



*Estimación Modelo de Recursos
Rajo Inca
Metodología Material Quebrado
División Salvador*

Vicepresidencia de Proyectos
Proyecto Rajo Inca

Junio 2019



Agenda

1

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2

MODELO INTEGRADO

3

METODOLOGÍA MATERIAL QUEBRADO



1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Ubicación del Proyecto





División Salvador



Ubicación

Comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama (2.600 metros sobre el nivel del mar).



Operación

Desde 1959.



Trabajadores

1.700 trabajadores propios y 3.100 contratistas.



Tipo de explotación

Minería subterránea (70%) y tres pequeños rajos (30%).



Producción

62 kt métricas de cobre fino (a 2017²)
Productos: Cátodos electrorrefinados y electroobtenidos.



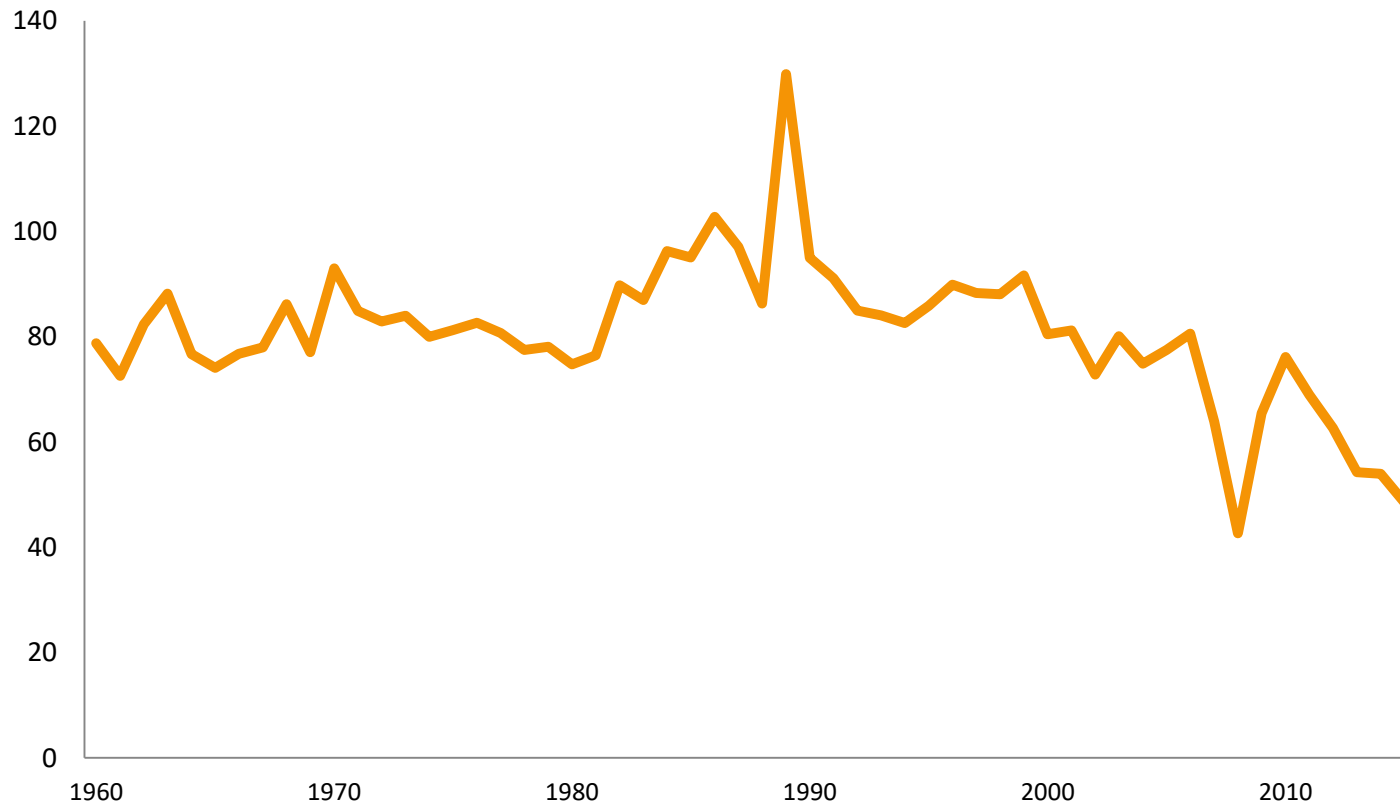
Proveedores

62 proveedores con negocios vigentes en la Región de Atacama (a 2016³).



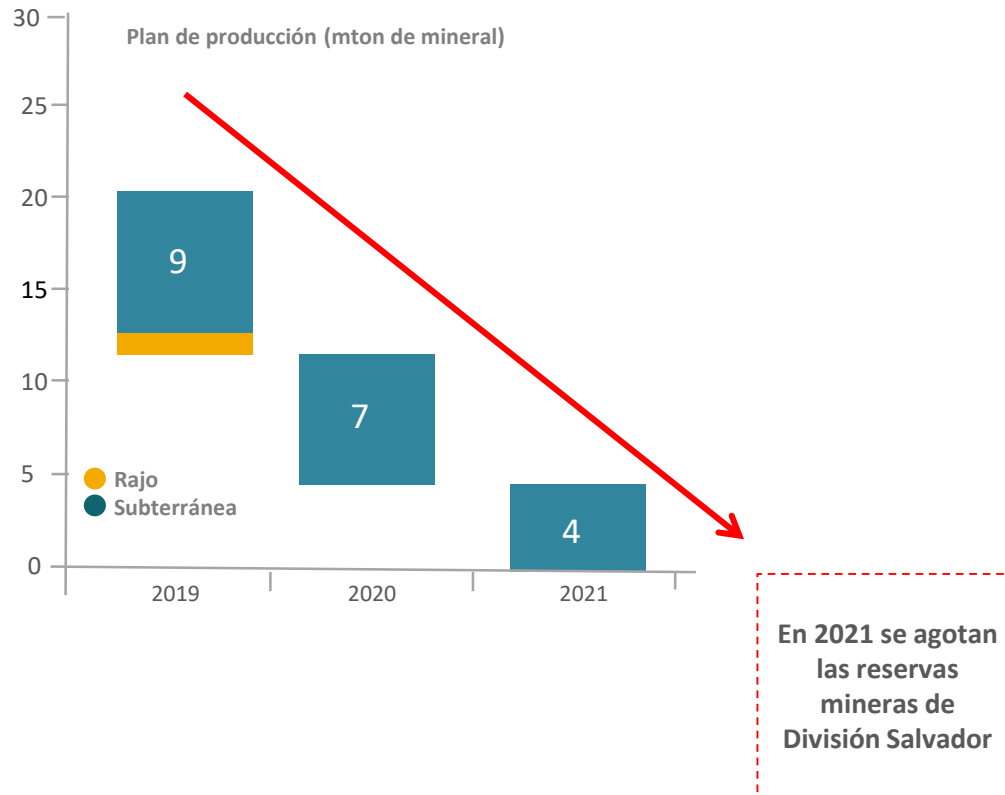
La división Salvador ha aportado a Codelco más de 4 millones de ton de cobre fino en los últimos 50 años

**Producción anual
Cu fino (kt)**





El agotamiento de las actuales reservas mineras implica el cierre de la división



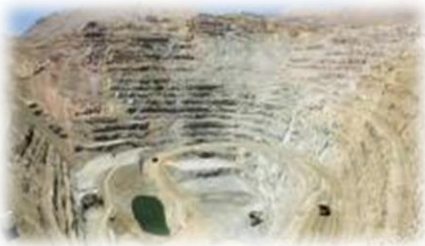
**Rajo Inca es un
proyecto urgente**
cumpliendo los estándares
Corporativos

Evolución Proyecto Rajo Inca





El proyecto considera una nueva mina rajo junto a las plantas existentes



Mina con **altos movimientos de material** y buenas leyes de alimentación cercanas a **0,7% CuT** los primeros 20 años. La disponibilidad de reservas mineras asegura una vida útil de 40 años



La concentradora optimiza su capacidad de **tratamiento a 37 ktpd** basado en una menor dureza de mineral, además de realizar un **overhaul** a la planta existente e incorporación de **nuevos estándares de flotación**.



La explotación de sulfuros despeja **minerales oxidados y mixtos** que son beneficiados en las actuales instalaciones



El proyecto genera **concentrados limpios** permitiendo su comercialización a través del **Puerto de Barquitos y/o Potrerillos**

Objetivo del Proyecto



QUÉ QUEREMOS

- Prolongar por **43 años la vida útil** de la División Salvador
- **Aumentar la capacidad de procesamiento** actual.



CÓMO LO HAREMOS

- Cambiando el método productivo, pasando a **minería de rajo abierto**
- Con **mejoras y optimizaciones** a nuestras instalaciones actuales (optimización de la planta concentradora y mejoras del sistema de conducción de relaves al depósito, entre otras).



QUÉ OBTENDREMOS

50% de aumento de producción

- 245 kton/año de concentrado de cobre
 - 25 ktCuf/año de cátodos de cobre
 - 2.200 ton/año de molibdeno
- (Producción media anual)



INVERSIÓN ESTIMADA

Para la ejecución de las obras y actividades del Proyecto la inversión será de aproximadamente **US\$ 1.000 millones**.



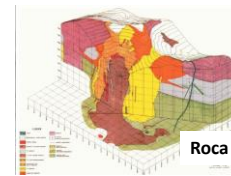
2. MODELO INTEGRADO

Evolución de la Información

EL SALVADOR

ESCUELA FORMADORA DEL CONOCIMIENTO – APRENDIZAJE Y BUENAS PRÁCTICAS

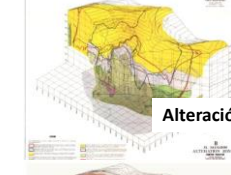
Modelamiento Geológico: El Salvador Definiciones y buenas prácticas (Gustafson y Hunt, 1975,



Roca



Zonación sulfuros



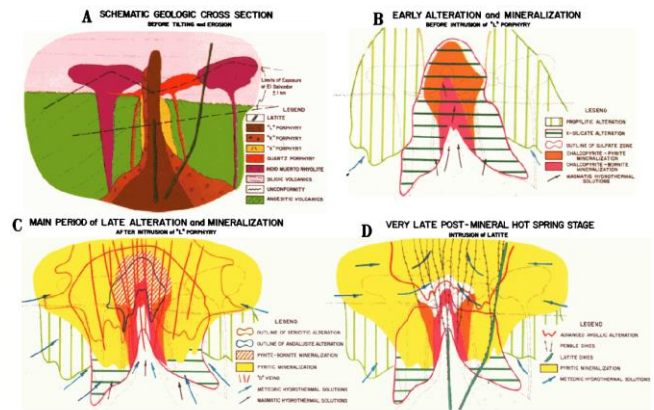
Alteración



Zonas supergenas



TALLER: "ESTIMACION DE RECURSOS MINERALES"
S. Rivera, Julio 4, 2015



El Salvador Genetic Model

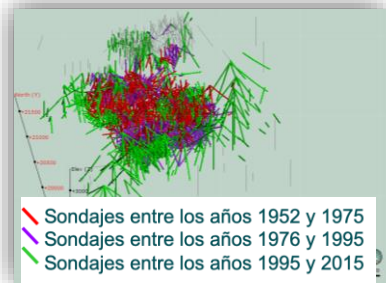
Evolución de la Información

DIFICULTADES Y DESAFIOS

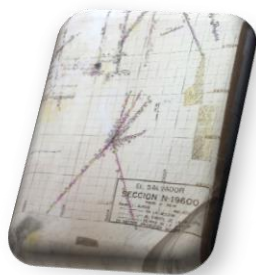
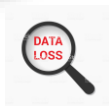
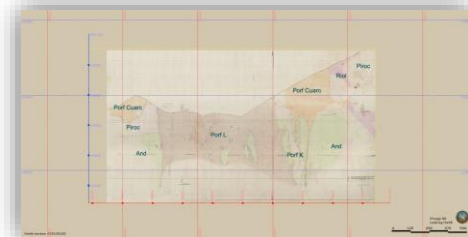
- Anuncio Cierre de Faena (2005) – Desánimo
- Yacimiento con alto nivel de reconocimiento (antiguo)
- Construido en base a interpretación de plantas y secciones
- Trazabilidad y pérdida de la Información (BD utilizada, secciones, sondeos)
- Clasificación y criterios de mapeo en tramos de sondeos
- QAQC de la información y leyes históricas



Evolución de la Información

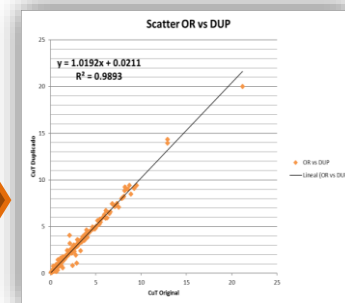


**EQUIPO DE TRABAJO
PARA ASEGURAR EL ÉXITO**



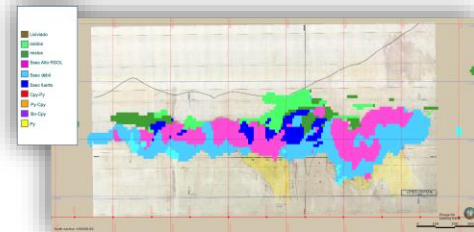
Información disponible LEYES

- Ag: 74.344 muestras, 275.279,8 mts.
- As: 62.683 muestras, 209.456,9 mts.
- Au: 71.992 muestras, 252.495,7 mts.
- Cu: 165.335 muestras, 429.033,7 mts.
- CuGr: 41.682 muestras, 160.765,7 mts.
- CuT: 174.583 muestras, 456.077,5 mts.
- Fe: 79.842 muestras, 283.038,5 mts.
- Mo: 111.236 muestras, 331.042,8 mts.



Información disponible LITOLOGIA

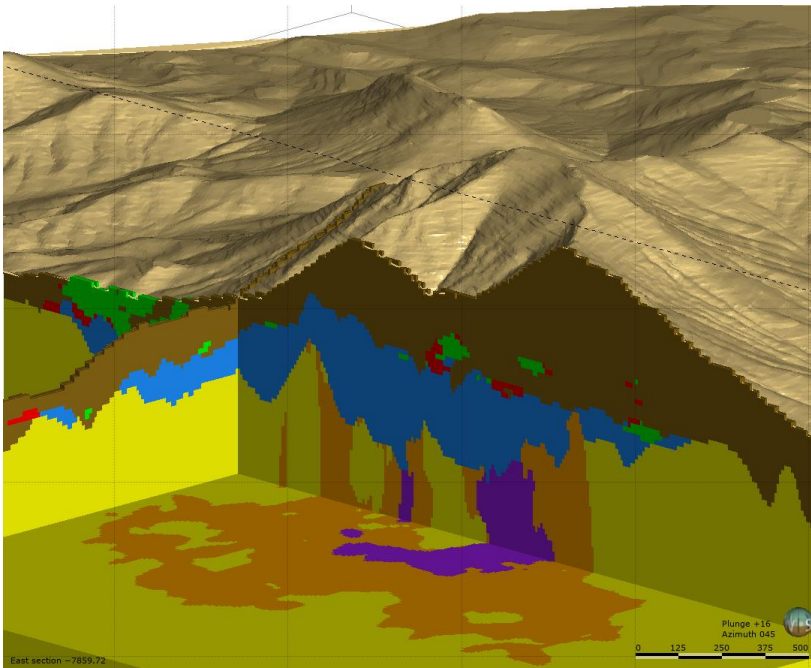
- Modelo de Bloques 2016
- Archivo: Litología.csv
- Secciones y plantas Data Mine
- 2 plantas Históricas (2.600, 2660)
- 27 secciones históricas EW: 19.350N a 20.300N
- En preparación (escaneando). Secciones históricas NS



MODELO INTEGRADO

RECONSTRUCCIÓN DE LA INFORMACIÓN (1959) MODELO IN-SITU

- Reconstrucción de la geológica previo a la explotación
 - Litología
 - Zona mineral
 - Alteración
- Estimación de Leyes al año 1959
 - CuT, CuS, Ag, Au, Mo, densidad, entre otras.



ALGORITMO DE MATERIAL QUEBRADO

- Recrear la explotación minera hasta el año 2021
 - Litología
 - Zona mineral
 - Alteración
- Estimación de Leyes al año 1959
 - CuT, CuS, Ag, Au, Mo, densidad, entre otras.

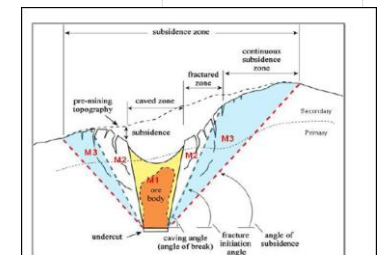
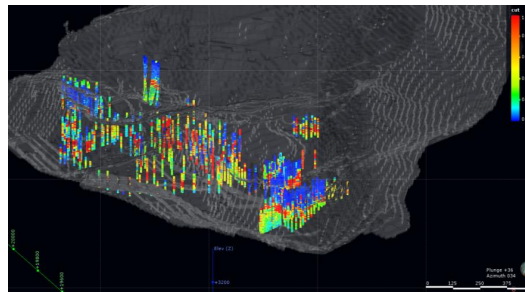
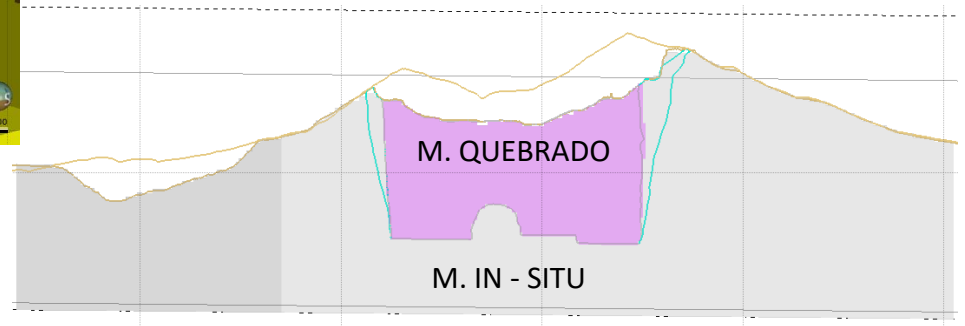
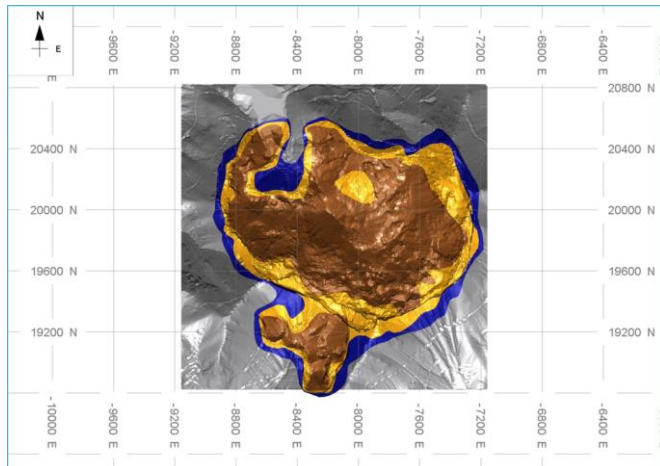
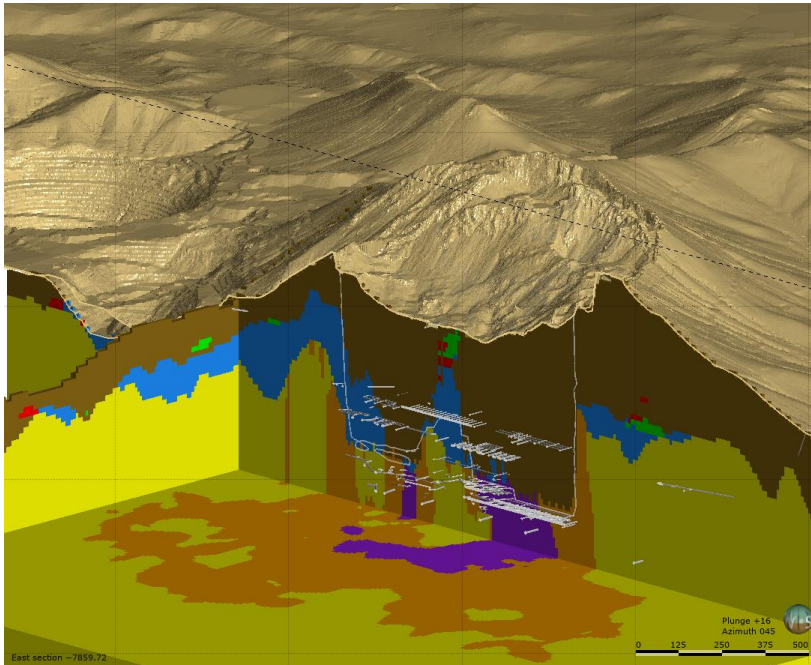
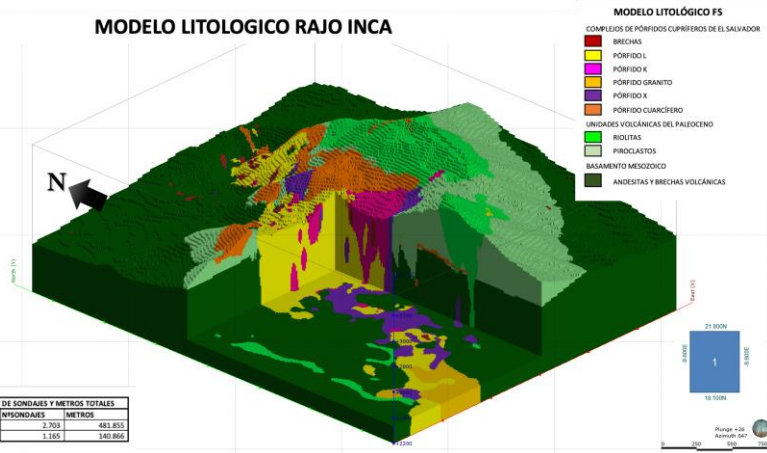


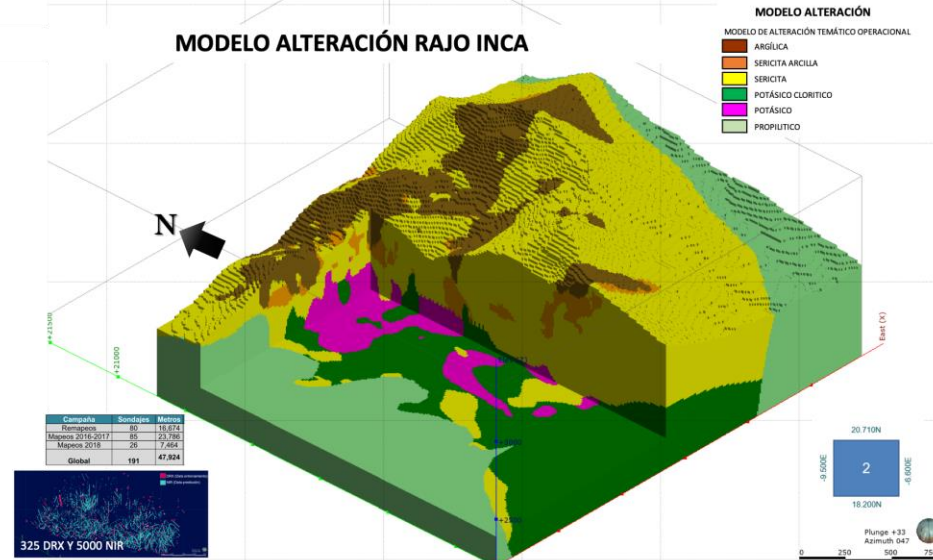
Figura 1. Modelo de subsidencia
(Fuente: Characterization and empirical analysis of block caving induced surface subsidence and macro deformations. Woo & Eberhardt 2009)

MODELOS GEOLOGICOS INTEGRADOS

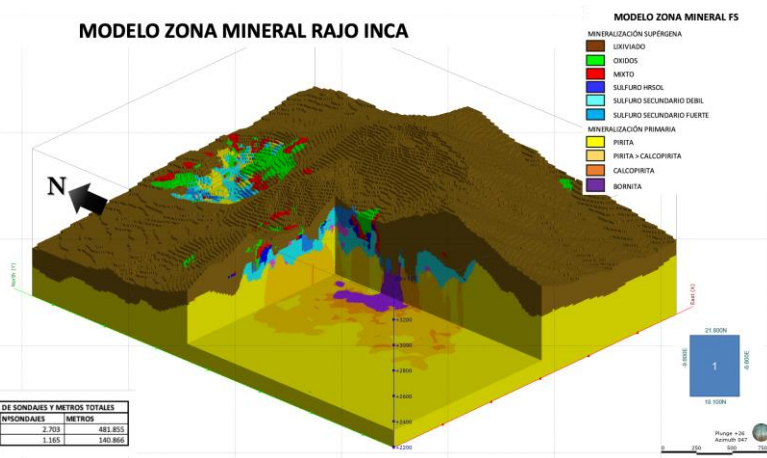
MODELO LITOLOGICO RAJO INCA



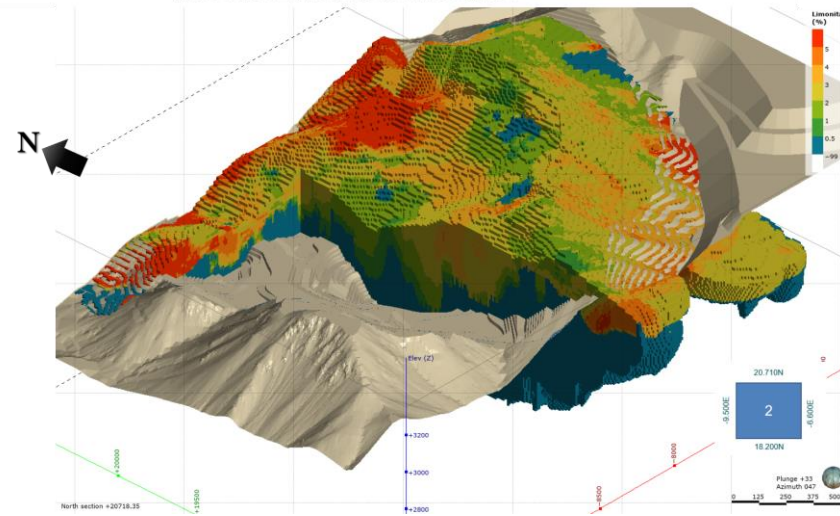
MODELO ALTERACIÓN RAJO INCA

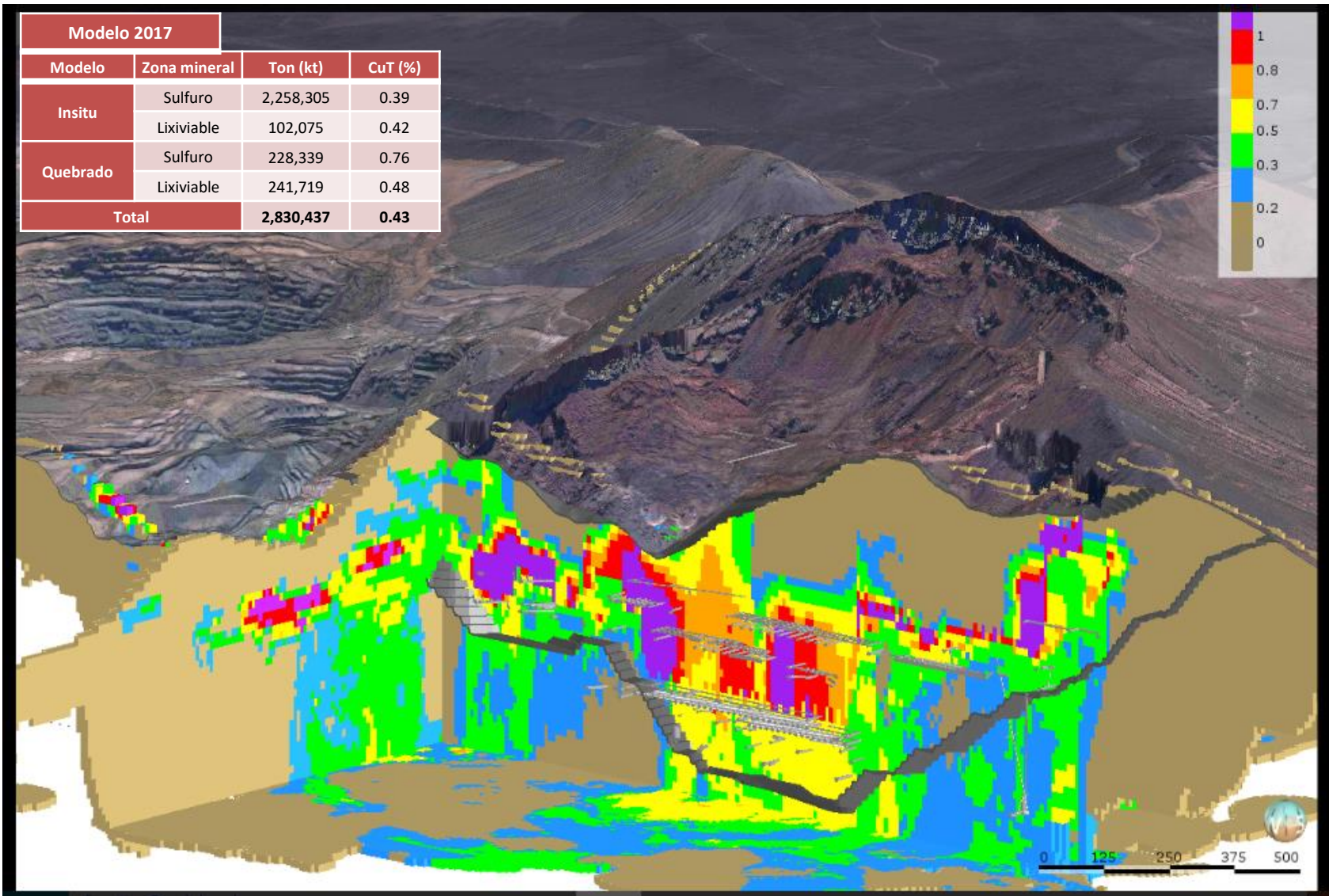


MODELO ZONA MINERAL RAJO INCA



MODELO LIMONITAS RAJO INCA







3. METODOLOGIA MATERIAL QUEBRADO



CONTENIDO

A MOTIVACIÓN DEL ALGORITMO DEL MQ

B INFORMACIÓN DE ENTRADA DEL MQ

C FLUJO METODOLOGIA

D VALIDACIONES

E RESULTADOS e INCERTIDUMBRE ASOCIADA



MOTIVACIÓN DESARROLLO ALGORITMO MQ



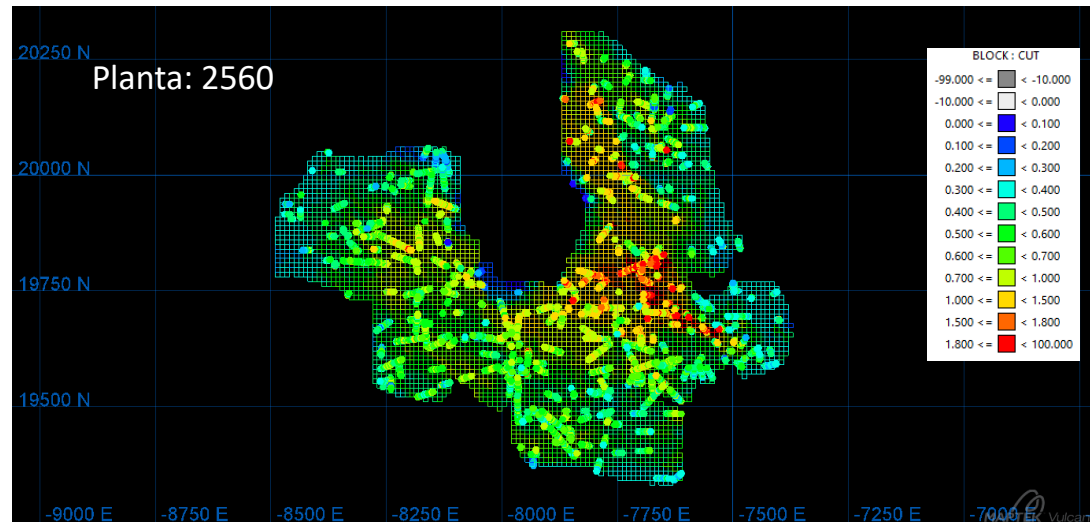
Motivaciones del Desarrollo del material quebrado

- Proceso de material quebrado usando Software cerrado
- Alto tiempo de computo para generación de material quebrado → resta dinamismo a ciclos de planificación y operación futura
- Disponibilidad de **información de producción anual histórica** e información de **puntos de extracción**.
- Disponibilidad de información de sondeos en el material quebrado **(18,000 registros)** no utilizados en modelos previos

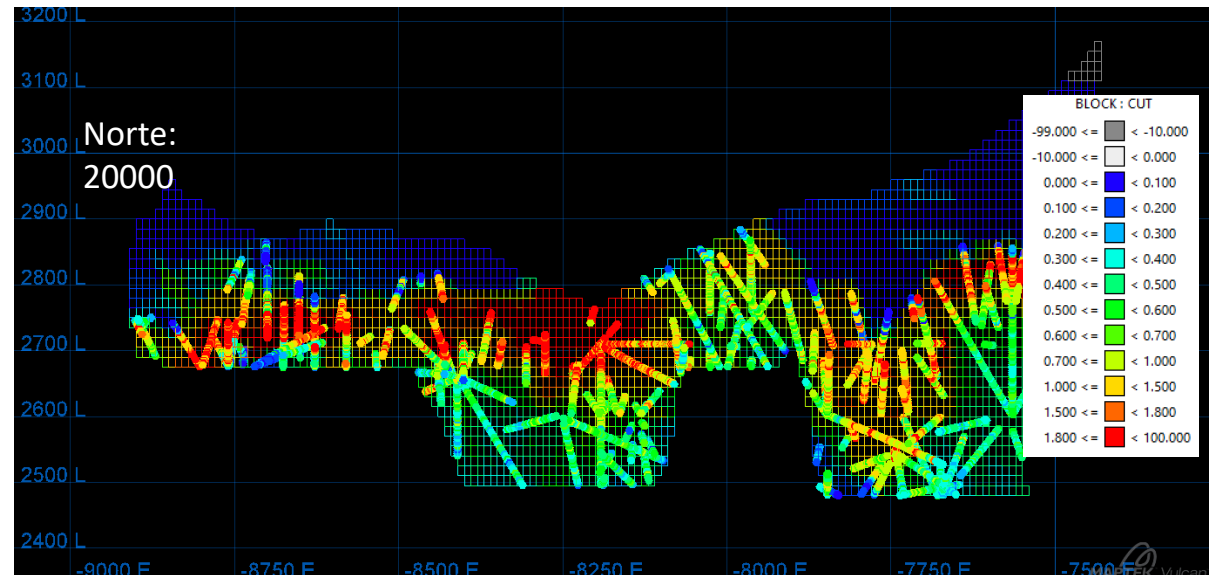


INFORMACION DE ENTRADA

Modelo de bloques insitu Leyes-
Geología-Geotencia



Modelo de bloques insitu Leyes-
Geología-Geotencia



*Modelo insitu en Volumen de quebrado basado en
87,000 tramos con análisis químicos equivalentes a 235,000
Metros de sondajes*

Información de entrada

Modelo de bloques insitu
Leyes-Geología-Geotencia

Calendario de extracción

Datos de puntos de extracción



Datos de producción histórica

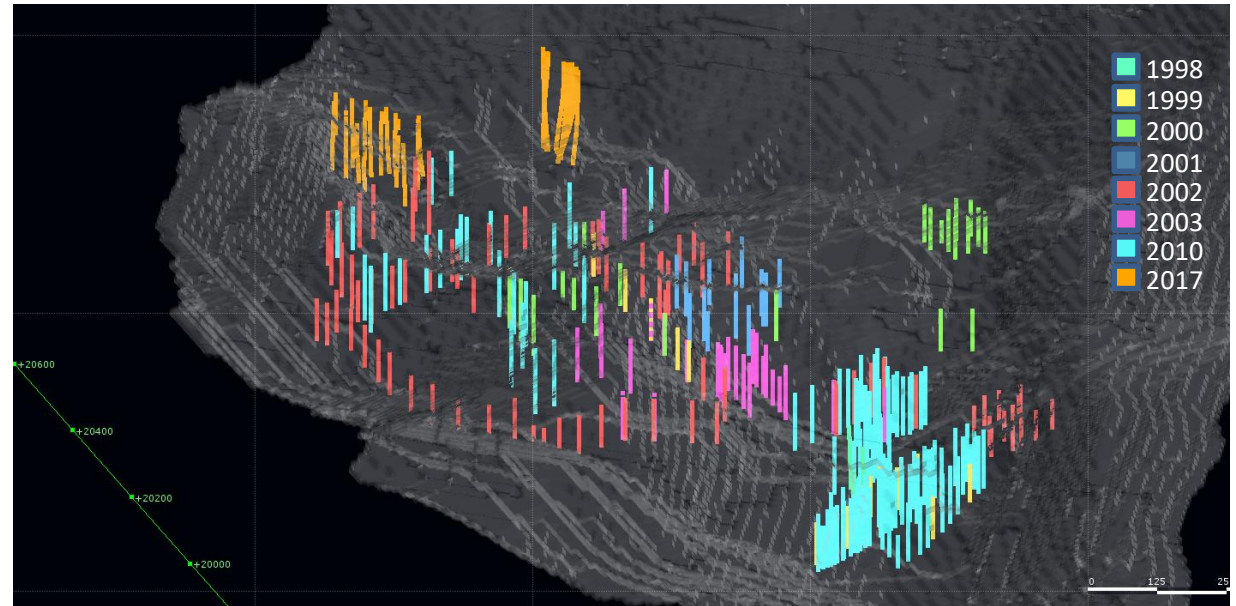
MINA									
ANO	MINA SUBTERANEA	RES ADJETIVO	TOTAL	TONELADAS TRABAJADAS	T/MT	EXTRACCION MENSUAL*	TASA FRECUENCIA ACT. TONELADAS	LEY COBRE	LEY PLATA
1980	8.722.779	-	8.722.779	646.332	13,5	1.950	37,68	1,00	
1981	9.049.610	-	9.049.610	605.325	15,0	2.074	43,30	1,10	
1982	11.854.012	-	11.854.012	583.941	20,3	2.052	43,00	1,05	
1983	12.174.490	-	12.174.490	601.209	20,3	2.028	39,73	0,99	
1984	12.519.176	-	12.519.176	569.312	22,0	1.945	38,81	1,05	
1985	12.872.349	-	12.872.349	554.606	23,2	1.906	32,37	1,004	
1986	13.104.875	-	13.104.875	371.138	23,0	1.871	33,71	0,974	
1987	12.795.820	-	12.795.820	543.497	23,6	1.839	38,87	0,9044	
1988	11.276.420	14.742	11.291.162	556.339	20,3	1.846	18,87		
1989	9.511.063	11.212.215	10.723.278	493.287	21,7	1.755	24,99		
* Promedio 12 meses									

ESTADÍSTICAS DE PRODUCCION									
C O B R E									
ANO	TONELADAS MINERAL	LEY CO. TOTAL	TONS. FINO EN CONCENTRADOS	TONS. COBRE CONCENTRADOS	TONELADAS CONCENTRADOS	LEY CO. TOTAL	TONS. FINO	TONS. COBRE	TONS. COBRE
1980	2.829.602	1,95	40.805	78.563	910	57,47	3,7	1,7	
1981	5.290.996	1,79	81.909	74.355	732	57,65	6.424	432,880	
1982	6.358.442	1,55	84.765	82.638	1.183	57,40	8.183	632,760	
1983	6.638.110	1,50	91.027	88.402	1.575	59,57	8.264	651,700	
1984	6.265.059	1,50	78.161	76.615	1.868	57,00	7.104	430,741	
1985	6.944.319	1,47	79.565	74.266	1.592	57,29	912	4.933	347,792
1986	7.349.336	1,40	80.172	78.149	1.580	57,52	914	5.085	359,924
1987	7.808.474	1,37	82.084	78.170	1.791	57,55	979	7.720	474,180
1988	8.627.308	1,35	89.567	85.356	2.303	57,04	1.332	1.806	122,588
1989	7.956.071	1,25	80.005	77.243	1.826	57,61	1.096	9.339	595,064
1990	7.969.896	1,46	80.005	77.243	2.077	57,24	1.191	9.606	491,498
1991	7.857.134	1,40	80.757	75.787	2.421	57,04	1.301	11.300	492,405
1992	8.133.975	1,23	82.050	79.787	2.332	56,78	1.324	11.756	622,824
1993	8.108.497	1,27	87.785	84.220	2.077	57,24	1.191	9.606	491,498
1994	8.532.729	1,17	83.979	80.278	2.421	57,04	1.301	11.300	492,405
1995	8.566.701	1,17	85.830	81.475	2.360	56,45	1.341	9.805	460,760
1996	8.611.253	1,15	84.723	82.588	2.616	56,06	1.405	9.975	423,779
1997	8.619.305	1,12	82.438	80.682	2.562	56,71	1.413	12.502	606,413
1998	8.534.457	1,12	80.550	79.682	2.141	54,65	1.225	11.854	348,055
1999	8.643.505	1,12	83.429	78.596	2.178	55,64	1.212	10.658	487,044
2000	8.722.779	1,08	77.199	76.542	2.333	55,90	1.335	12.832	448,056
2001	9.049.610	1,10	81.206	76.542	2.333	56,41	1.318	12.873	414,747
2002	11.854.012	1,05	95.540	89.521	3.097	56,16	1.739	11.746	559,000
2003	12.174.490	0,99	92.053	86.580	3.570	55,80	1.438	11.762	696,624
2004	12.519.176	1,03	104.712	96.342	2.458	56,12	1.379	12.993	780,212
2005	12.872.349	1,004	105.111	95.131	2.807	55,90	1.438	11.762	696,624

Modelo de bloques insitu
Leyes-Geología

Calendario de extracción

Datos de sondajes en
material quebrado



Modelo de bloques insitu
Leyes-Geología

Calendario de extracción

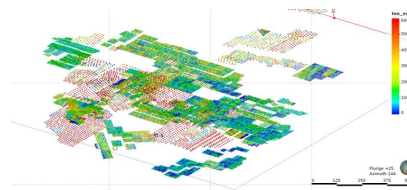
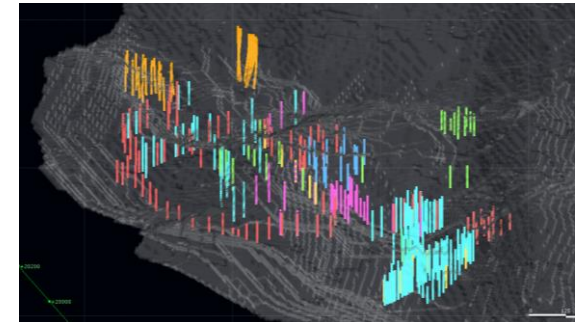
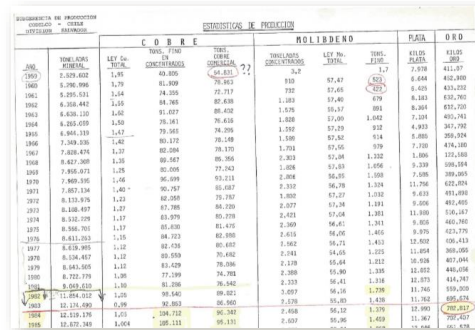
Datos de sondajes en
material quebrado

Campaña	Media CuT %	Número de tramos	Número sondajes	Metros totales
1998		205	3	410
1999		752	15	1,504
2000		1119	22	2,237
2001		805	14	1,610
2002		3977	78	7,954
2003		1720	29	3,440
2010		8024	113	16,048
2017		2143	24	4,286

18,000 tramos con análisis químicos equivalentes a 44,000 Metros de sondajes en el material quebrado

Calendario de extracción

Datos de sondajes en material quebrado





ALGORITMOS FUNDAMENTALES EN MQ

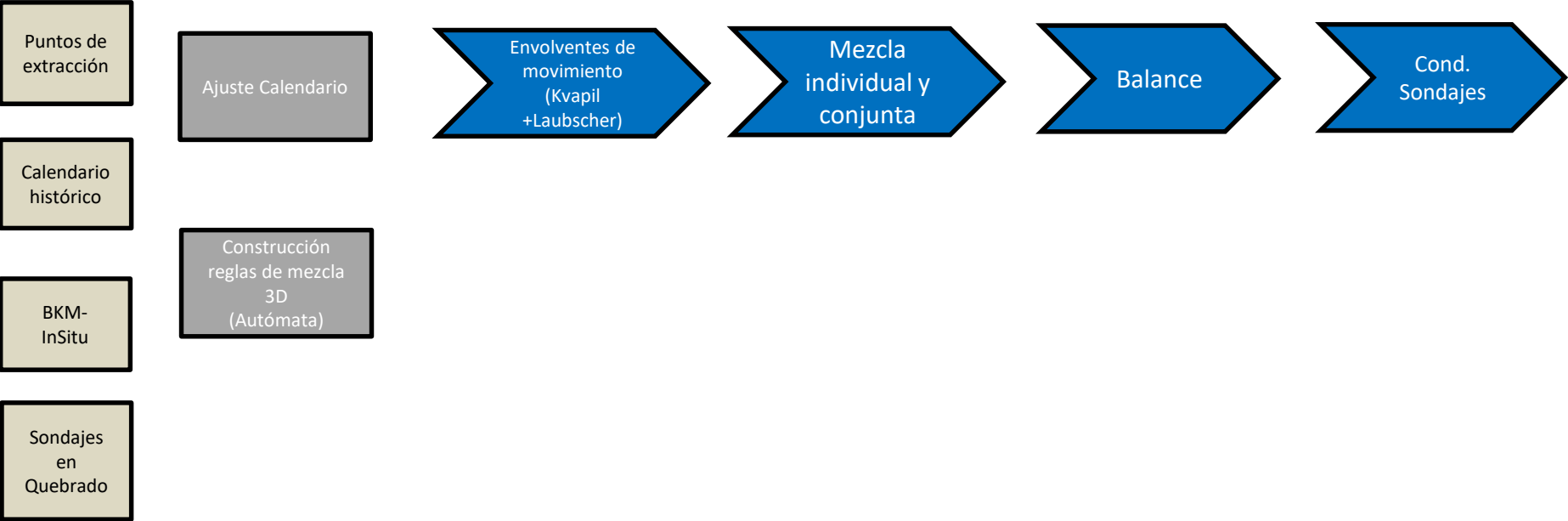


Algoritmos fundamentales utilizados

- **Modelo Kvapil**
- Modelo Laubscher
- Modelo de autómata Celular
- Kriging



FLUJO ALGORITMO MQ





OPTIMIZACION CALENDARIO PRODUCCION

Información de producción 1959-2016

- Datos de **Producción histórica por año**
- Datos recopilados por **Punto de Extracción** / Bloque Productivo / Sector

Sector	Tonelaje recopilado por PE	Tonelaje recopilado por año	Dif.
Pre Inca	285'644'239	-	
Inca	188'752'074	-	
Total	474'396'313	502'242'141	27'845'828

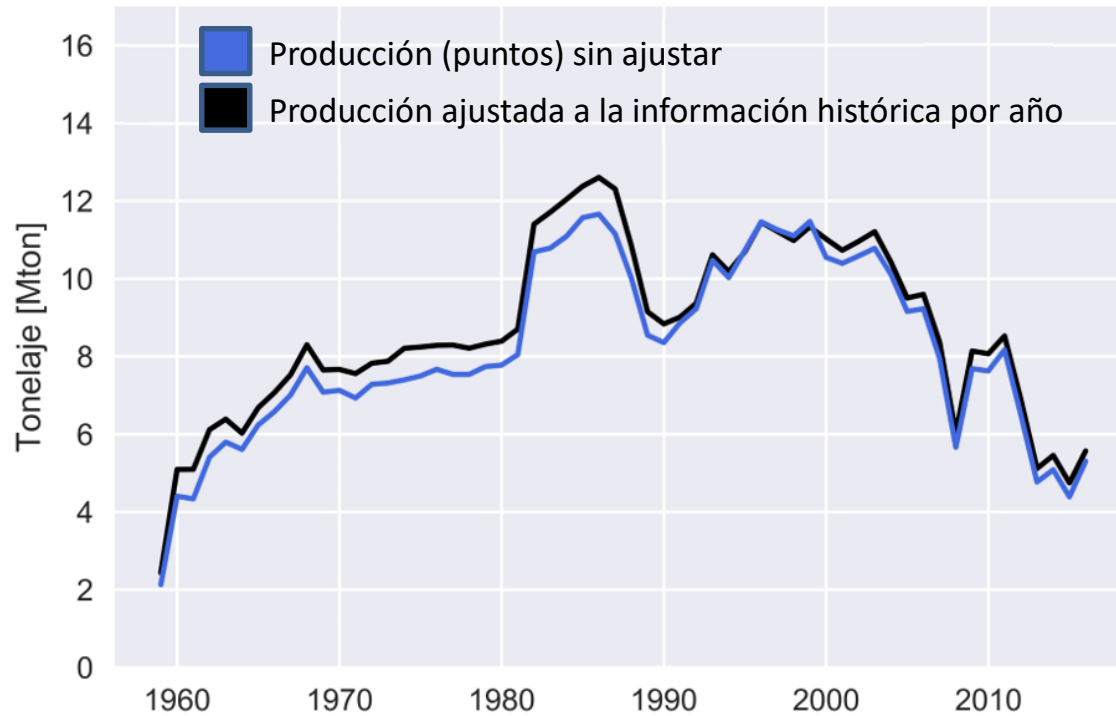
Existe una diferencia entre ambos tipos de información

Ajuste- Datos de puntos de extracción y datos históricos

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	
PE 1	$\text{ton}_{(1,1)}$	$\text{ton}_{(1,2)}$					tonelajes por puntos
PE 2	$\text{ton}_{(2,1)}$	$\text{ton}_{(2,2)}$					
PE 3		$\text{ton}_{(3,2)}$	$\text{ton}_{(3,3)}$	$\text{ton}_{(3,4)}$			
PE 4		$\text{ton}_{(4,2)}$	$\text{ton}_{(4,3)}$	$\text{ton}_{(4,4)}$			
PE 5			$\text{ton}_{(5,3)}$	$\text{ton}_{(5,4)}$	$\text{ton}_{(5,5)}$		
PE 6				$\text{ton}_{(6,4)}$	$\text{ton}_{(6,5)}$	$\text{ton}_{(6,6)}$	
PE 7				$\text{ton}_{(7,4)}$	$\text{ton}_{(7,5)}$	$\text{ton}_{(7,7)}$	

Datos históricos anuales de producción

Ajuste simultaneo puntos de extracción activos y producción correspondiente a cada año



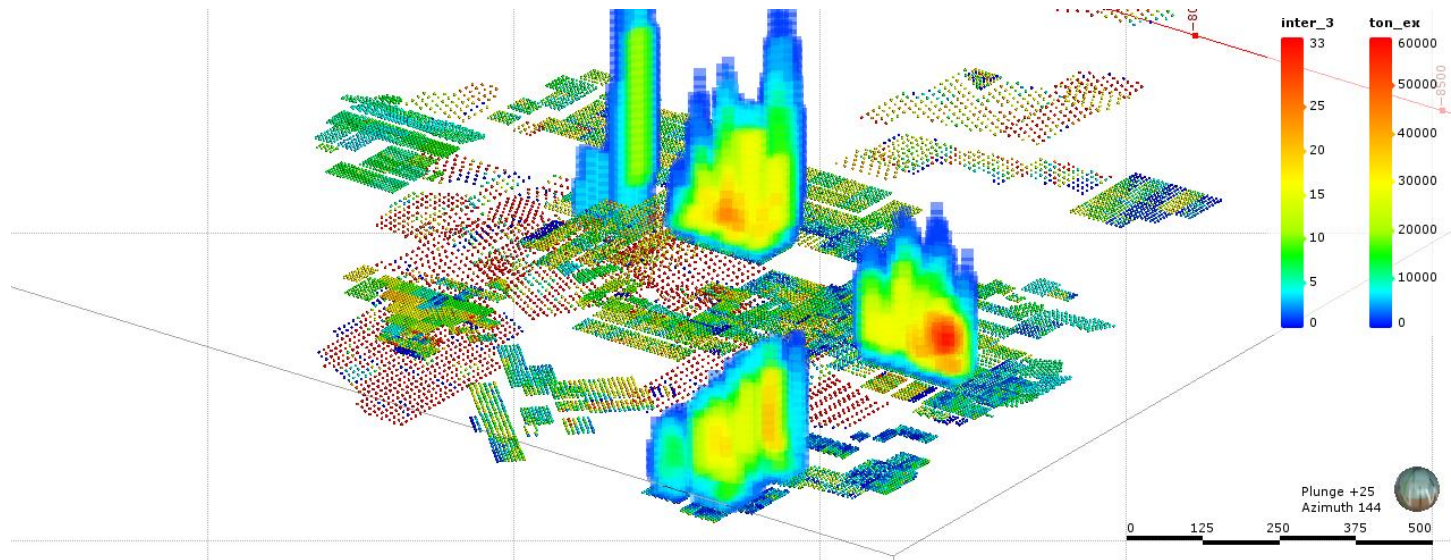
Ton ajustado = 502 Mton

Ton sin ajustar = 474 Mton



Elipses de movimiento Basadas en Kvapil y Laubscher

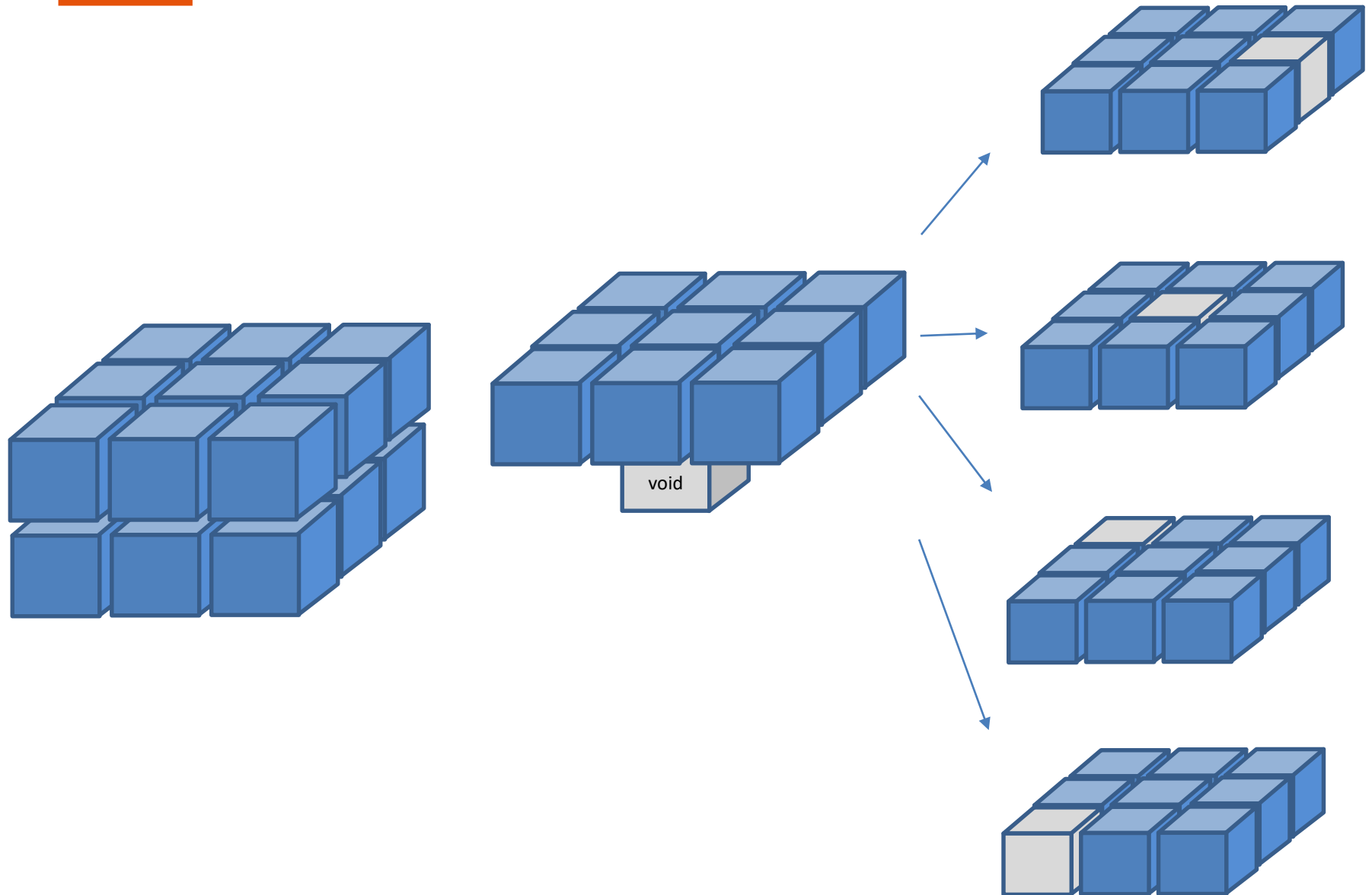
Determinación de la Zona de Mezcla





Simulador de Flujo gravitacional por Autómata Celular

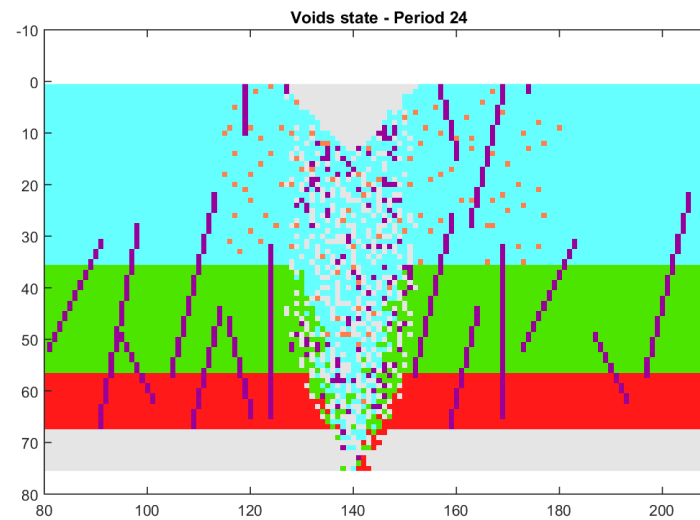
Autómata celular



Autómata celular



$$P_i = \frac{d_{iv}^{-w}}{\sum_j d_{jv}^{-w}}$$



- Cada bloque termina en una posición Final,**depende de cada Simulación/realización**



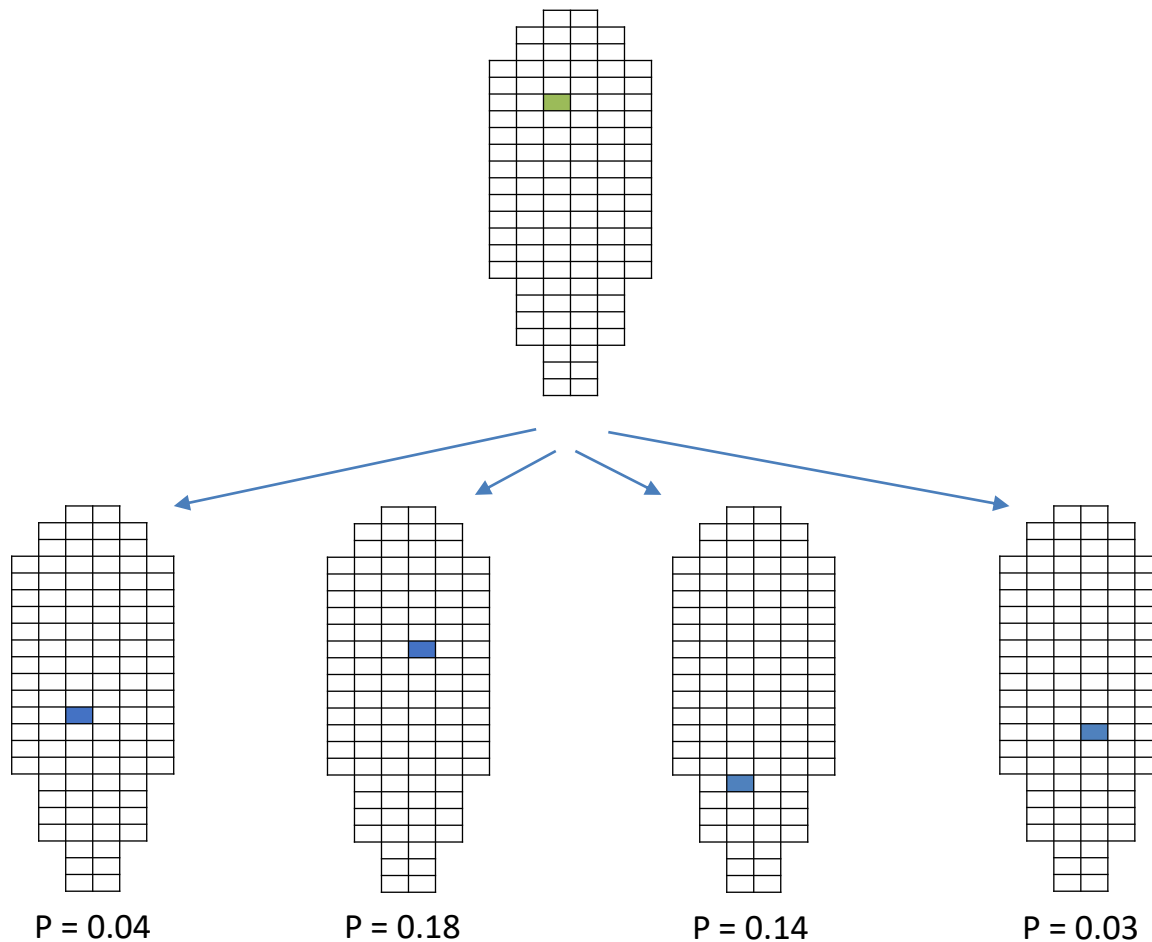
Autómata

- Proceso de simulación es costoso computacionalmente
- Resultado diferente para cada simulación
- Usar una simulación no es una alternativa robusta para un modelo predictivo de leyes.

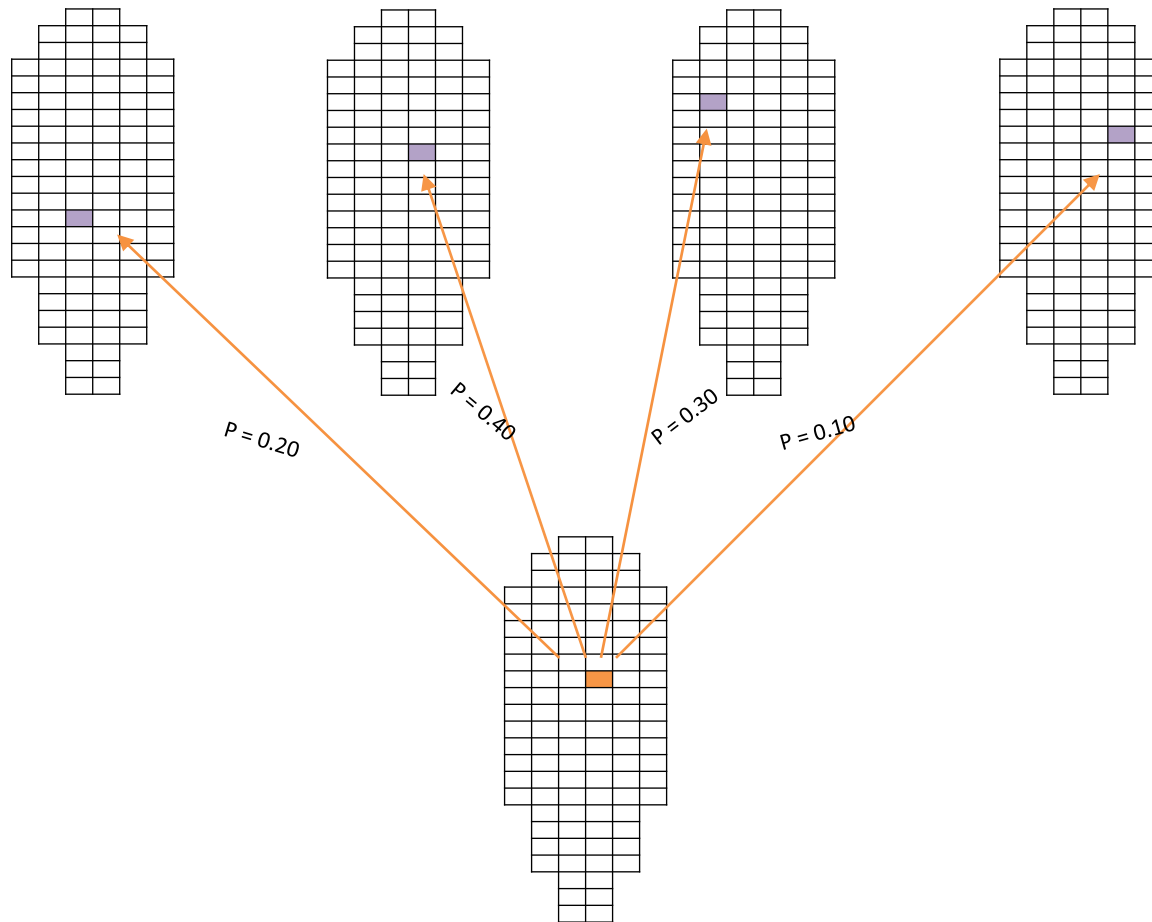


REGLAS DE MEZCLAS 3D - AUTOMATA

Posibles destinos de un bloque



Composición de un bloque terminal



*Se puede interpretar que un **bloque al final** de proceso de interacción está compuesto por **otros bloques** según la probabilidad*

Matriz de mezcla

Bloque original

	1	2	3	4	5												..N
	0.71	0.28	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.44	0.41	0.13	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.29	0.36	0.22	0.1	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.	0	0	0	0.22	0.31	0.2	0.15	0.09	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
.	0	0	0	0	0.18	0.26	0.19	0.14	0.11	0.08	0.04	0.01	0	0	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0.15	0.23	0.17	0.13	0.11	0.09	0.07	0.04	0.01	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0.13	0.2	0.16	0.13	0.1	0.09	0.07	0.06	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.18	0.15	0.12	0.1	0.08	0.07	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.17	0.14	0.11	0.1	0.08	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.15	0.13	0.11	0.09	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.14	0.12	0.1	0	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0.13	0.11	0	0	0
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0.12	0	0
.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0	0

Bloque final

$$\text{Ley_final B2} = 0.44*B2 + 0.41*B3 + 0.13*B4 + 0.02*B5$$

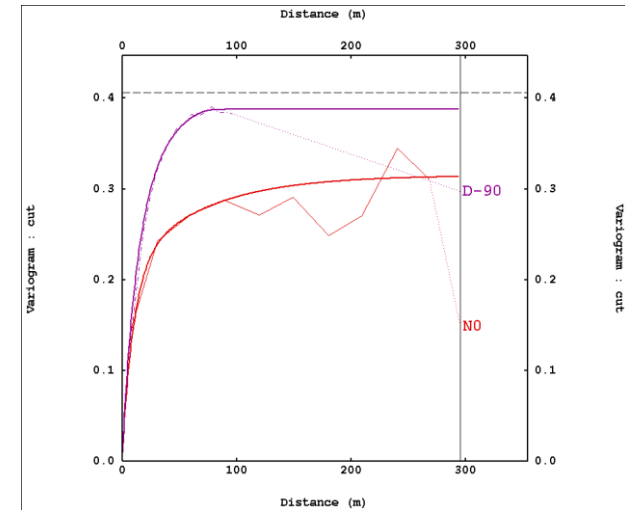
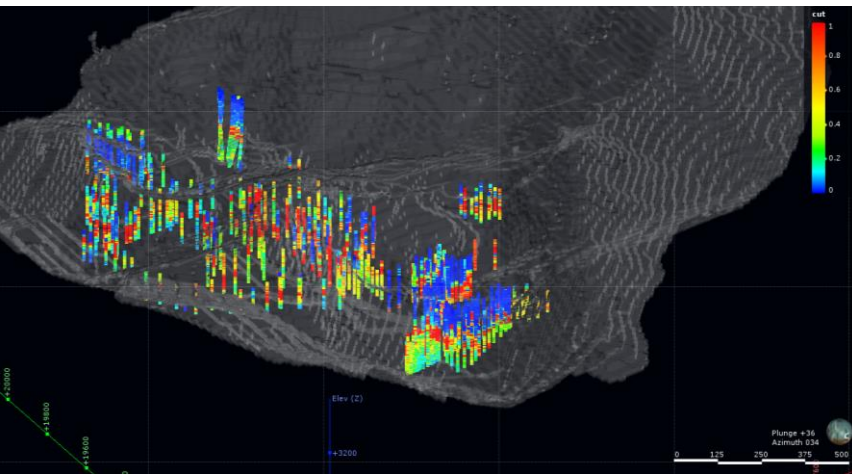
Matriz de mezcla

- Regla de mezcla **basadas en probabilidad**, resumen el proceso de **miles de simulaciones** del autómatas celular
- Permite disminuir tiempos de cálculo
- Aumenta **robustez en valores esperados**, más que una única realización
- Genera **reglas de mezclas** similares al **ábaco de Laubscher**, pero 3D.



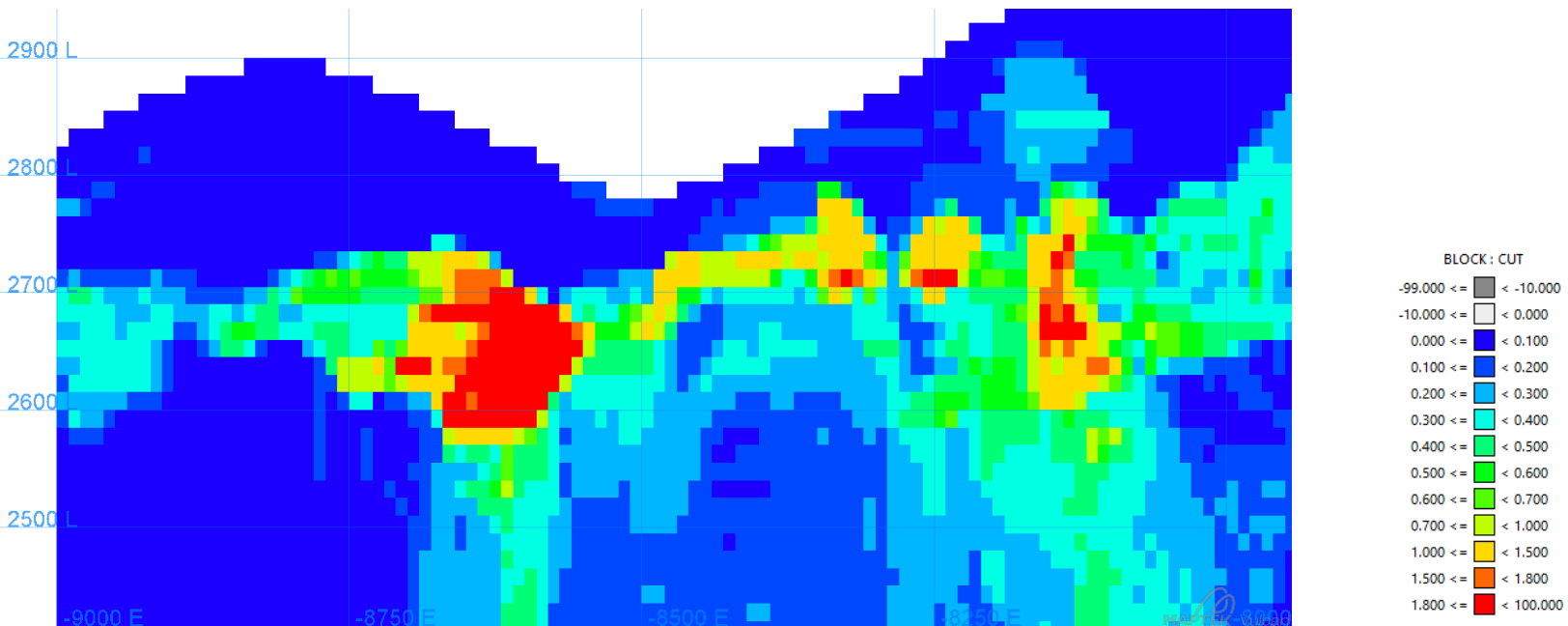
CONDICIONAMIENTO POR KRIGING

Continuidad espacial del modelo de leyes en material quebrado

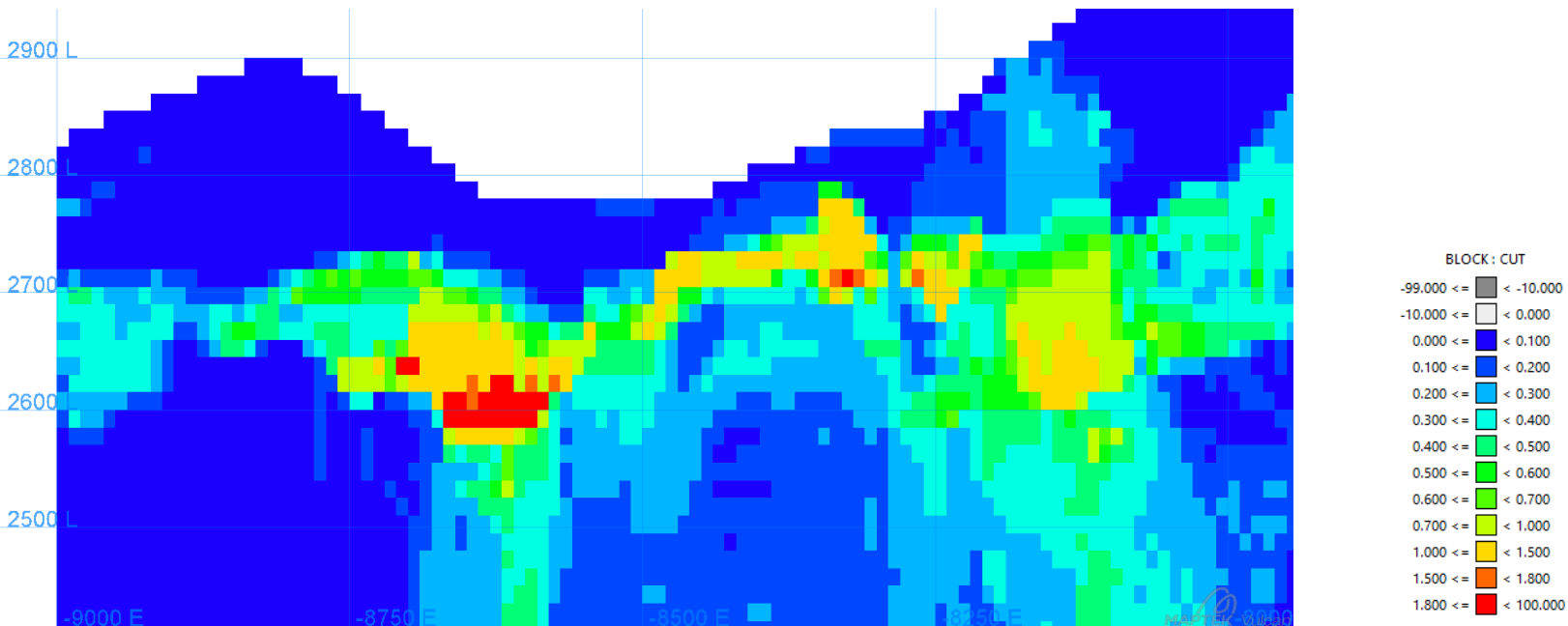


Existe una clara estructuración de las leyes – geología en el quebrado → Permite usar sondajes para generar modelo predictivo de leyes/geología material quebrado

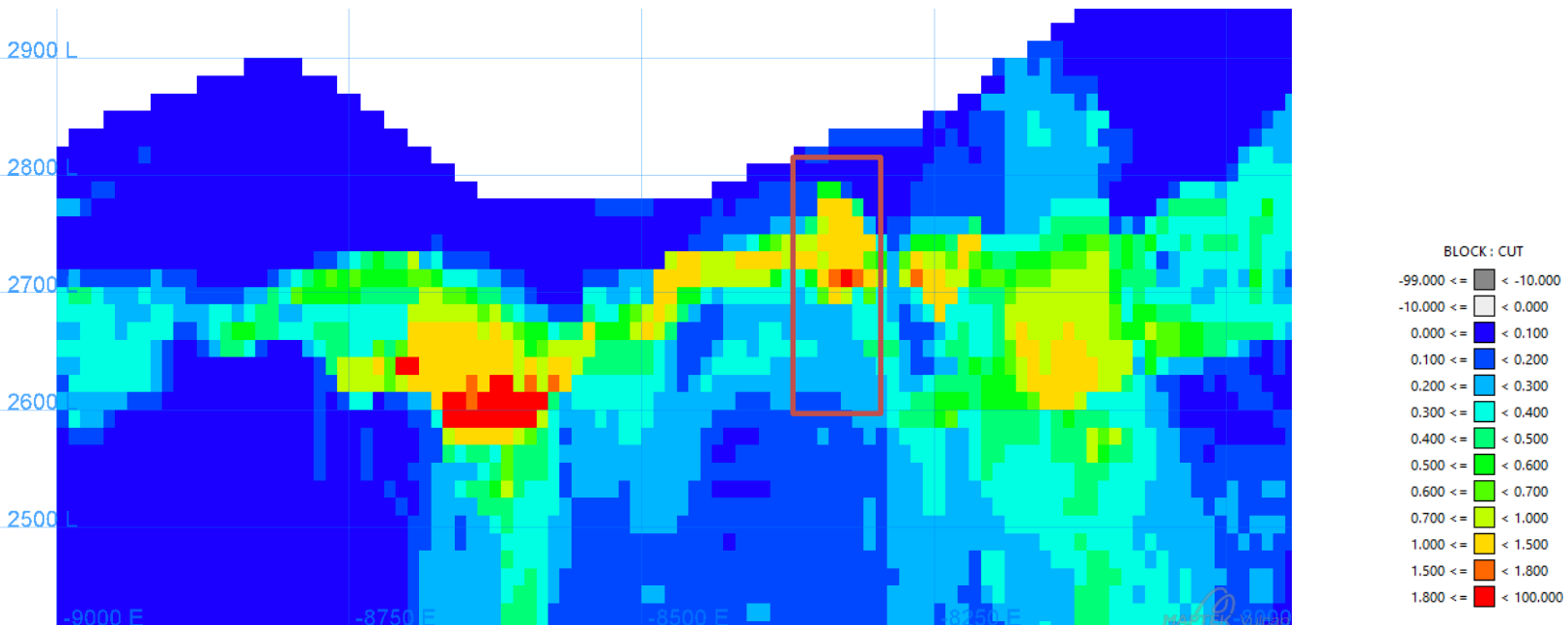
Modelo In-situ 1959



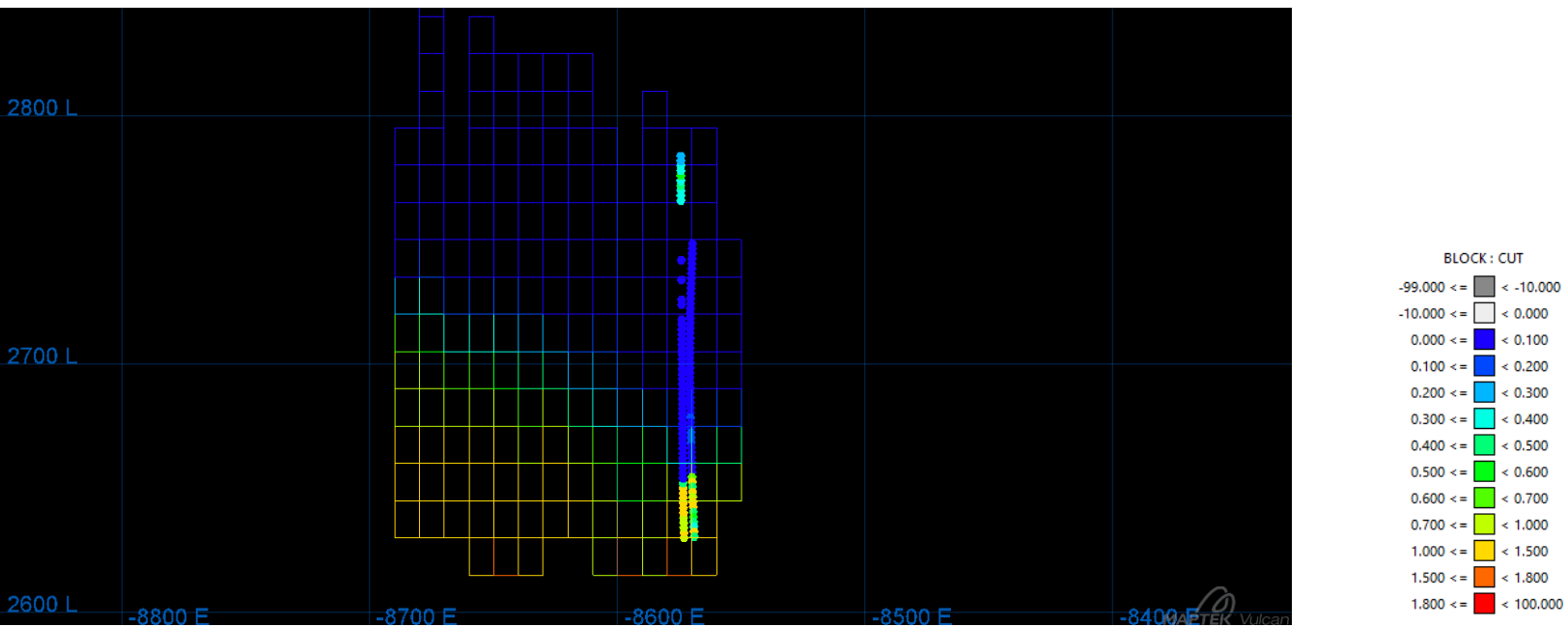
Modelo Quebrado antes de condicionar 2017



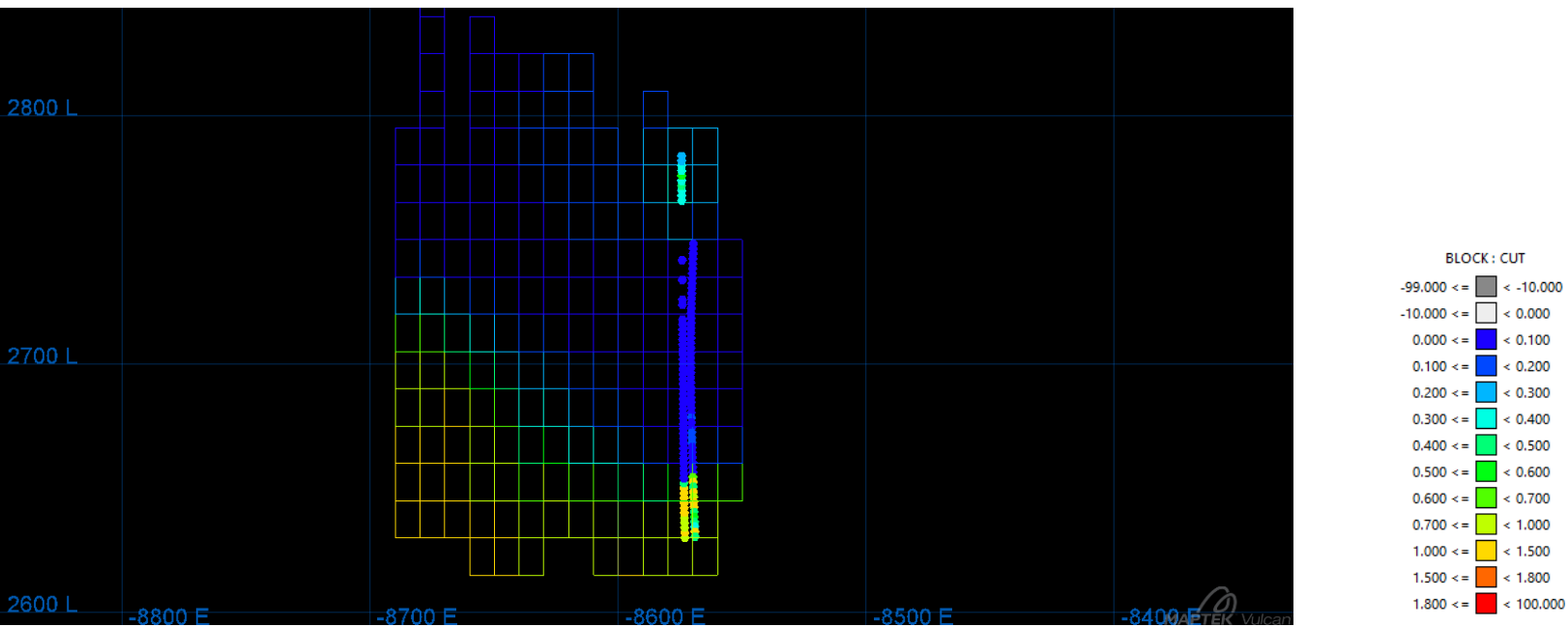
Zona de zoom



Antes de condicionar



Después de condicionar





Condicionamiento

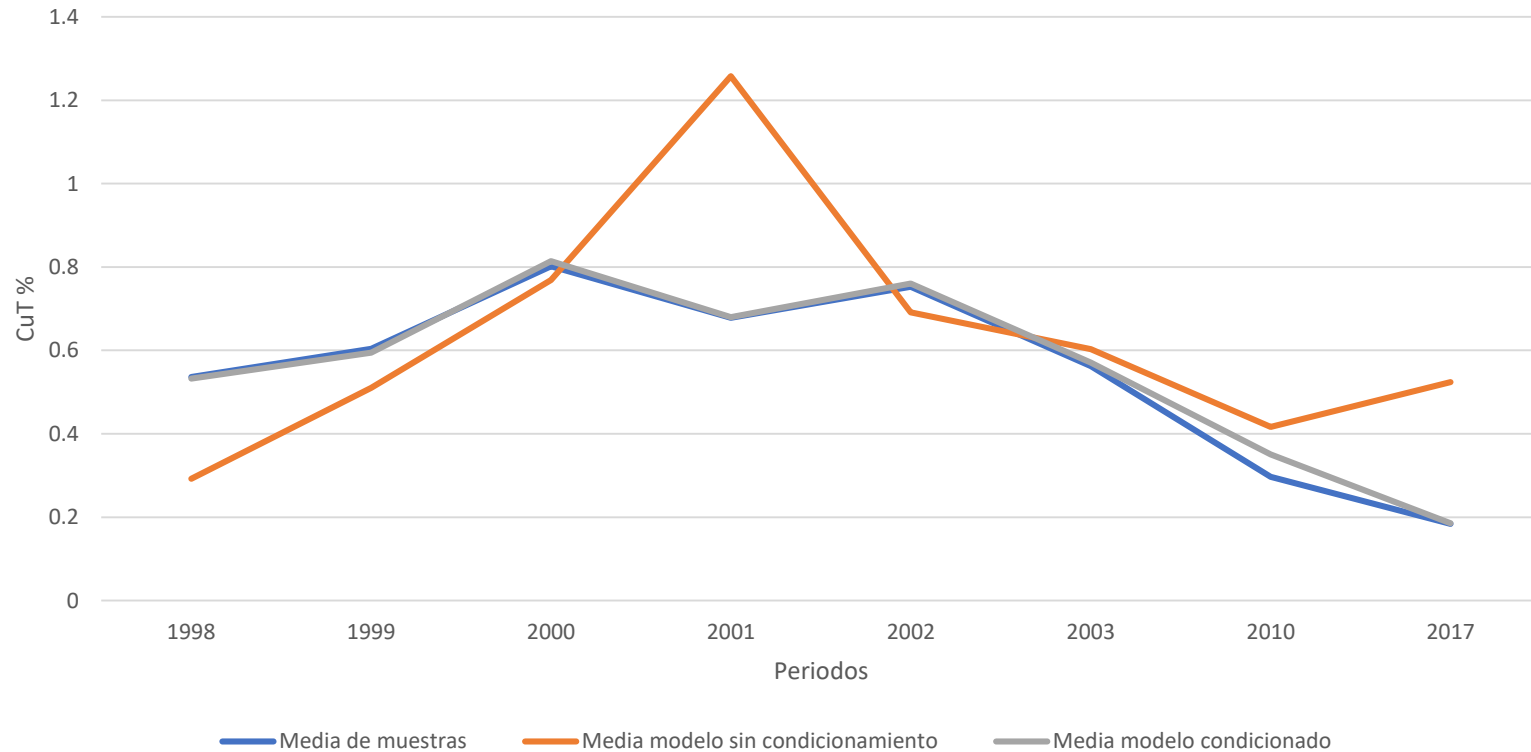
- Disponibilidad de 18,000 datos con análisis en material quebrado.
- Leyes y geología en sondajes de quebrado están estructurados
- Posibilidad de incorporar datos de sondajes para **aumentar robustez** de modelo de material quebrado y **disminuir incertidumbre en estos recursos**.



VALIDACIONES

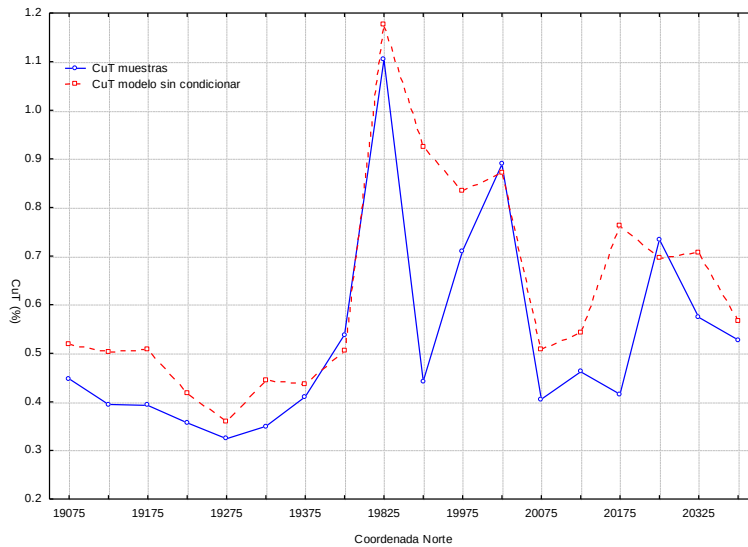
Comparación de medias por periodo versus modelo sin condicionar y modelo condicionado

Comparación medias de CuT en sondeos

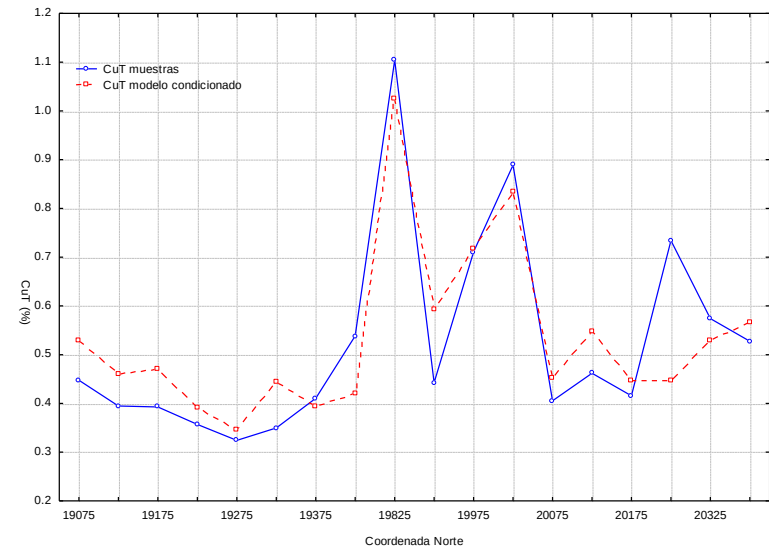


Validaciones pre-condicionado vs Datos en 2010

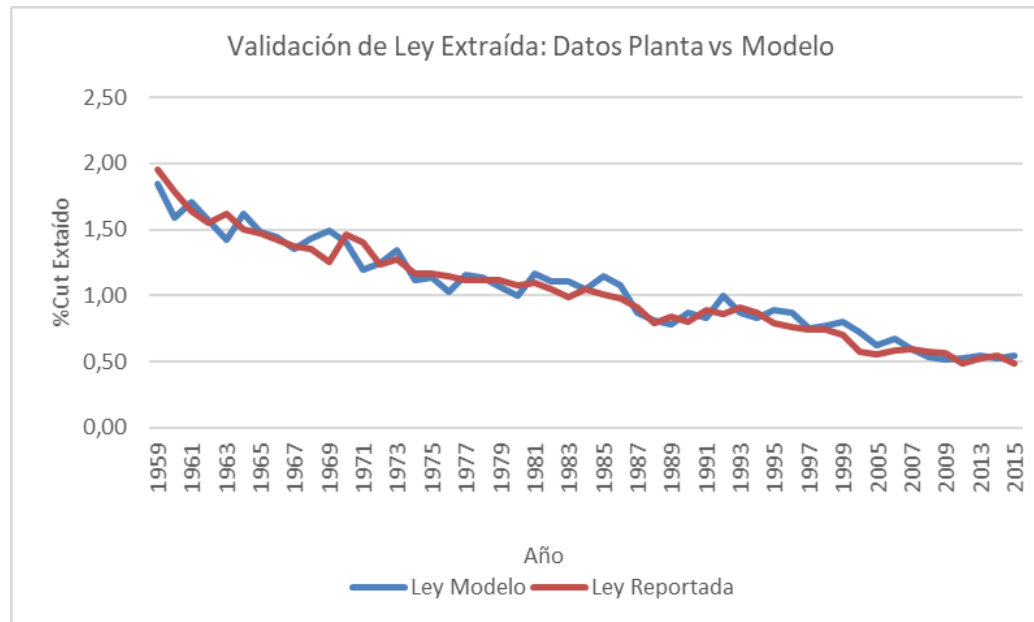
Antes de Condicionar

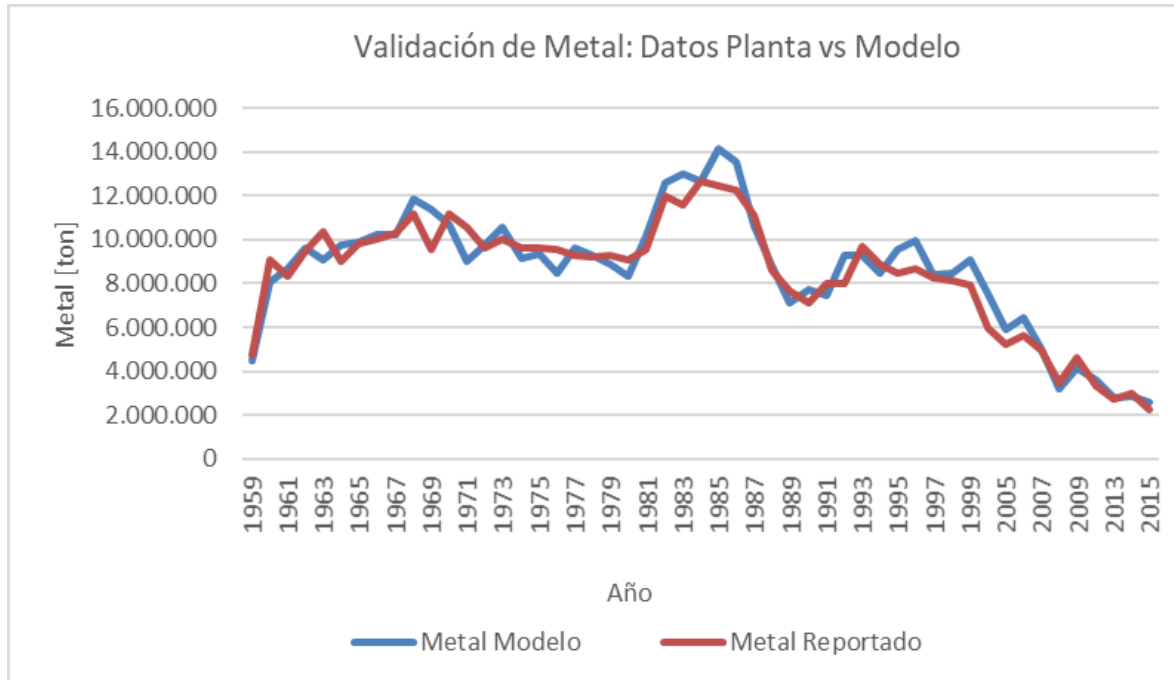


Después de condicionar



Validación Ley extraída Modelo vs Ley reportada







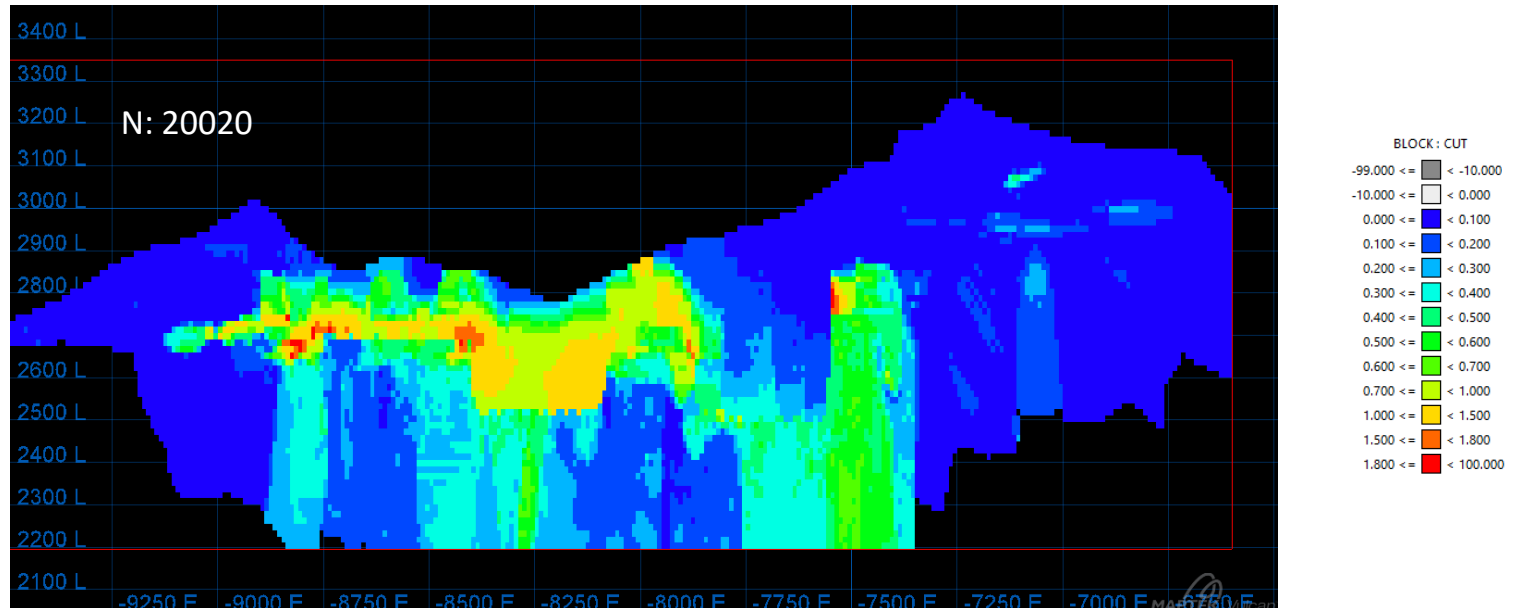
COMENTARIOS

- Modelo de material quebrado basado en **algoritmos clásicos** Kvpil, Laubscher, Autómata celular y kriging.
- Algoritmo usa **Modelo de bloques In-situ robusto** construido alto nivel de información de sondajes
- Modelo usa como input los **datos históricos de producción** → Imprescindible para construcción de modelos futuros.
- Incorporación de datos de **sondajes en Material** quebrado aumenta **robustez del modelo**.



RESULTADOS

Modelo CuT proyectado año 2020



Modelo	Zona mineral	Ton (kt)	CuT (%)
Insitu	Sulfuro	2,258,305	0.39
	Lixiviable	102,075	0.42
Quebrado	Sulfuro	228,339	0.76
	Lixiviable	241,719	0.48
Total		2,830,437	0.43



CONCLUSIONES

Conclusiones

- Distrito Indio Muerto posee un potencial recursos geológicos de **2,800 Mton con 0.45% Cut**, una fracción menor está caracterizada para reserva a la fecha.
- El **Salvador ilustra** la evolución de un proyecto minero en el tiempo con generación de prácticas de excelencia al descuido en un periodo posterior, debido a condiciones geo-minero-políticas.
- **Inversión financiera** importante en **geociencias** en recursos humanos y geológicos para asegurar calidad de modelos sustento del proyecto.



Gracias