

*Evaluación Recursos Minerales,  
Mayor Alcance pero Menor Tiempo...*

Orlando Rojas

# Definición del Recurso Mineral

---

*Para comenzar revisemos algunas definiciones y conceptos asociados al Recurso Mineral ...*

## Definición

## (Código CM2015)

- **Recurso Mineral:** Es un elemento orgánico fosilizado o mineralizado, **razonables para una explotación económica** los elementos o minerales. La mineralización es económica **metalúrgicas y tecnológicas**.

**RECURSOS MINERAL**  
Es “estimado” a través de “muestreo” y “se clasifica de acuerdo a confiabilidad” i.e. confianza relativa de las estimaciones de tonelaje/ley, confianza de la continuidad geológica y de los contenidos de metal, calidad, cantidad, y distribución de los datos. Se clasifica en Medido, Indicado o Inferido

**de material natural** y calidad, **que existe**. La localización, geológicas y el grado **a partir de evidencia**

**EL RECURSO MINERAL**  
Es aquella parte de un yacimiento de la cual se tiene una perspectiva “razonable” para una eventual “extracción económica”. Por lo tanto en su definición debemos hacernos cargo de criterios técnicos – económicos: **parámetros de Leyes Corte y explicar los Factores o Supuestos Mineros, Metalúrgicos**

- El término **Recurso Mineral** cubre mineralizaciones y materiales naturales **económico intrínseco** los cuales **han sido identificados y estimados a través de la exploración, reconocimiento y muestreo**. De acuerdo al grado de confiabilidad existente, los **Recursos Minerales se categorizan en Inferidos, Indicados y Medidos**

# Sustentación geo-minero -metalúrgica

---

- La sustentación geo-minero-metalúrgica **está constituida por la información técnico - económica** generada **para evaluar el potencial cualitativo y cuantitativo, vulnerabilidades y riesgos asociados** con los Resultados de Exploración, Recursos Minerales y Reservas Minerales en estudio

# Los recursos minerales se definen por estimaciones probabilísticas

---

- Esta estimación no constituye una determinación precisa
- Como la información capturada y utilizada es restringida, **la estimación corresponde a valores esperados con cierta probabilidad de ocurrencia dependiendo de la cantidad y calidad de información disponible**

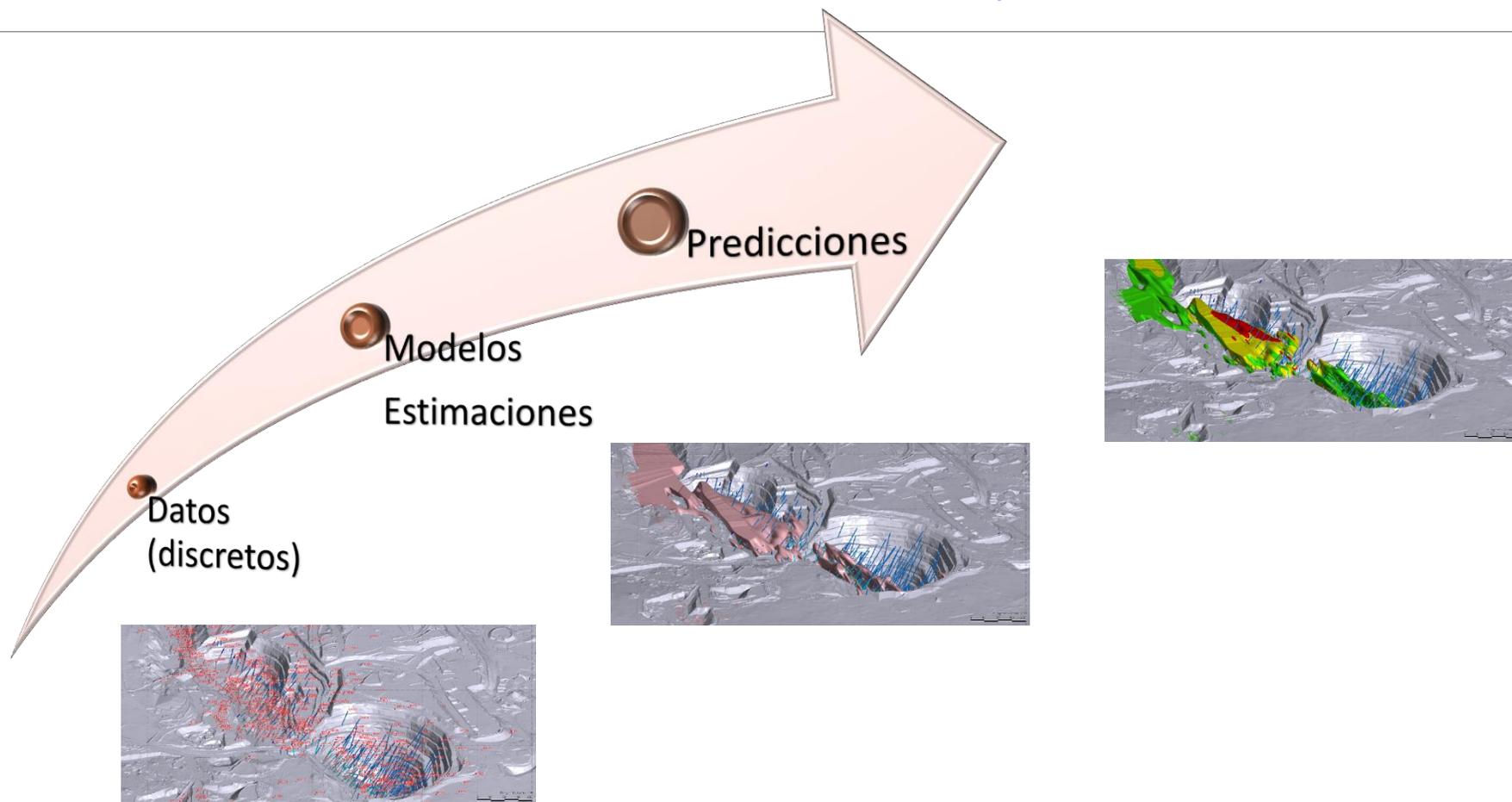
# Los Recursos Minerales se evalúan en un contexto temporal

---

- La mayoría de **las variables o parámetros usados en la definición del Recurso Mineral son dinámicas (sustento geo – minero - metalúrgica)**, es decir, van cambiando en el tiempo
- Por ejemplo:
  - Cantidad y calidad de los datos desde lo cuales modelamos
  - Conceptos e hipótesis geológicas y criterios de modelamiento
  - Factores mineros
  - Factores metalúrgicos
  - Leyes de corte
  - Precios de los commodities
- Por lo tanto, una evaluación de recursos minerales **se enmarca en el estado del conocimiento, tecnología y condiciones de mercado de un periodo específico**

# Las predicciones en la industria minera se sustentan en los Recursos Minerales

Datos → modelo & estimaciones → predicciones

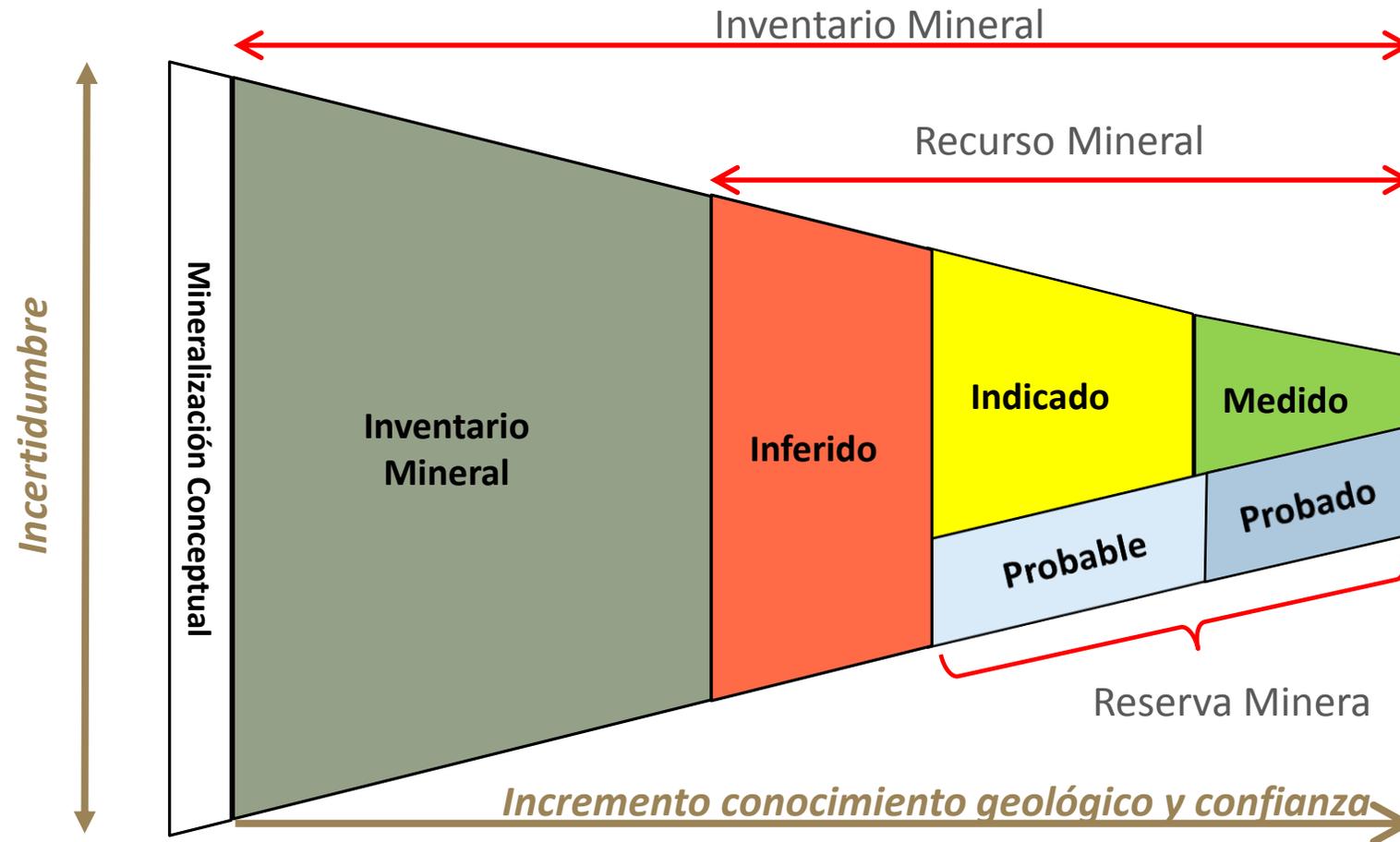


# Los Recursos Minerales son la base de la valorización económica de un yacimiento

---

- La valorización de un yacimiento o activo minero se realiza en base a la estimación de los recursos minerales, en especial en las siguientes etapas:
  - **Exploración Avanzada**
  - **Estudios de Perfil:** Es un estudio técnico económico preliminar o de orden de magnitud respecto del potencial de la viabilidad de los Recursos Minerales. En esta etapa no es posible definir Reservas Minerales
  - **Estudios de Pre-factibilidad:** Estudio completo de un rango de opciones para la viabilidad técnica y económica de un proyecto minero que ha avanzado a una etapa donde el método de explotación ha sido establecido de igual forma con el método efectivo de procesamiento de mineral
  - **Estudios de Factibilidad:** Estudio técnico y económico completo de la opción de desarrollo seleccionada para un proyecto minero, que incluye evaluaciones apropiadamente detalladas de los factores modificadores aplicables junto con cualquier otro factor operacional relevante y un análisis financiero detallado los cuales son necesarios para demostrar en el momento de informar que la extracción es razonablemente justificada. Los resultados del estudio pueden servir razonablemente como base para decisiones de inversión

# Esquema del Inventario Mineral



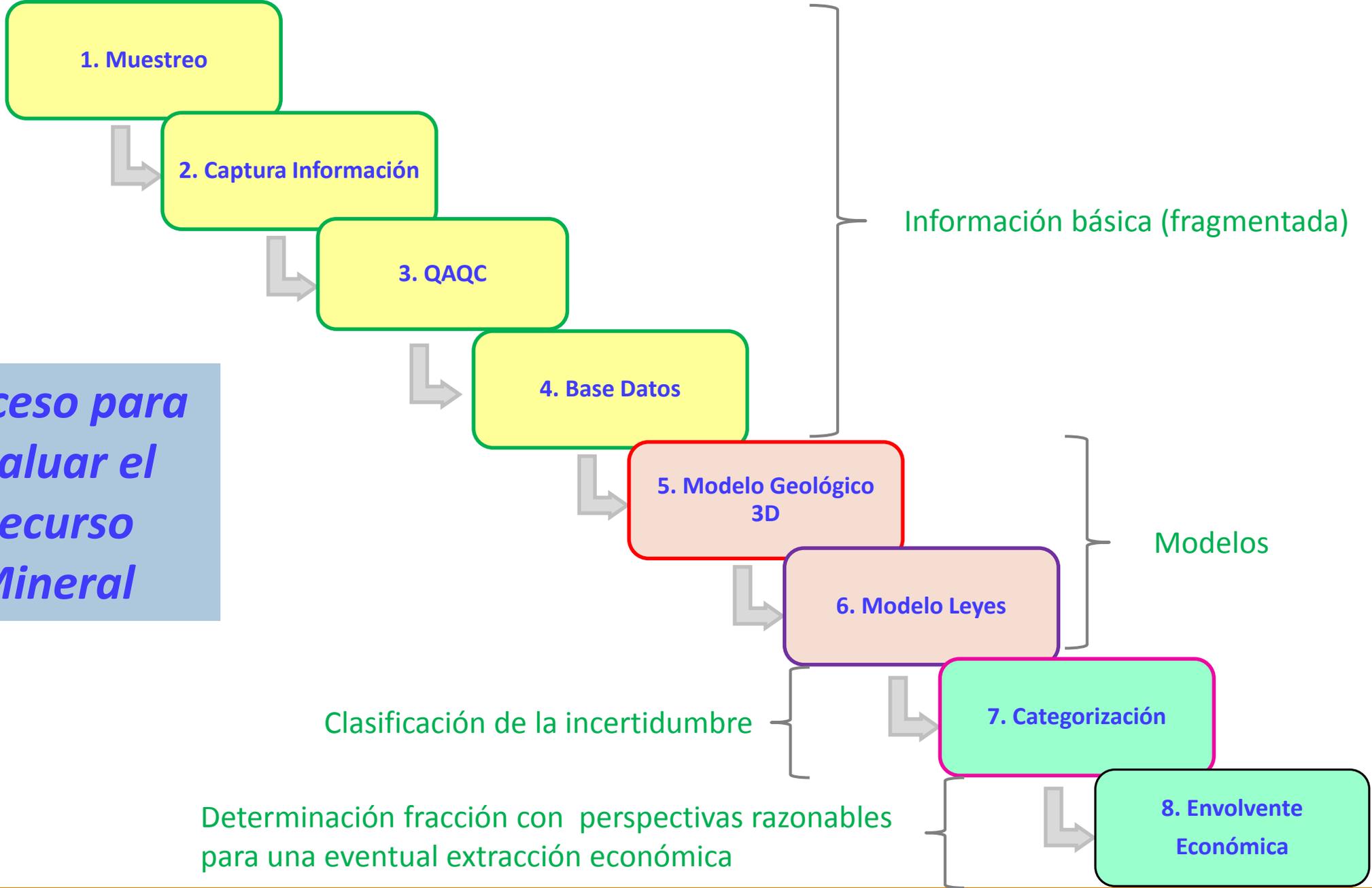
Tomado de:  
Mullins et. al. 2015

# Proceso Estándar para evaluar Recursos Minerales consta de 8 Etapas

---

- Existe en la práctica **un proceso relativamente estándar para evaluar un recursos mineral**
  - Este proceso requiere desarrollar rigurosamente al menos 8 etapas bien definidas
- **Todas estas etapas están relacionadas entre sí y ninguna es más importante que la otra, pues son complementarias**
- Es primordial que la evaluación de recursos esté periódicamente actualizada y considere toda la data disponible (principio de materialidad), por lo tanto, se debe coordinar el desarrollo de todas las sub-etapas de modo que esto ocurra
  - Si se actualiza la data (sondajes, re-análisis, remapeo...) debe actualizarse la evaluación de los recursos
  - Si se modifican los conceptos de modelamiento, deben actualizarse los recursos
  - Si se modifican los supuestos mineros y/o metalúrgicos, deben actualizarse los recursos

**Proceso para evaluar el Recurso Mineral**



# Estimar los Recursos rigurosamente no garantiza abordar la economía del proyecto correctamente (i)

---

- El proceso de evaluación de Recursos Minerales mencionado anteriormente **llevado con rigurosidad permite estimaciones que se ajustan a los datos, están basadas en modelos geológicos plausibles y son in-sesgadas globalmente**
- Sin embargo, los modelos aun estimados usando las mejores **prácticas fallan en capturar dos aspectos críticos** en la evaluación de un proyecto:
  - **Incertidumbre**. La incertidumbre de leyes y tonelaje (geología) solo es reducible en cierto grado (tomando mejores muestras, aumentando la densidad del muestreo, mejorando el conocimiento geológico, etc.), pero al final hay siempre una incertidumbre irreducible y generalmente no despreciable. **(efecto información)**
  - **La variabilidad espacial** (efecto soporte o alisamiento). Los modelos estimados por kriging lo hacen muy adecuado para la planificación de largo plazo, pero esto es a expensas del suavizamiento lo que conduce a enmascarar o eliminar el impacto de la variabilidad espacial en periodos de tiempo más cortos **(efecto soporte)**

# Estimar los Recursos rigurosamente no garantiza abordar la economía del proyecto correctamente (ii)

---

- Los modelos por kriging **no permiten tener un rango de valores posibles en cada bloque**, por eso se dice que es un caso singular, y por lo tanto no podemos modelar la incertidumbre.
- Adicionalmente para minimizar el sesgo condicional **las estimaciones por kriging son inevitablemente suavizadas** (es decir, la variabilidad de los bloques es menor que la de las muestras, la cual si encontramos al operar la mina).
- **Estas dos limitaciones de los modelos estimados por kriging contribuyen a la distorsión de la posterior evaluación de un proyecto**
  - Otros aspecto que tendemos a alisar es el geológico, por ejemplo, los modelos de alteración o mineralización se limitan a zonaciones de asociaciones de minerales reconocidos en los mapeos sólo con lupa 10x
  - Lo anterior lleva a que simplifiquemos a un promedio la composición mineralógica de estas zonas. Esto tiene un alto impacto en el modelamiento geometalúrgico

# Hoy la tendencia es mejorar calidad de las estimaciones

→ (-) incertidumbre; (+) predicción; (-) riesgo

## Contexto Actual

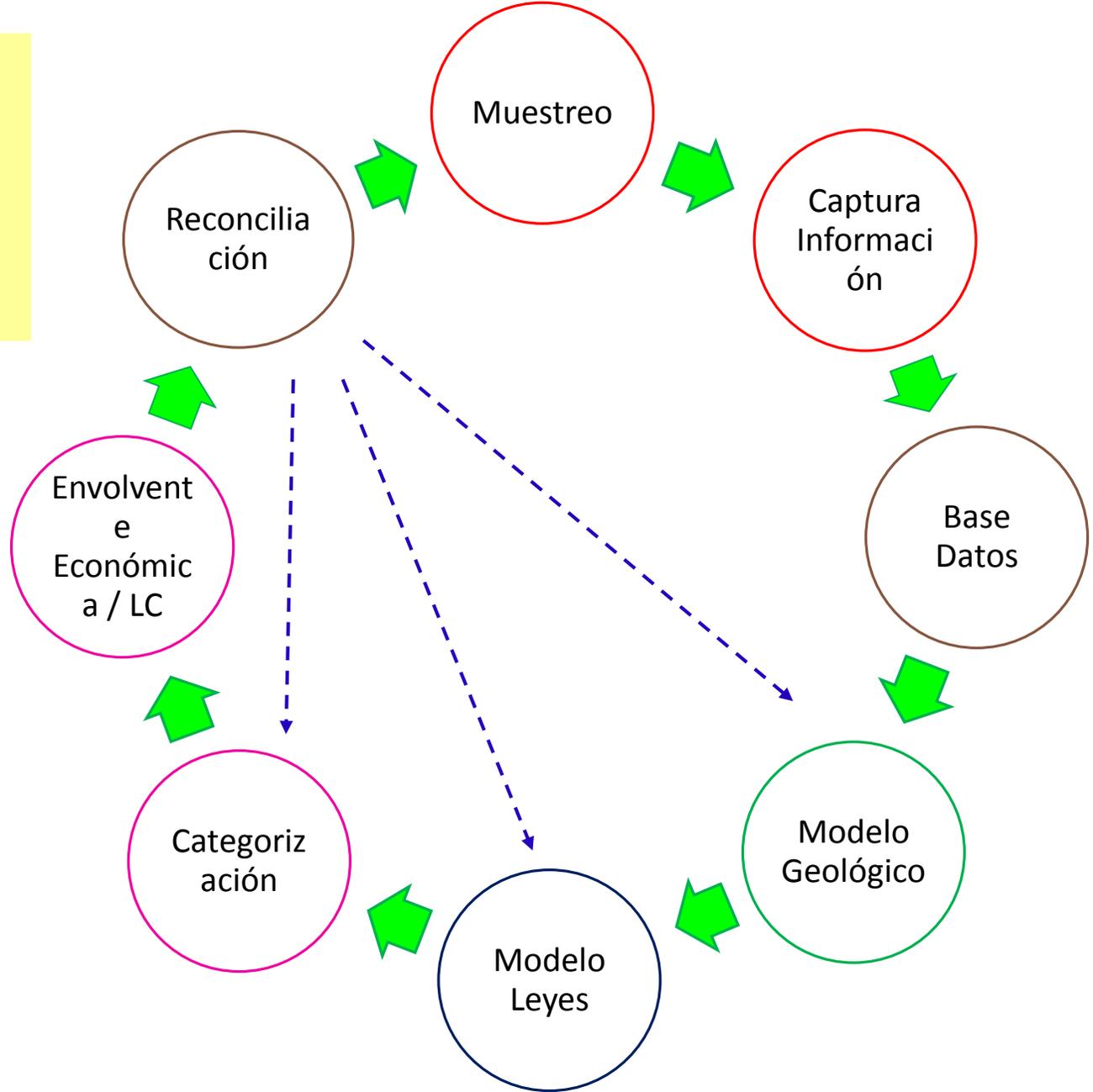
- Bajos Precios de los metales
- Yacimientos de bajas leyes
- Acceso restringido al agua
- Restricciones ambientales
- Costo capital



## Obliga a mejorar:

- Calidad estimación de elementos de interés
- Calidad de la estimación de subproductos y co-productos
- Calidad de la estimación de elementos contaminantes
- Modelar con mayor precisión las especies de minerales de mena y de ganga
- Predecir mejor la respuesta metalúrgica
- Mejor ajuste con los datos de corto plazo (reconciliación), es decir, mayor predicción

Todos los modelos están equivocados... la pregunta práctica es cuan equivocados tienen que ser para no ser útiles



# Qué hacer para mejorar modelos de Recursos?

## → Mejor Data

---

- Incrementar calidad y cantidad de la data:
  - **Modificar protocolos de mapeo y mejorar estandarización**
  - **Incluir la mineralogía hiperespectral en caracterización**
  - **Geoquímica de roca total**
  - **Análisis multi-elementos**
  - **Cu secuencial y extracción parcial**
  - **Incorporar el procesamiento de imágenes (p.e conteo de vetillas)**
  - **Incorporar la data geo-técnica a la caracterización geológica**

# Qué hacer para mejorar modelos de Recursos?

## → Ampliar espectro del modelamiento geológico

---

- Ampliar los alcances del modelamiento geológico, incrementar la cuantificación:
  - Generar modelos geológico en 3D
  - Incorporar herramientas de modelamiento más rápido que permitan actualizaciones mejoradas del modelo en tiempos más acotados
  - Modelar más de un escenario plausible de la geología con los datos disponibles
  - Usando data hiperespectral y geoquímica
    - Modelar especies de ganga de alto impacto en la metalurgia (moscovita, illita, pirofilita, esmectitas, caolinita, etc.)
    - Modelar contenidos cuantitativos de mineralogías de mena y ganga (% en peso)
  - Cuantificar tipo de vetillas según su frecuencia

# Qué hacer para mejorar modelos de Recursos?

## → Controlar alisamiento y uso simulaciones condicionales

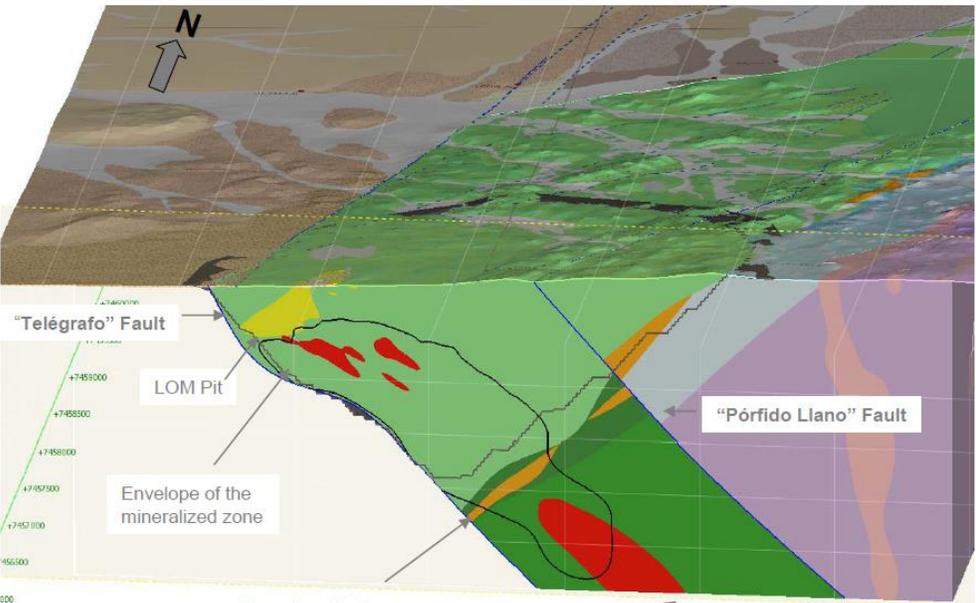
---

- En la estimación de leyes debería:
  - Poner en un mismo estándar la cantidad de muestreo para los elementos que son subproductos o co-productos (Mo, Au, Ag) y las impurezas (As, Sb, Bi, Cd, S)
  - Estimar leyes minimizando el suavizamientos extra al teórico
  - Optimizar los planes de kriging (QKNA)
  - Utilizar herramientas multivariables
  - Incorporar las simulaciones condicionales para modelar la incertidumbre no sólo de las leyes sino también de la geología
  - Incorporar la reconciliación como una herramienta de medición de la bondad de los modelos
  - Incorporar la estimación de variables geometalúrgicas, generalmente No Aditivas (razón solubilidad,  $w_i$ ,  $s_{pi}$ ,  $A_{xb}$ , recuperación primaria, ley concentrado, velocidad de sedimentación, yield stress.

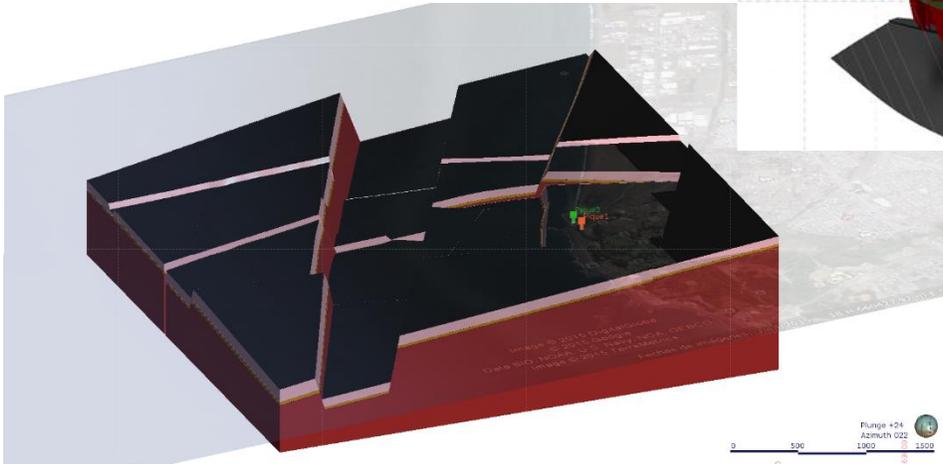
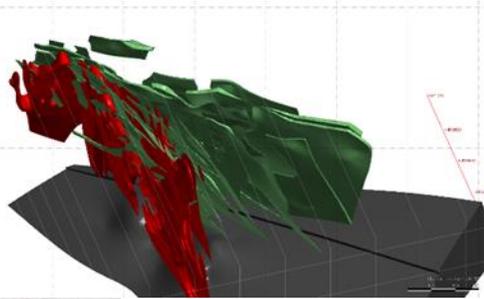
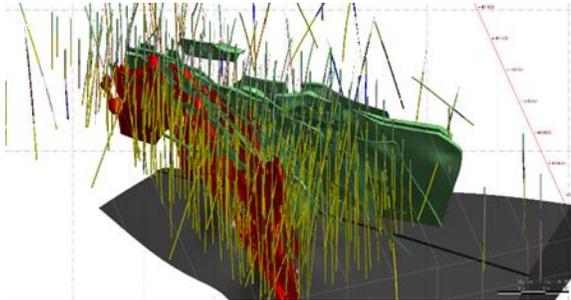
# Ejemplos

---

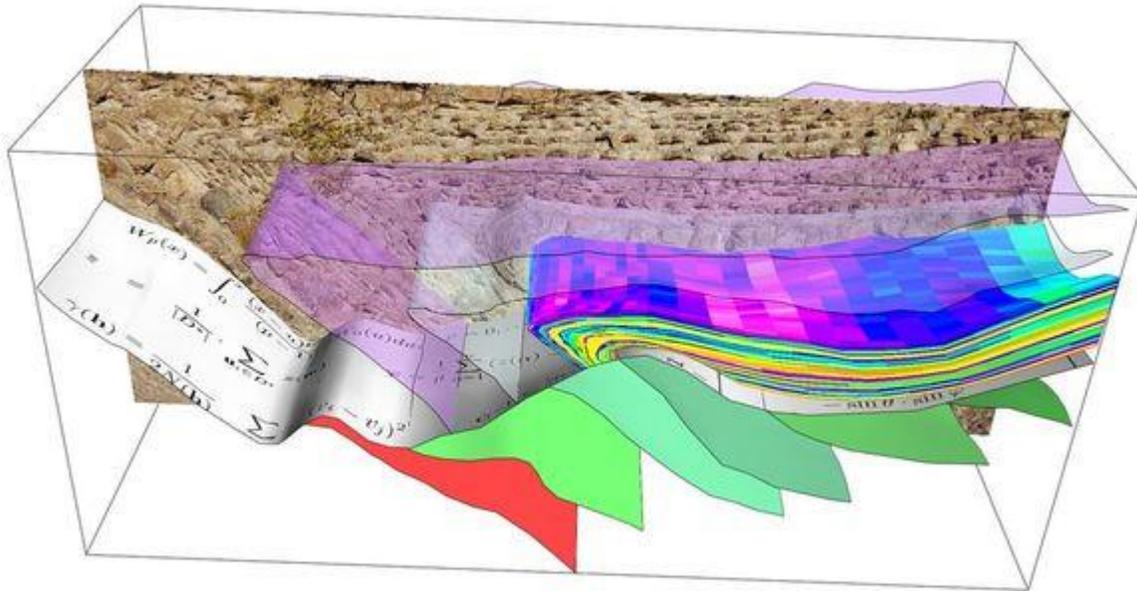
# Modelamiento implícito 3D



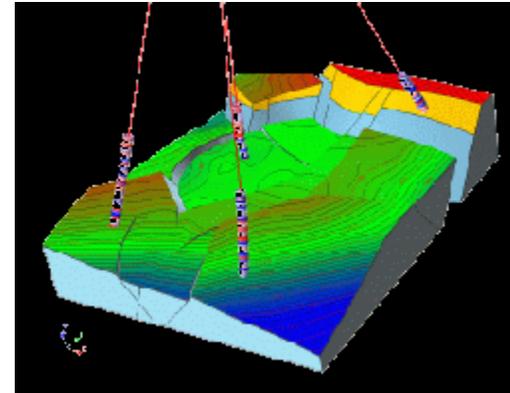
multiple, dike-like, porphyritic intrusion of granodioritic composition



# Modelamiento implícito 3D



*gOcad*



# Especiación Geoquímica

## Tabla Especiación

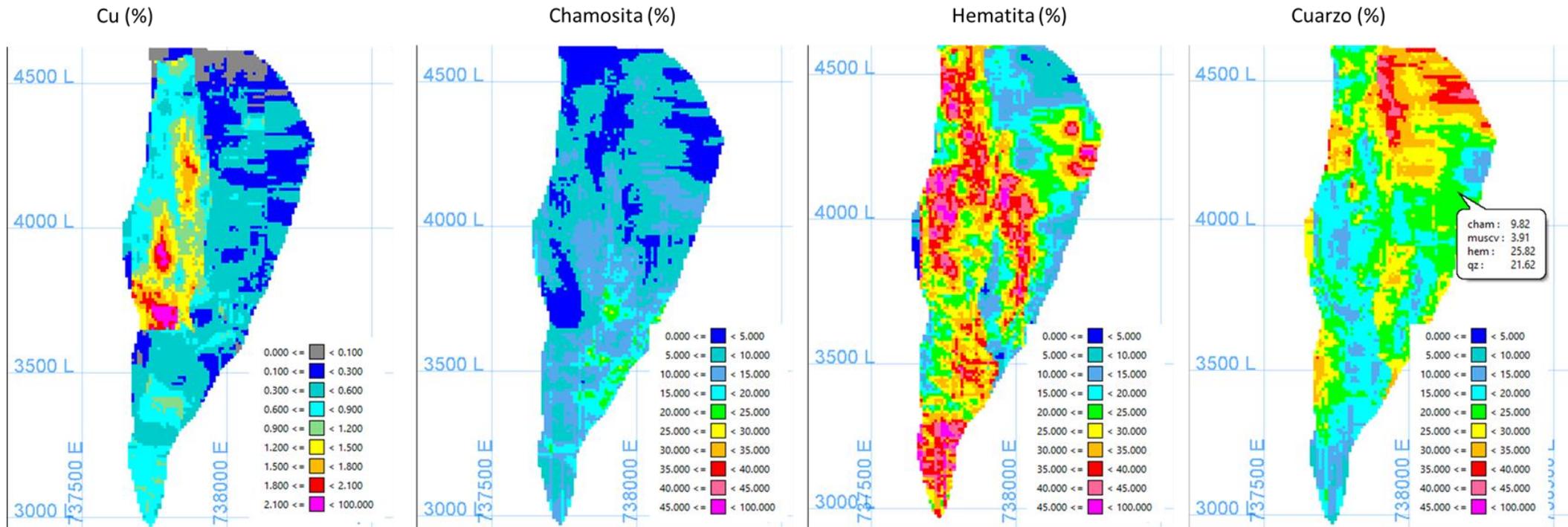
Sondaje	Desde	Hasta	au_ppm	ag_ppm	Al_ppm	As_ppm	Ba_ppm	Bi_ppm	Ca_ppm	cu_pct	K_ppm	S_ppm	Chamosite	Muscovita	Hematite	Quartz	S_Pyrite	S_Chalco	S_Bornite	S_Covellit
CAR002	469	470	0.14	6.3	62,457	16	2335	2.5	1,787	0.10	57,941	550	3.4	29.5	2.5	56.4	-	-	-	-
CAR002	470	471	0.14	6.3	60,869	12	7320	2.5	1,858	0.10	55,368	1,300	3.4	28.7	1.7	55.4	-	-	-	-
CAR002	471	472	0.14	6.3	56,635	12	1645	2.5	1,858	0.10	53,707	300	3.0	26.7	3.3	54.6	-	-	-	-
CAR002	472	473	0.14	6.3	46,420	55	1190	2.5	3,645	0.10	37,022	1,300	3.4	21.5	24.2	42.8	-	-	0.21	-
CAR002	473	474	0.14	6.3	44,726	165	8050	5	5,432	0.10	23,990	3,000	3.9	20.5	50.4	15.9	-	-	0.05	0.48
CAR002	474	475	0.624	8	47,214	130	5305	10	5,503	2.15	23,160	4,800	3.8	21.8	37.6	24.2	-	-	1.33	-
CAR002	475	476	0.624	8	66,163	195	460	2.5	5,575	2.15	31,544	900	1.2	32.0	52.6	10.8	0.17	0.14	-	-
CAR002	476	477	0.624	8	74,631	150	130	2.5	1,930	2.15	37,022	12,172	9.1	33.2	37.2	7.5	-	-	4.68	-
CAR002	477	478	0.624	8	58,752	125	850	2.5	1,358	2.15	27,974	7,100	7.8	25.2	42.4	17.9	-	-	2.66	-
CAR002	478	479	0.624	8	75,690	165	2825	2.5	1,429	2.15	36,607	23,602	0.3	37.2	40.0	5.6	-	-	8.28	-
CAR002	479	480	0.348	12.8	95,803	95	230	5	929	4.54	46,320	8,600	0.3	47.1	19.4	26.7	-	-	3.23	-
CAR002	480	481	0.348	12.8	12,121	44	3715	2.5	1,286	4.54	4,732	21,544	1.0	4.9	53.0	29.1	-	0.04	7.51	-
CAR002	481	482	0.348	12.8	15,879	38	2250	2.5	6,361	4.54	6,973	24,059	0.7	7.1	55.4	23.9	-	0.06	8.45	-
CAR002	482	483	0.348	12.8	13,021	42	620	2.5	6,718	4.54	5,064	25,545	0.9	5.3	55.3	25.7	-	0.62	8.63	-
CAR002	483	484	0.348	12.8	29,588	50	3830	2.5	3,359	4.54	13,448	22,344	2.6	13.6	44.3	30.1	-	1.11	7.12	-
CAR002	484	485	0.222	57.2	70,926	46	480	2.5	2,644	2.69	36,939	4,600	10.3	30.9	8.9	46.6	-	0.49	1.27	-
CAR002	485	486	0.222	57.2	17,573	46	9300	2.5	4,145	2.69	7,969	16,629	1.7	8.0	44.8	33.5	-	-	5.67	0.17
CAR002	486	487	0.222	57.2	6,828	55	10600	2.5	8,076	2.69	2,490	19,601	0.8	2.6	64.1	22.4	-	1.10	4.96	-
CAR002	487	488	0.222	57.2	9,369	46	7490	2.5	4,860	2.69	3,735	15,029	0.7	3.9	60.6	27.9	-	0.89	3.74	-
CAR002	488	489	0.222	57.2	16,250	40	1230	2.5	6,218	2.69	7,305	16,744	1.8	7.3	40.3	36.9	-	2.06	2.95	-
CAR002	489	490	0.368	16.4	19,108	50	1150	2.5	5,360	2.75	8,882	15,601	1.3	8.9	49.6	30.9	-	2.42	1.72	-
CAR002	490	491	0.368	16.4	9,104	42	500	2.5	5,289	2.75	3,652	31,260	1.1	3.8	53.7	27.8	-	6.39	2.55	-
CAR002	491	492	0.368	16.4	19,743	46	715	2.5	3,431	2.75	8,467	18,573	2.6	8.5	47.5	32.9	-	2.42	3.39	-
CAR002	492	493	0.368	16.4	18,578	38	900	2.5	4,931	2.75	8,384	16,744	1.9	8.4	45.6	33.9	-	2.14	2.99	-
CAR002	493	494	0.368	16.4	23,924	55	205	2.5	6,718	2.75	10,542	13,543	3.0	10.6	45.9	31.2	-	1.08	3.27	-
CAR002	494	495	0.418	12.8	32,870	70	1035	2.5	4,074	3.55	14,693	6,200	3.4	14.9	35.0	41.4	-	0.54	1.89	-
CAR002	495	496	0.418	12.8	25,036	60	3455	2.5	2,716	3.55	11,206	18,344	2.7	11.3	46.5	27.7	-	-	6.70	-
CAR002	496	497	0.418	12.8	13,497	40	860	2.5	2,216	3.55	5,645	18,230	1.2	5.7	49.7	30.7	-	-	6.76	-
CAR002	497	498	0.418	12.8	16,832	60	465	2.5	2,644	3.55	7,471	17,544	2.0	7.5	51.9	26.0	-	-	6.52	-
CAR002	498	499	0.418	12.8	21,437	55	3550	2.5	2,716	3.55	9,878	15,486	1.6	10.0	53.9	26.7	-	-	5.36	0.47
CAR002	499	500	0.374	20.2	16,938	80	2300	2.5	3,216	4.47	7,554	17,315	2.0	7.6	51.9	23.3	-	-	6.54	-

## Modelo Geoquímico

- Utilizando AQ vía normalización se obtiene especiación
- Validación con Qemscan, DRX, FRX, Calcografía



# Modelos cuantitativos de especies mineralógicas



# Simulaciones condicionales → Modelo Incertidumbre

Figura 109: Mapa de Probabilidad CuT >0.2% en Óxido y Lixiviado – Planta 2830

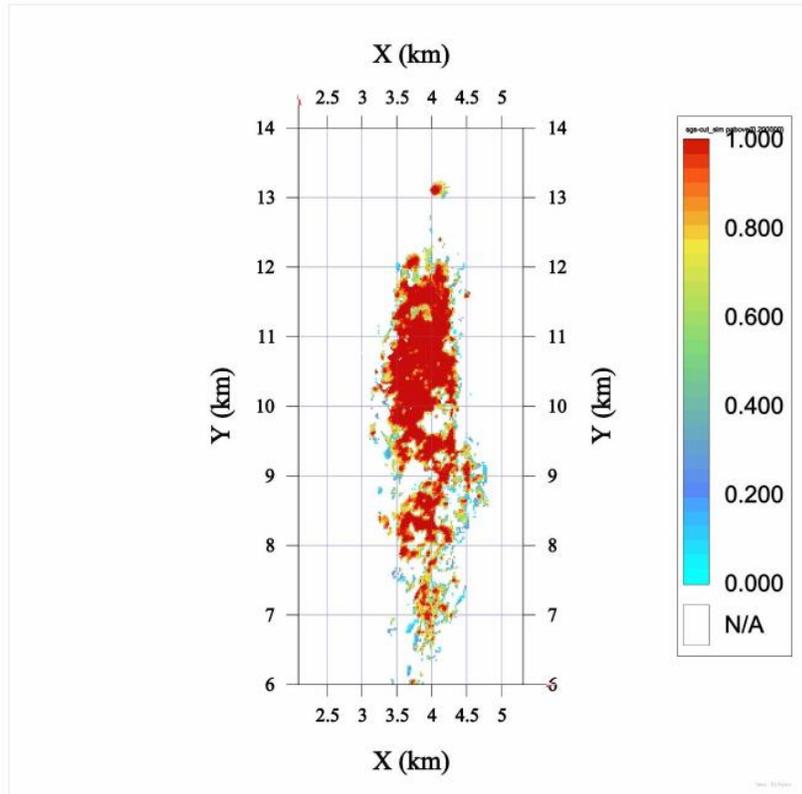
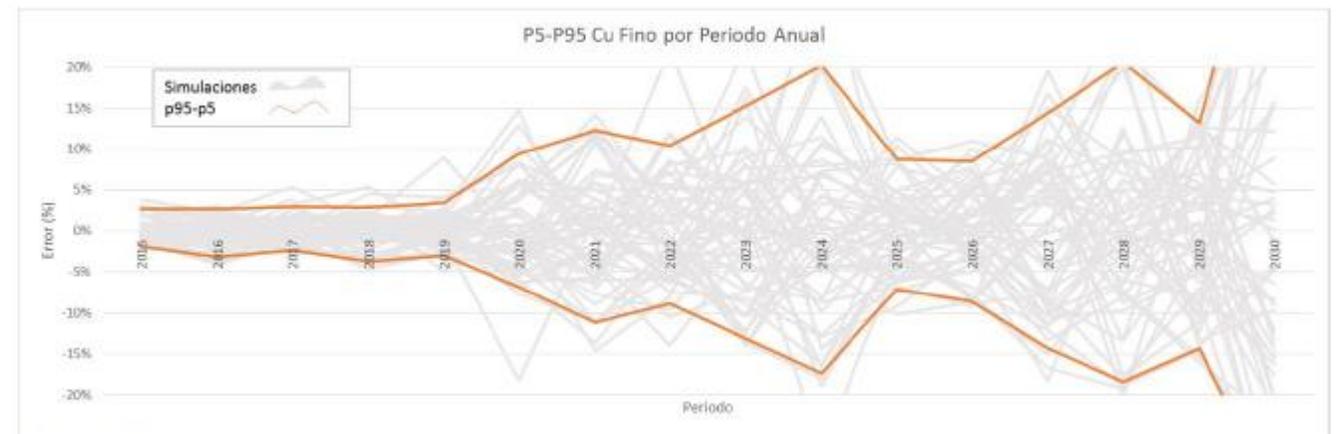


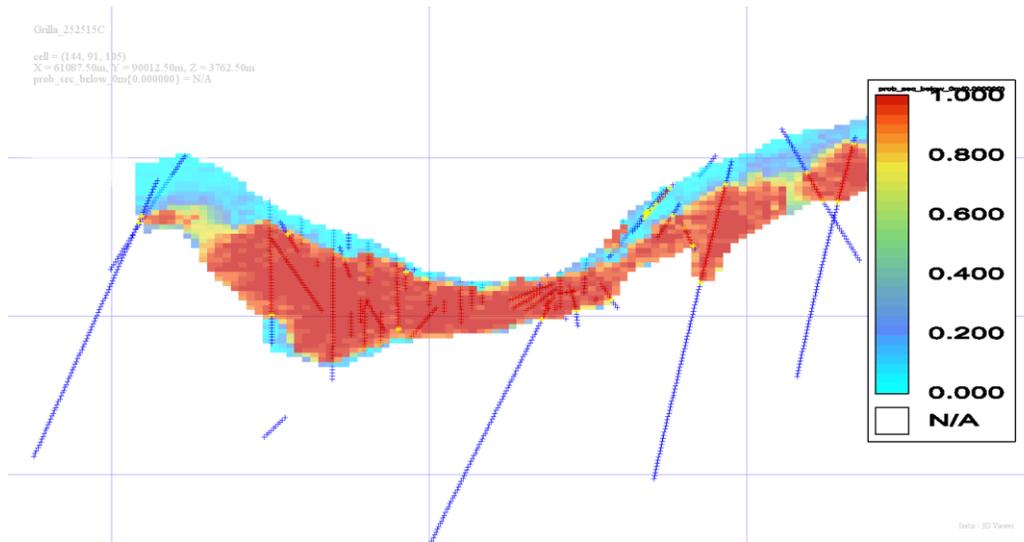
Figura 105: Diferencias de Cu Fino Respecto a la media de 50 Simulaciones



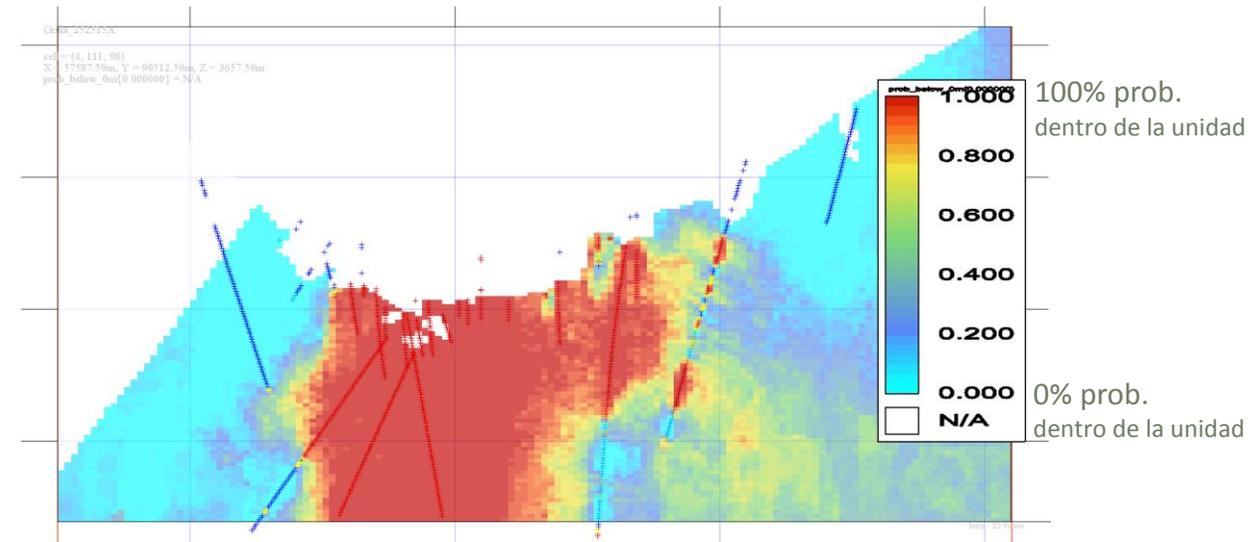
LC: 0.2% CuT

# Mapa de probabilidades de un contacto geológico

## Secundario



## Primario



*Fin Presentación*

*Gracias*