotatorios, kWh/t
W_c :	Consumo de energía específico de chancado convencional, kWh/t
W_s :	Factor de corrección por distribución granulométrica

Ejemplo: Modelo Morrell

Estimación de CEE molienda SAG



$$W_{SAG} = f_1 DWi^{f_2} (-1,5'' FF)^{f_3} \left(\frac{rpm}{rpm_{base}} \right)^{f_4} \left(\frac{c_p}{c_p base} \right)^{f_5} \left(\frac{J_B}{J_B base} \right)^{f_6}$$

$$P_{SAG} = f(DWi, -1,5'' FF, rpm, c_p, J_B)$$

Where	
W_{SAG} :	Consumo de energía específico de molienda SAG, kWh/t
P_{SAG} :	Consumo de potencia molienda SAG, kW
DWi:	Drop Weight Index (SMC), kWh/m ³
-1,5'' FF:	Porcentaje pasante 1,5" en la alimentación fresca, %
rpm:	Velocidad de giro del molino
c_p :	Porcentaje de sólidos en la alimentación neta al molino, %
J_B :	Nivel de llenado de bolas, %
f_1 to f_6 :	Constantes

Estimación de recuperación y ley de concentrado

Teck



Modelos para flotación

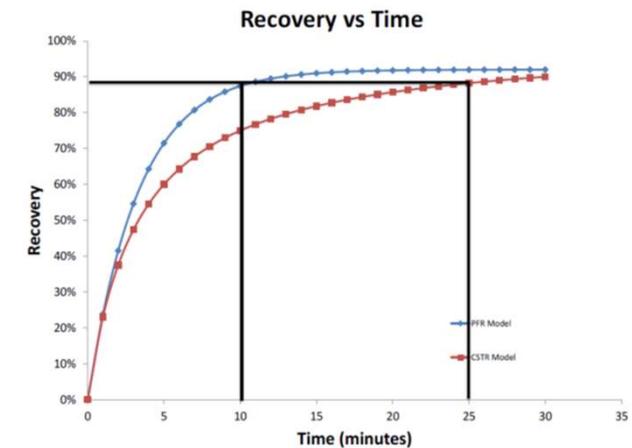
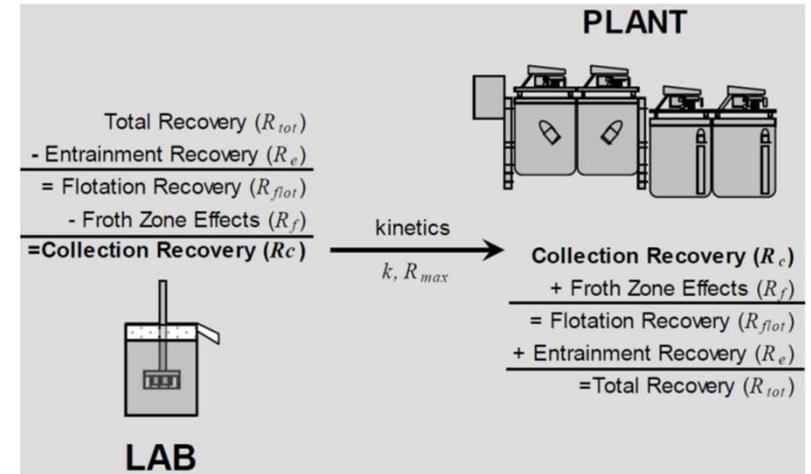
Basados fuertemente en respuesta a escala de laboratorio (*)

TIEMPO FIJO – RELACIONES CON LEYES - MINERALOGÍA...

- Cantidad de información y etapa de proyecto/operación
- Sólo para Cu?
- Recuperación única o relaciones con leyes no permiten evaluar influencia de granulometría de alimentación o tiempo de residencia, por ejemplo
- Es necesario definir factor de escala asociado al tiempo industrial de flotación
- No indica el potencial del mineral

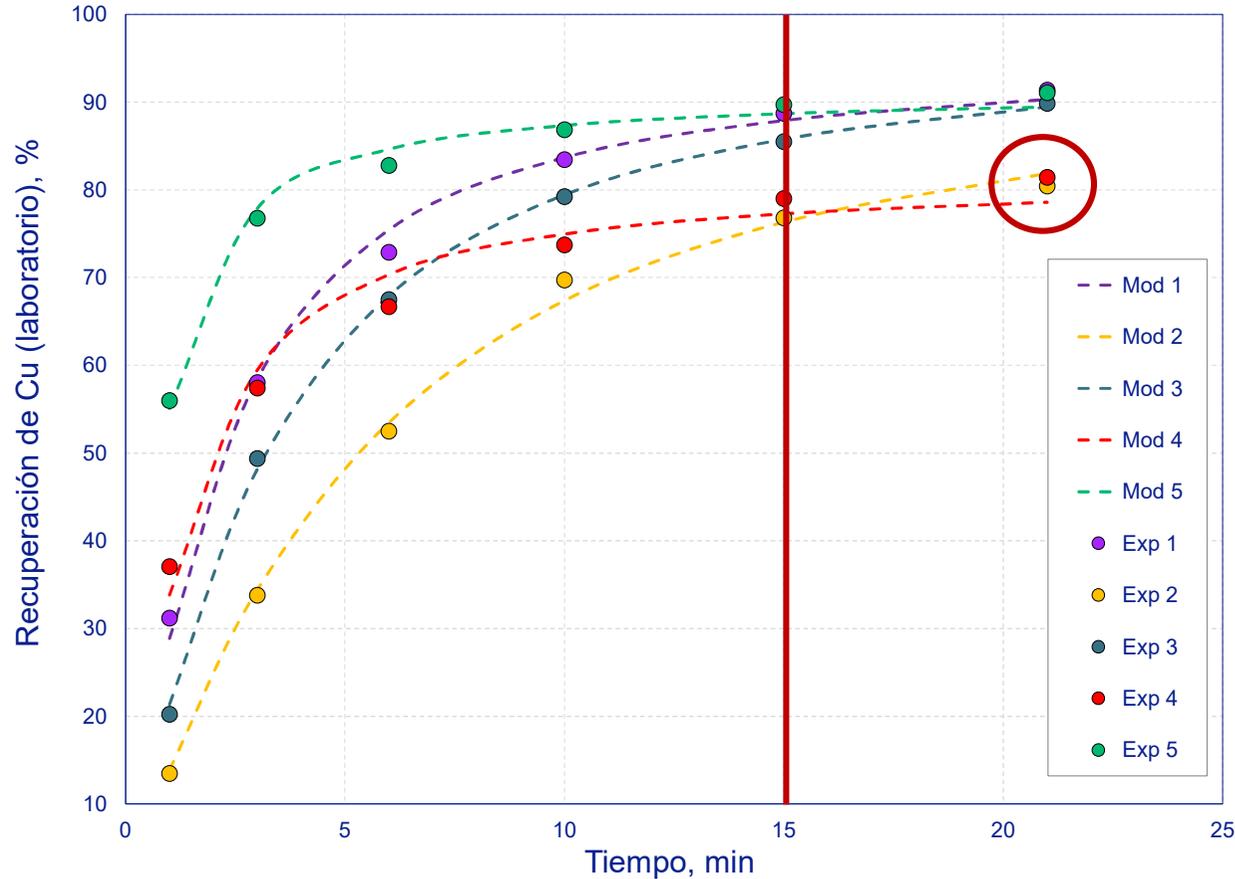
CINÉTICOS CLÁSICOS – COMPARTAMENTALES...

- Permiten conocer el potencial del mineral
- Ofrecen flexibilidad para la evaluación de impacto de tiempo de residencia
- Es posible crear superficies de respuesta
- Modelos compartamentales son más complejos de interpretar y contienen más parámetros
- Es posible utilizar una aproximación compartamental con objetivos geometalúrgicos y de optimización



Ejemplo: Modelo cinético

Estimación de parámetros cinéticos y potencial de recuperación



$$R(t) = R_{\infty} \left(1 - \frac{1}{kt} (1 - e^{-kt}) \right)$$

Where	
R(t):	Masa o metal recuperado en el tiempo t, %
R _∞ :	Máxima recuperación a tiempo infinito, %
k:	Constante cinética, 1/tiempo
t:	tiempo

Test	R _∞ , %	k, 1/min
Exp 1	96,34	0,76
Exp 2	96,15	0,32
Exp 3	98,67	0,51
Exp 4	81,88	1,18
Exp 5	91,38	2,26

“ From all kinetic models listed....., the classical first-order kinetic model is the best model and can be utilized to optimize the flotation process as it suits to both batch and continuous flotation processes with high confidence levels” (*)

Ejemplo: Modelo cinético

Impacto granulometría de alimentación a flotación Rougher (*)

$$R(t)_{P_{801}} = R_{\infty P_{801}} \left(1 - \frac{1}{k_{P_{801}} t} (1 - e^{-k_{P_{801}} t}) \right)$$

$$R(t)_{P_{802}} = R_{\infty P_{802}} \left(1 - \frac{1}{k_{P_{802}} t} (1 - e^{-k_{P_{802}} t}) \right)$$

$$R(t)_{P_{803}} = R_{\infty P_{803}} \left(1 - \frac{1}{k_{P_{803}} t} (1 - e^{-k_{P_{803}} t}) \right)$$

$$R(t)_{P_{804}} = R_{\infty P_{804}} \left(1 - \frac{1}{k_{P_{804}} t} (1 - e^{-k_{P_{804}} t}) \right)$$

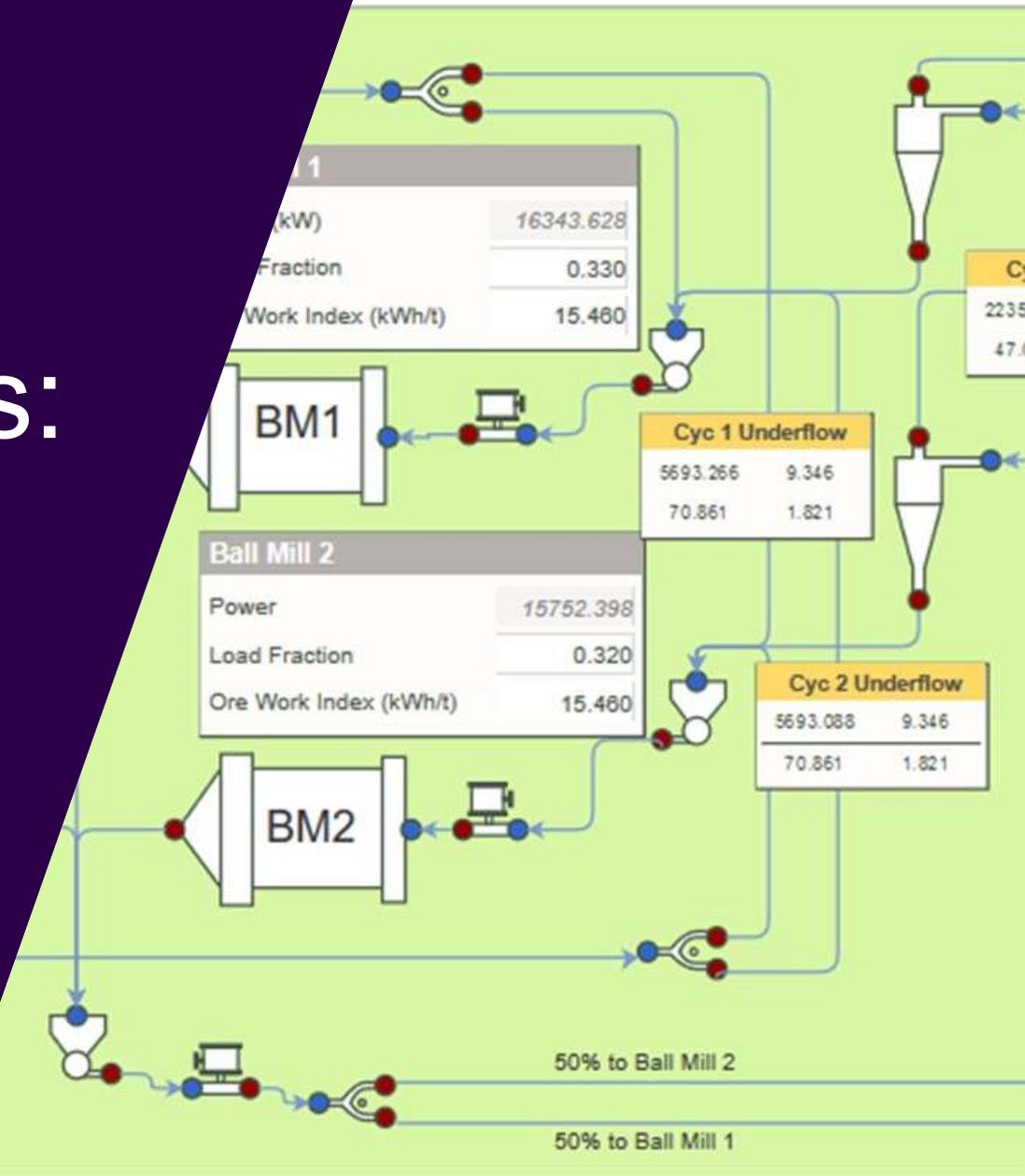
$$R = f(R_{base}, P_{80}, pH, t/h)$$

$$R, k = f(Ley, P_{80}, pH, c_p, \dots)$$

Parámetros de diseño, R_{froth} , R_{Ent}

Superficie de operación para la recuperación (de la especie valiosa, en peso, Rougher y/o Cleaner)

Modelos integrados: IES



Que es IES?

Integrated Extractor Simulator, desarrollado por CRC Ore & JKMRC



INTEGRACION

Capaz de integrar la cadena completa de producción, desde tronadura hasta flotación.

WEB BASED

Software diseñado y basado en la web sin necesidad de instalar en PC. Accesible desde cualquier computador solo con user/password.

SIMULACIONES MASIVAS

Desarrollo de millones de simulaciones en horas, incluyendo un optimizador en línea, análisis de sensibilidad y la creación de expresiones específicas para análisis.

“CAJA ABIERTA”

Caja abierta para los patrocinadores y además es posible de incorporar y customizar sus propios modelos.

CRC ORE

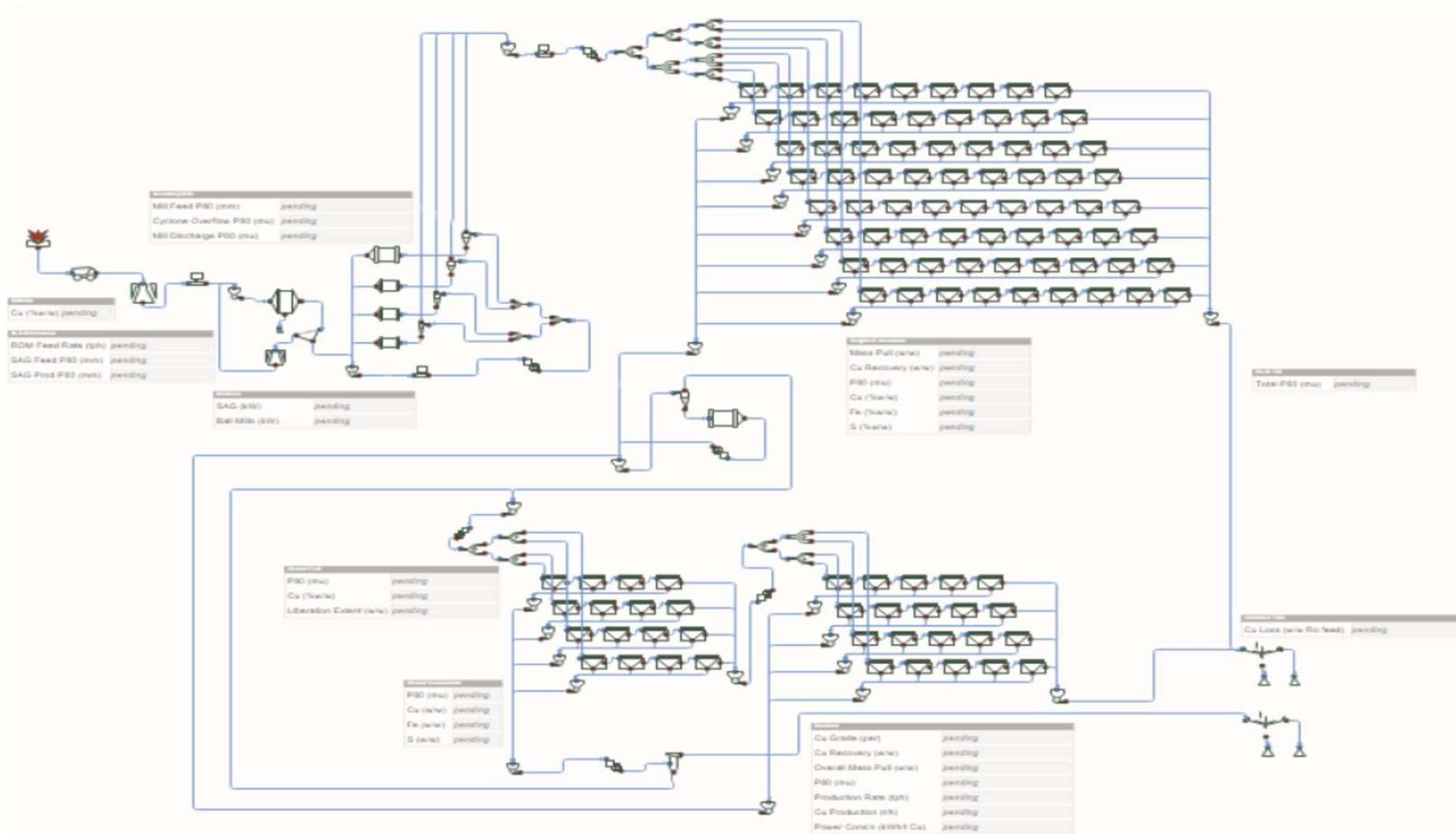
SMI JKMRC
Julius Kruttschnitt Mineral
Research Centre



Teck

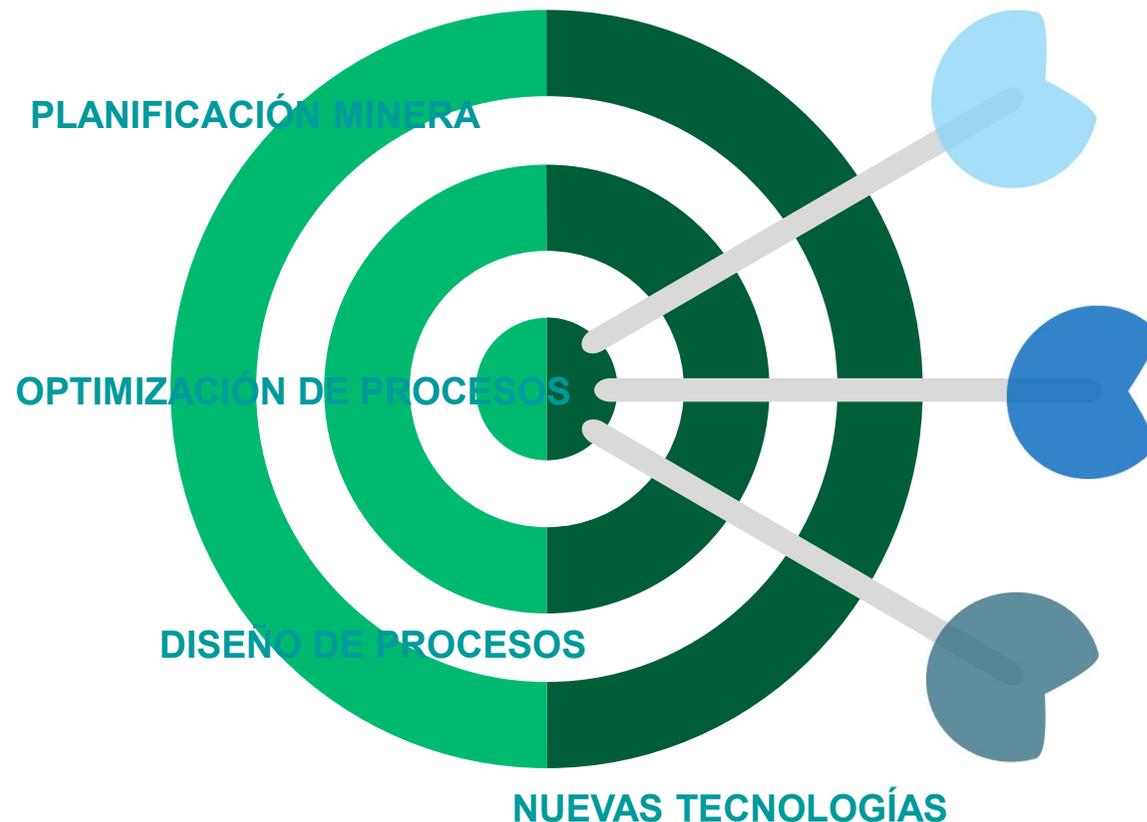
Desarrollo de fowsheet

Balance de masa, ajuste de parámetros y simulación (*)



Comentarios finales

Modelos geometalurgicos deben capturar variabilidad e identificar potencial



SIMPLICIDAD

Mantener los modelos metalúrgicos para geometalurgia lo más simple posible y tan complejos como lo requiera el proceso.

BASADOS EN INFORMACIÓN

Mantener y actualizar bases de datos históricas, de otras faenas y/o proyectos es fundamental para madurar el entendimiento y además comparar.

CONECTADOS!

Tener modelos aislados, sin conexión, no podrá soportar los requerimientos cada vez más exigentes de las operaciones actuales.