



Nuevas tendencias en modelamiento geológico y recursos minerales

Rodrigo Riquelme

Gerente de recursos y reservas

8 de julio 2011

Temario

- Recursos en Chile
- Modelamiento Geológico
 - Conceptualización (2 casos)
 - Construcción de modelos
 - Modelamiento implícito
 - Análisis exploratorio de datos
- Estimación de recursos
 - Multivariable
 - Método KMG+MAF
 - Geometalurgia

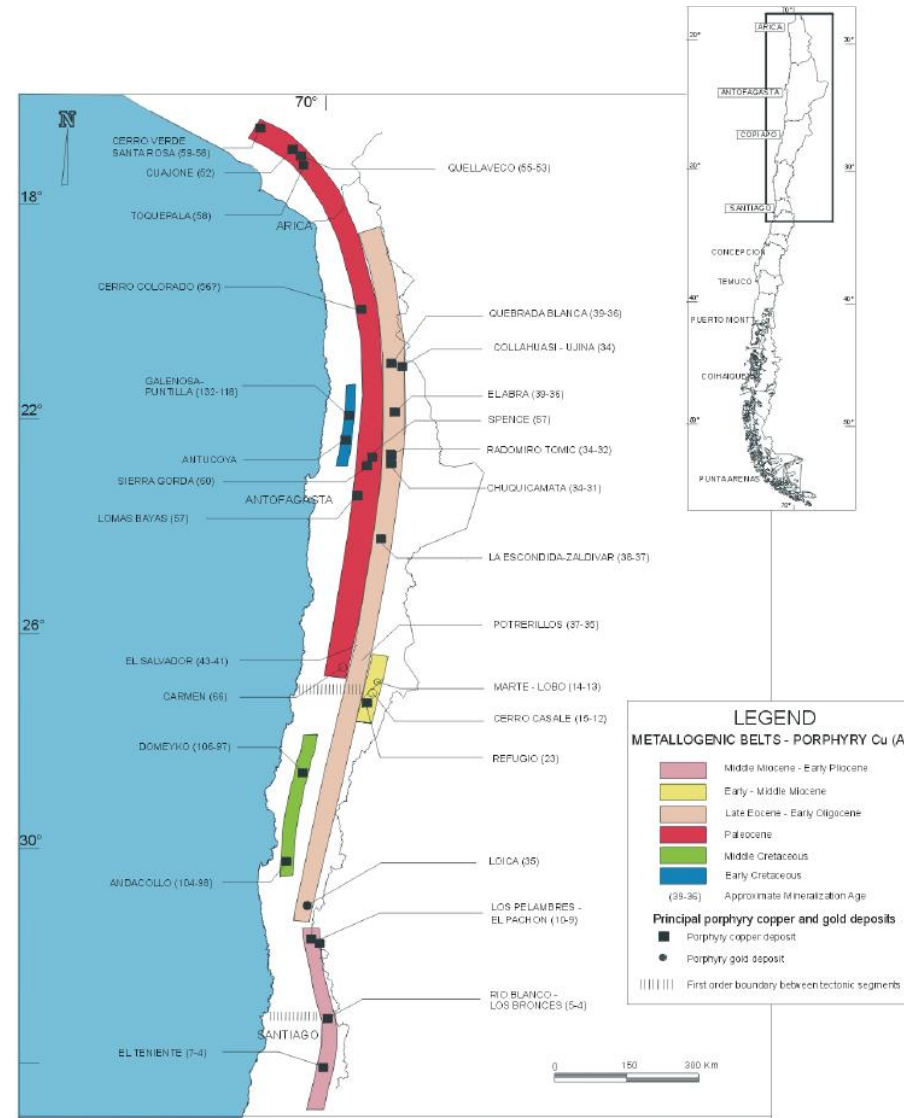
CODIGO CHILENO

- “la Certificación de Prospectos de Exploración, Recursos, y Reservas Mineras puede constituirse en una **tarea multidisciplinaria** en la que por la naturaleza del negocio minero puede requerir de la participación de expertos, especialistas, y Personas competentes Calificadas en **áreas geológicas, mineras, metalúrgicas**, medio ambientales, y legales especializadas.”

Recursos identificados

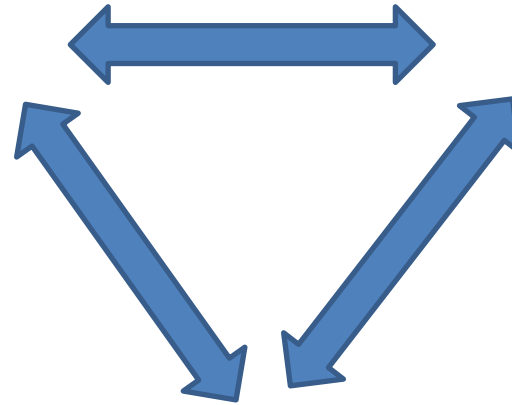
- Inventario recursos publico 2009 (61).
 - NI43-101, reporte anuales, etc.
- Chile, hay más de 600 Mton cobre fino en recursos
- Producción anual
 - **Chile 5.3 Mton**
 - **Mundial 16.3 Mton**

Fuente: Sernageomin y Cochilco



Modelamiento Geológico

**Conceptualización
geológica**



**Construcción de
modelos**

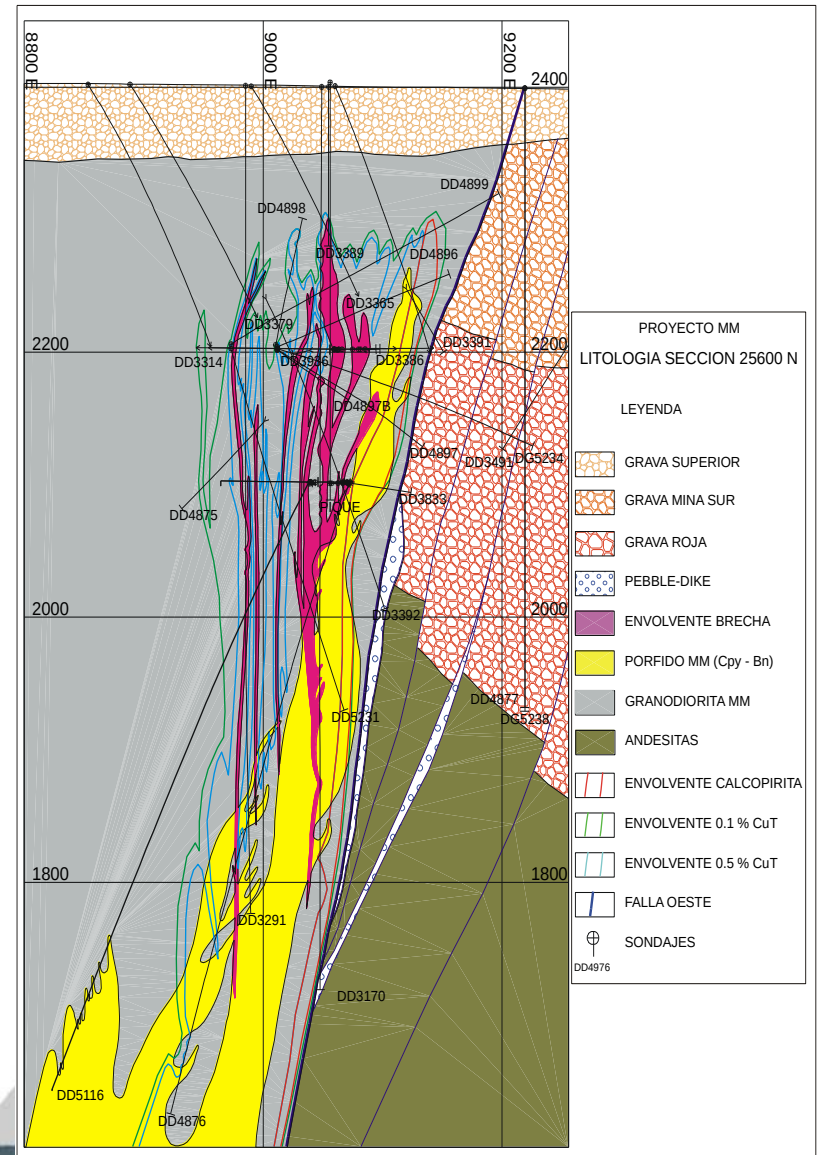
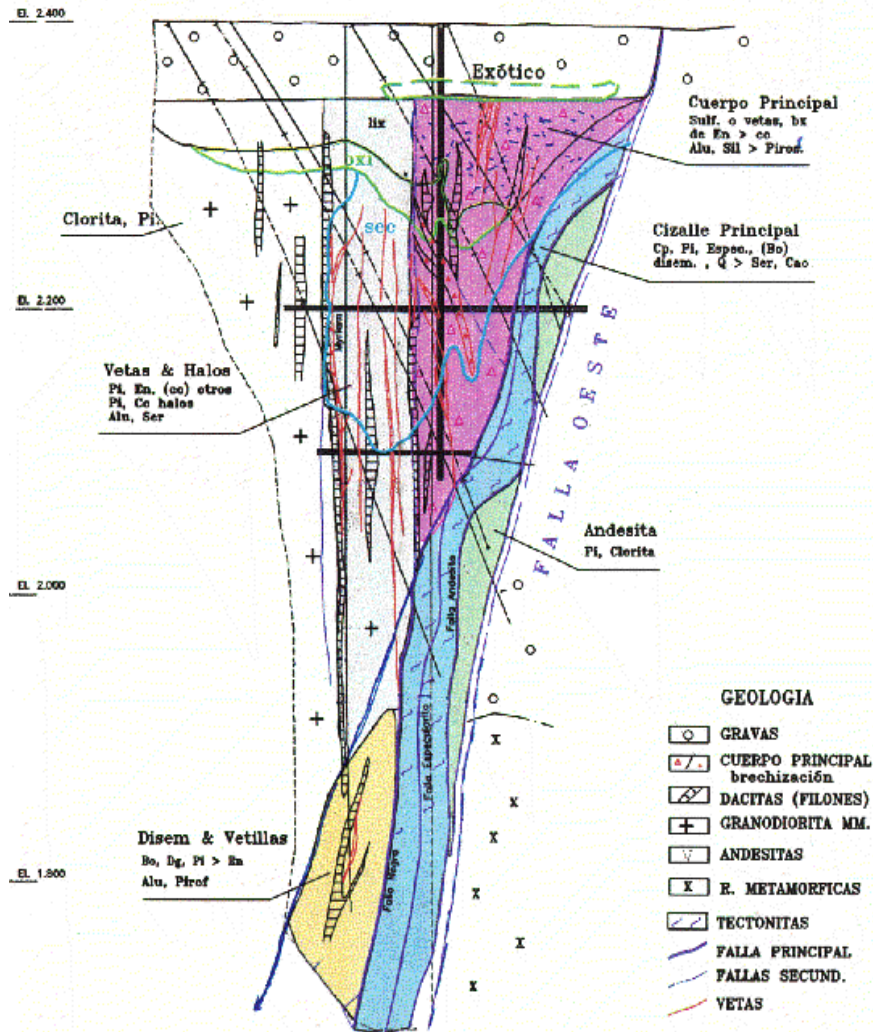
**Análisis exploratorio de
datos geológicos**

- Que modelar?
- Como tomar los datos de mapeo?

Caso 1 - MMH



Conceptualización Modelos Geológicos

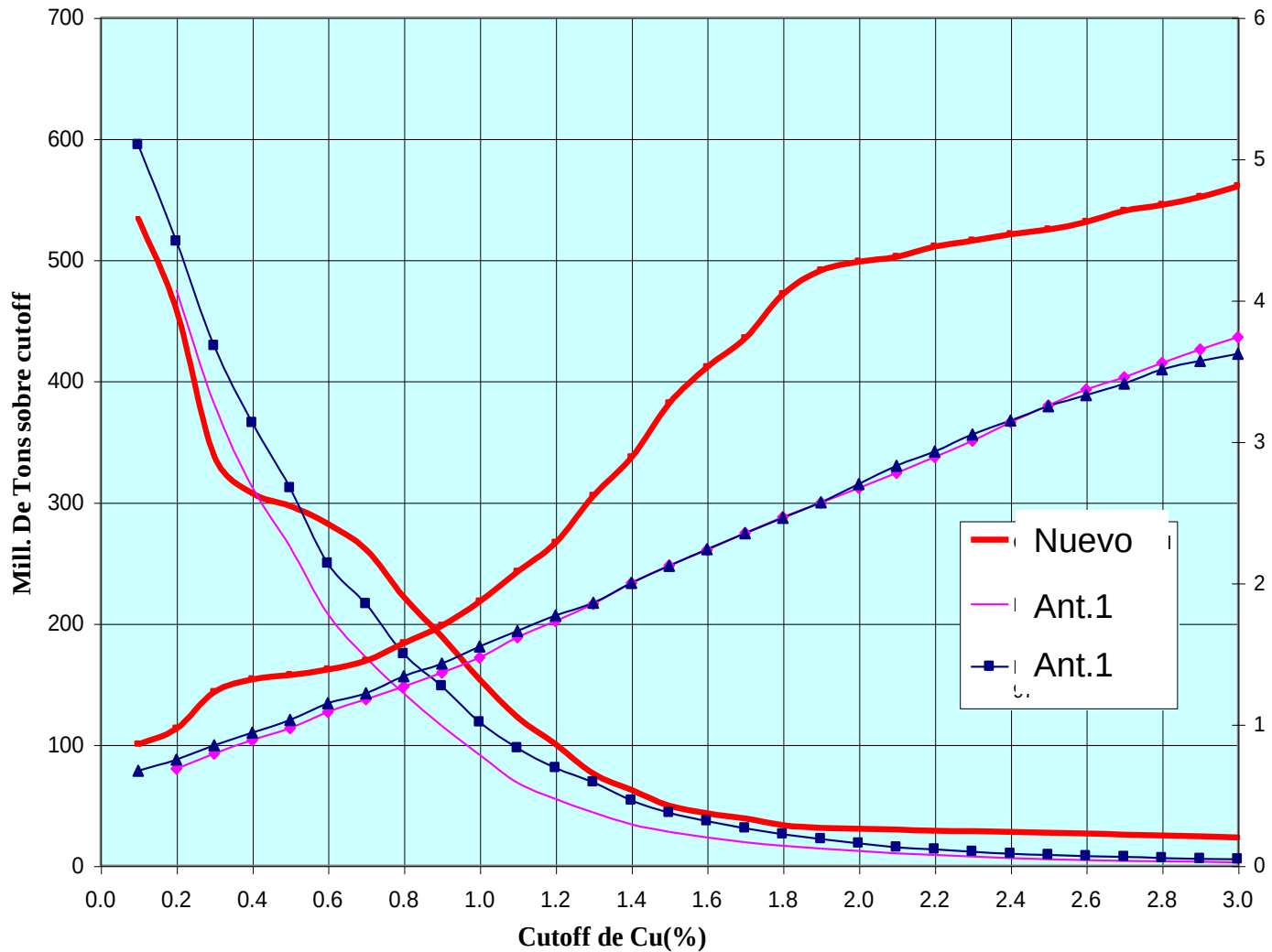


Fuente : G. Muller et al. Congreso geológico Chileno 2004

Diferencias entre Modelos Geológicos

Antiguo	Nuevo
Escala de Interpretación: 1:1000	Escala de Interpretación: 1:500
Intepretación basada en muestras compositadas → alisa zonas de alta ley	Interpretación basada en soporte de muestra, cada 1.5 metros (Cu y As) → Permite definir controles de la mineralización dando continuidad a los cuerpos de alta ley (BRECHAS)
Hipótesis genética: establece un yacimiento transportado desde su origen y fuertemente fallado.	Hipótesis genética: indica la formación de un Yacimiento In Situ. Confirmación de hipótesis: sondajes de validación
Yacimiento truncado en profundidad por fallamiento	Mineralización en profundidad cambia gradualmente a diseminación asociada a ambiente de pórfido de cobre

Curva Tonelaje Ley

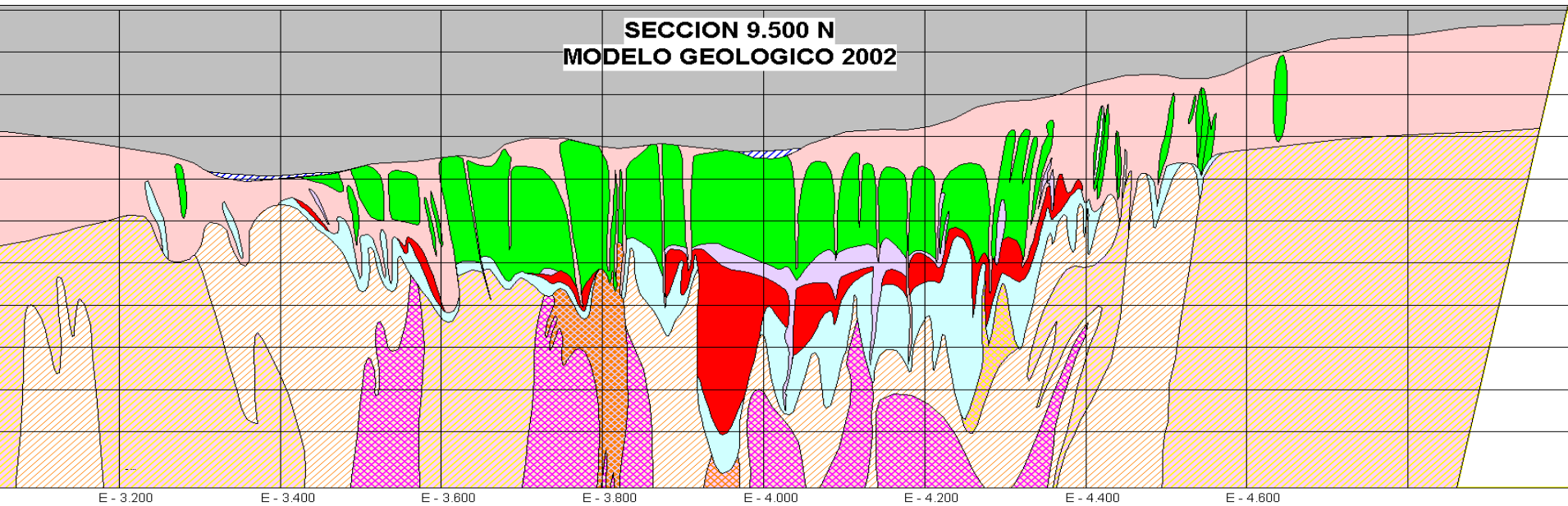


Fuente : G. Muller et al. Congreso geológico Chileno 2004

Caso 2 – RT Sulfuros

- Pórfido de Cu y Mo Clase Mundial, con recursos de:
 - 6.900 Mt @ 0.37% CuT - 0,014% Mo
- Producción desde 1996 en óxidos
 - Deja expuestos los Sulfuros
- 2003 perforación de 63000 m en sulfuros

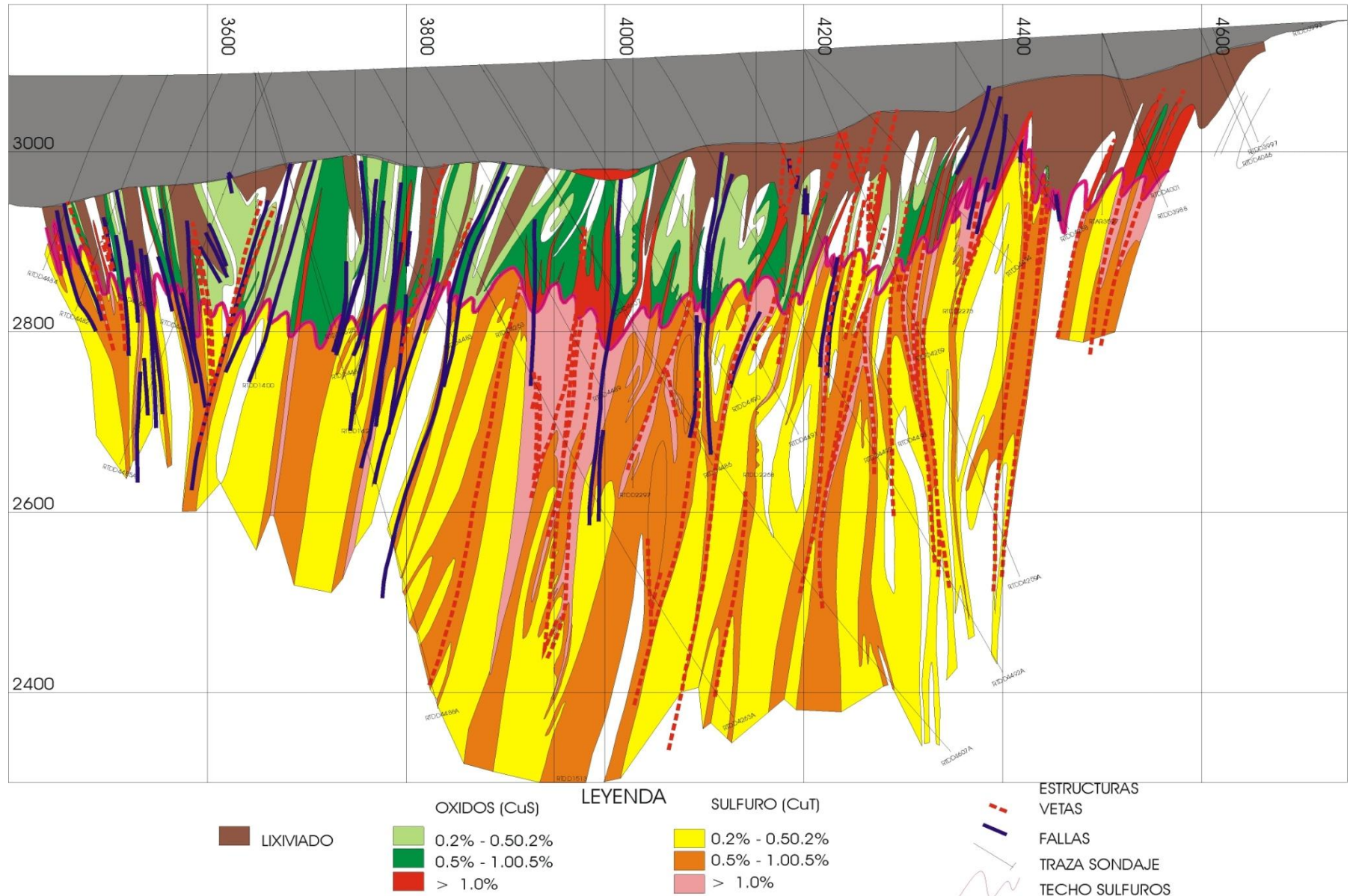
Modelo Geológico Antiguo



Fuente: J. Díaz A. et al. "Geología de los Sulfuros de Radomiro Tomic (RT): Nuevos Antecedentes"

Congreso Geológico Chileno 2010

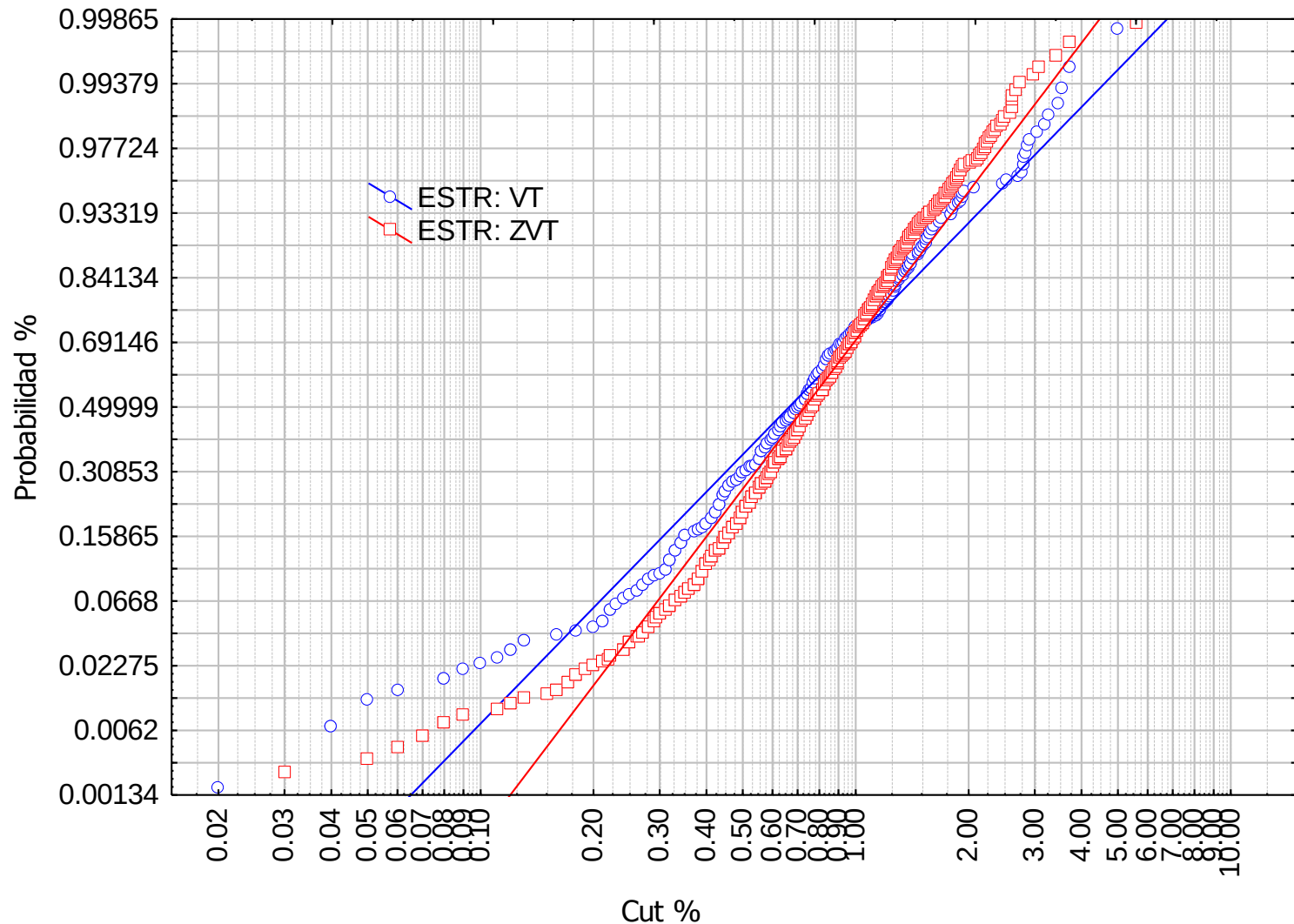
CODELCO CHILE - DIVISION NORTE
MINA RADOMIRO TOMIC
ISOLEYES - SECCION 9500 N



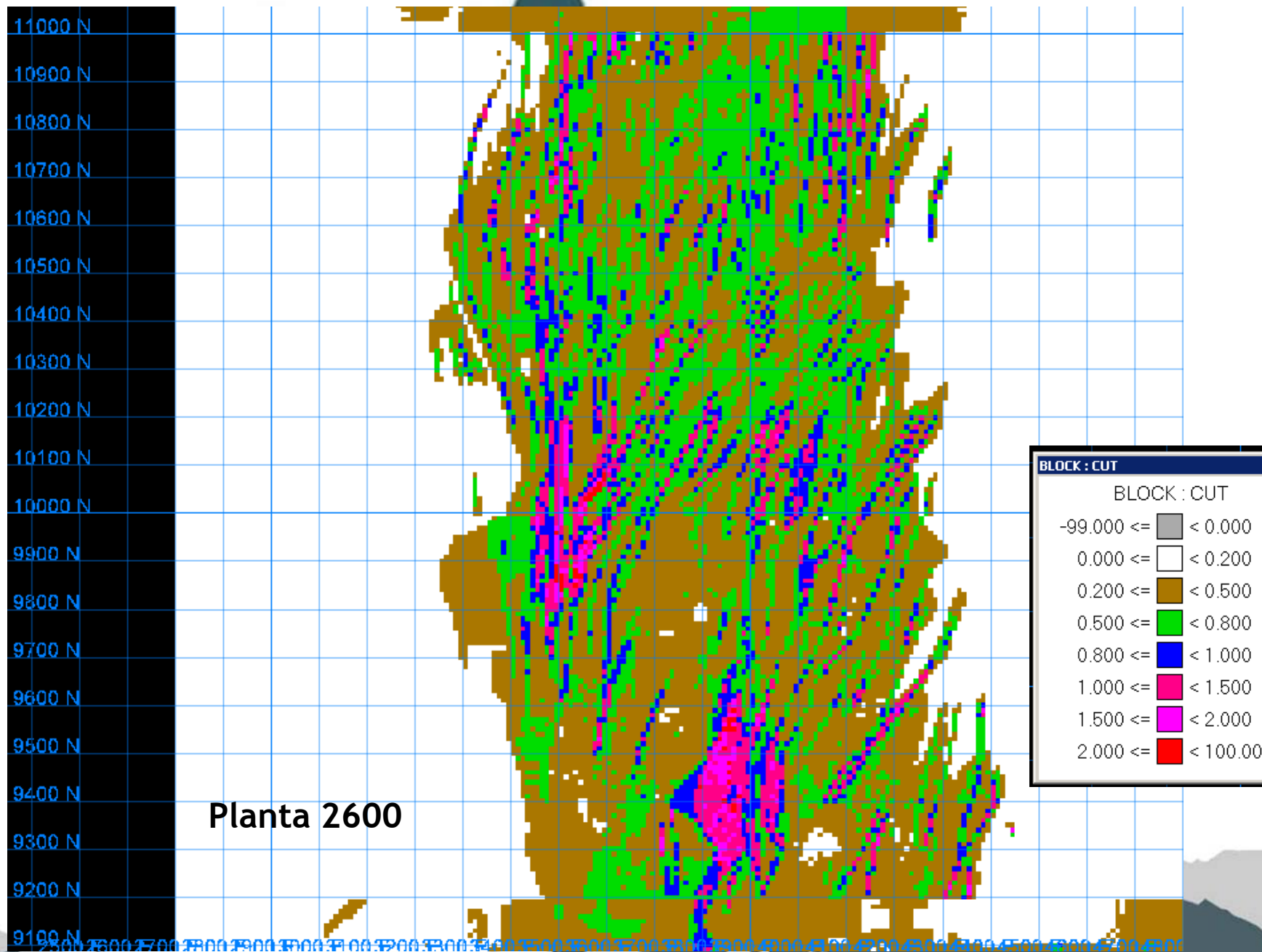
Fuente: J. Díaz A. et al. "Geología de los Sulfuros de Radomiro Tomic (RT): Nuevos Antecedentes"
Congreso Geológico Chileno 2010

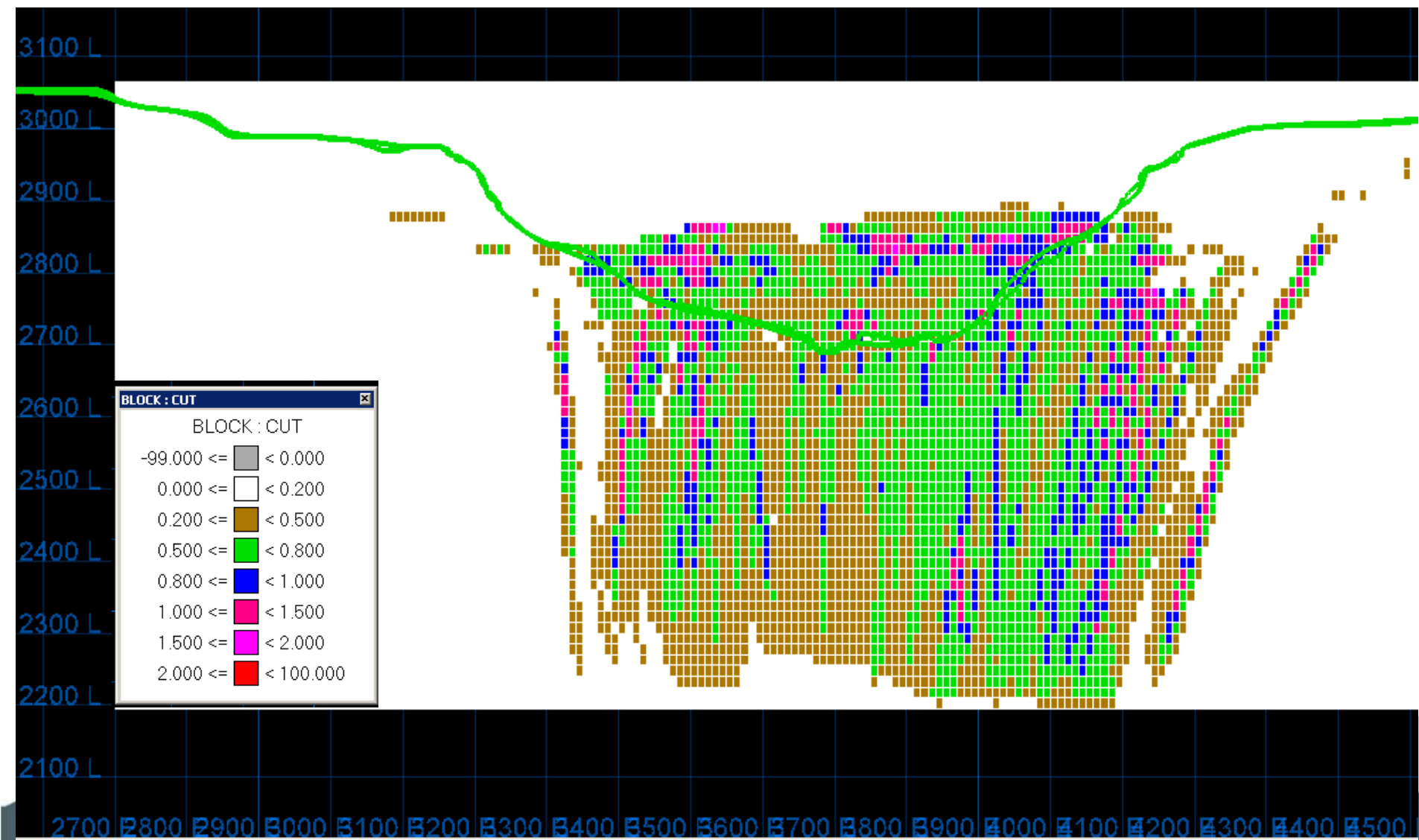
Cruce de mapeo estructural con leyes en sulfuros

Probability Plot: CUT SULFUROS



Modelo RT Sulfuros

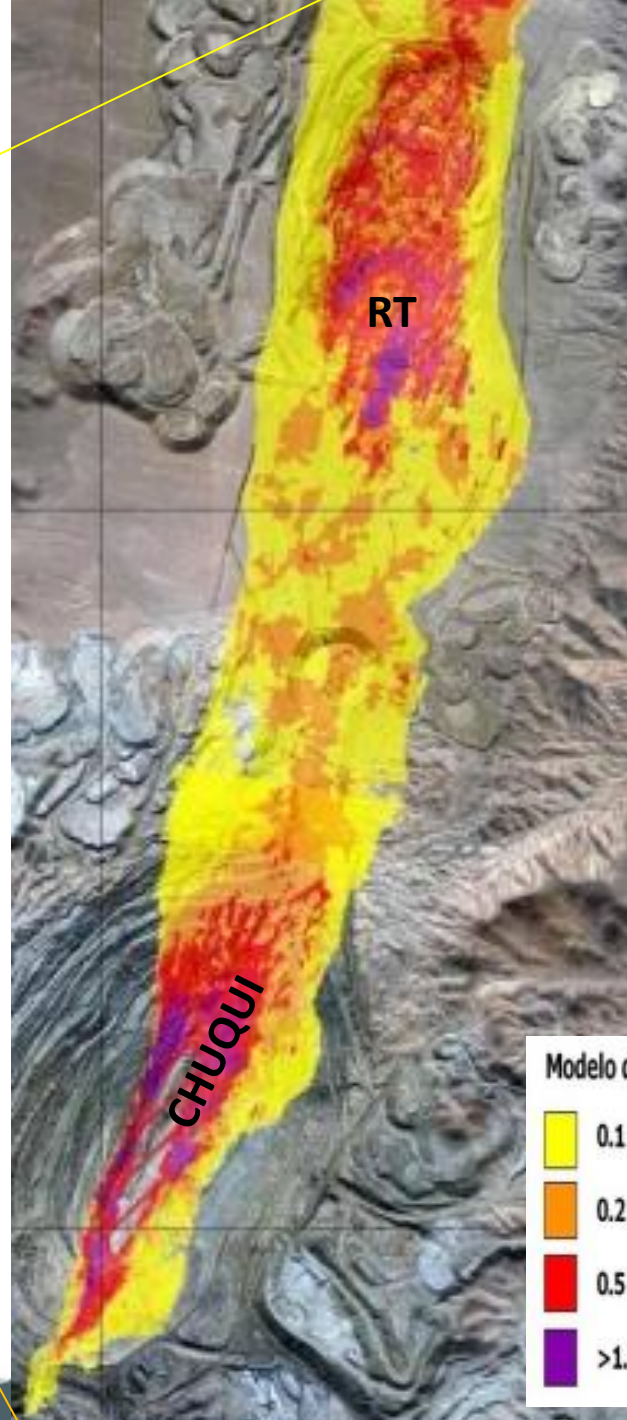
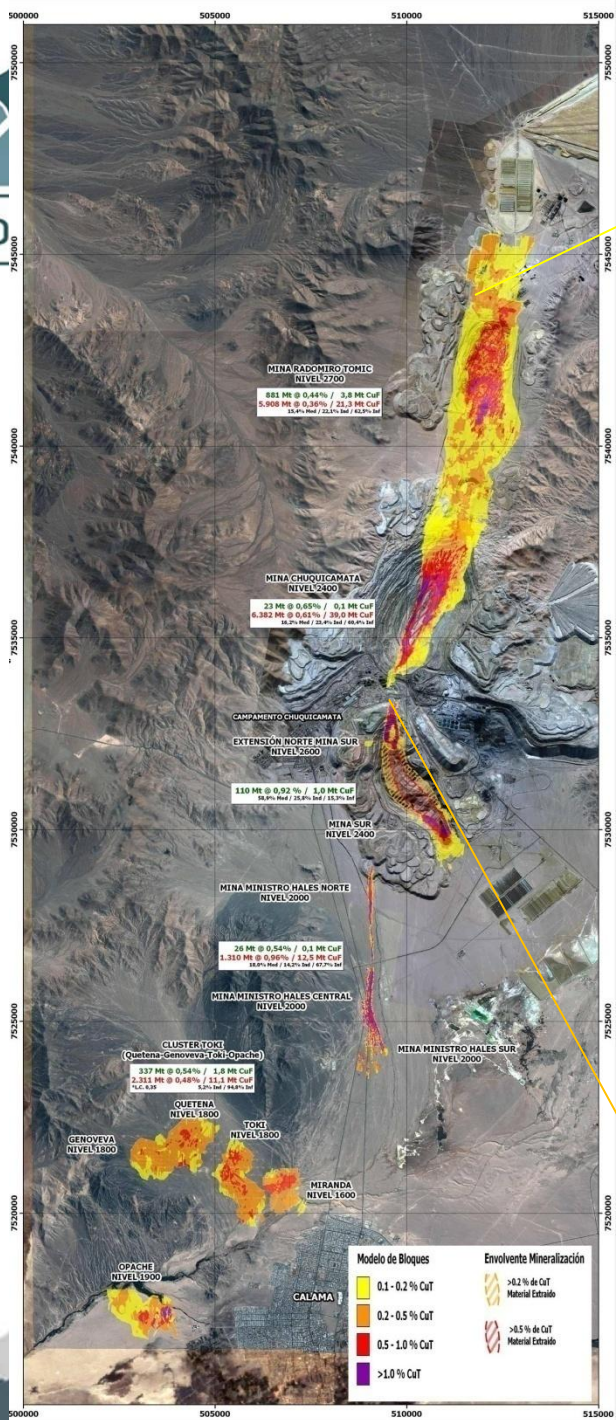




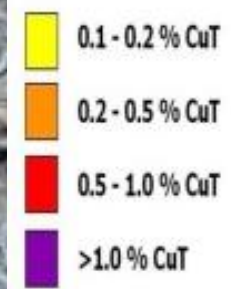
Control estructural en bancos



Fuente: J. Díaz A. et al. "Geología de los Sulfuros de Radomiro Tomic (RT): Nuevos Antecedentes"
Congreso Geológico Chileno 2010



Modelo de Bloques



Conceptualización Modelos Geológicos

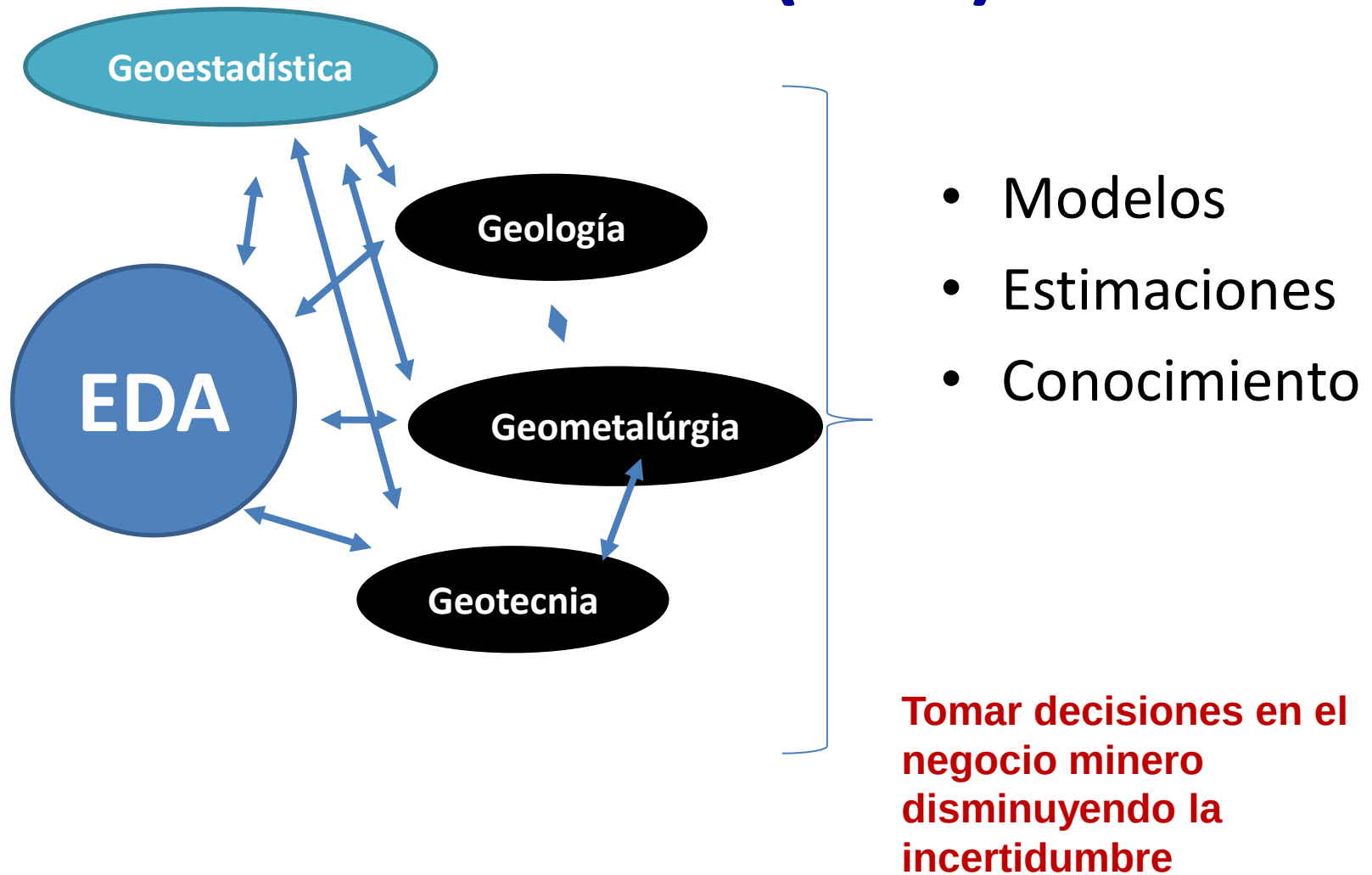
- Modelo geológico -> representación de realidad.
 - Unidades de acuerdo atributos geológicos: litología, alteración, zona mineral, dominios estructurales.
- Conocimiento de la geología cambia con el tiempo.

La correcta conceptualización geológica es clave para la caracterización de un proyecto minero

- **Continuamente validar las hipótesis de trabajo**



Análisis Exploratorio de Datos (EDA)



- Que modelar?
- Como tomar los datos de mapeo?

Construcción modelos geológicos

- **Modelos determinísticos**

- **Contorneo a mano**

- Proyección de polígonos, un set de interpretaciones
 - Dos set de interpretaciones planta y sección

- **Modelos implícitos**

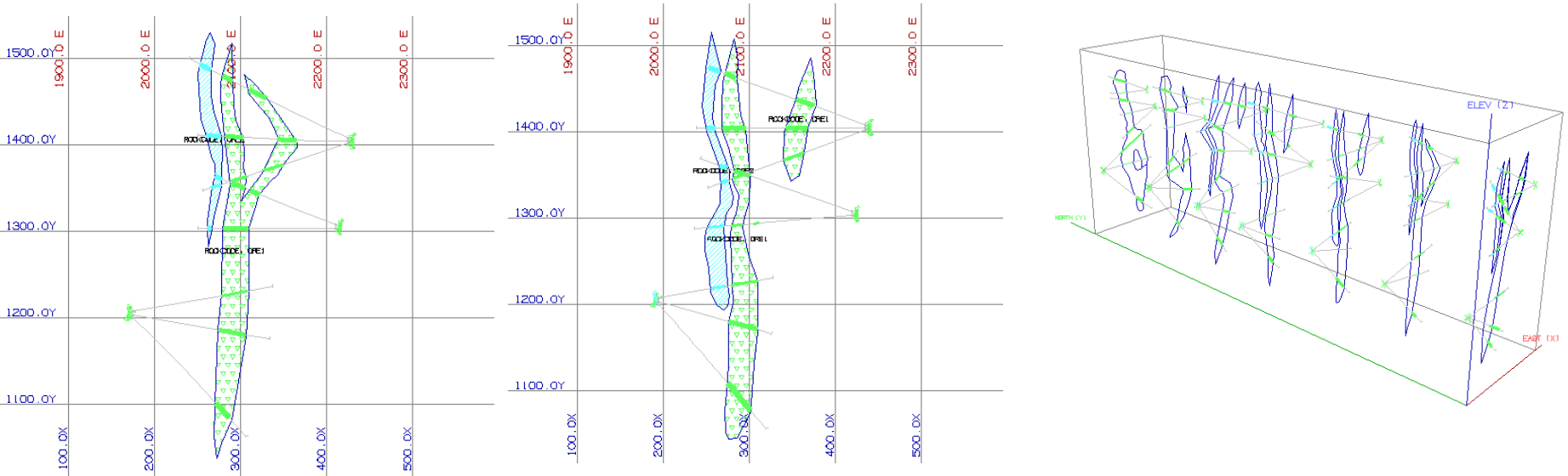
- **Otras aproximaciones numéricas**

- **Modelos estocásticos**

- **Métodos geoestadísticos**

- Sequential indicator simulation, Truncated Gaussian simulation, Plurigaussian simulation, Multiple-point simulation

Contorneo manual -> wireframe



Aproximación tradicional



Modelamiento implícito

- Técnica importada desde el campo de la computación gráfica
- El objetivo es crear una superficie de representación de datos 3d provenientes de scanners lasers

3d points

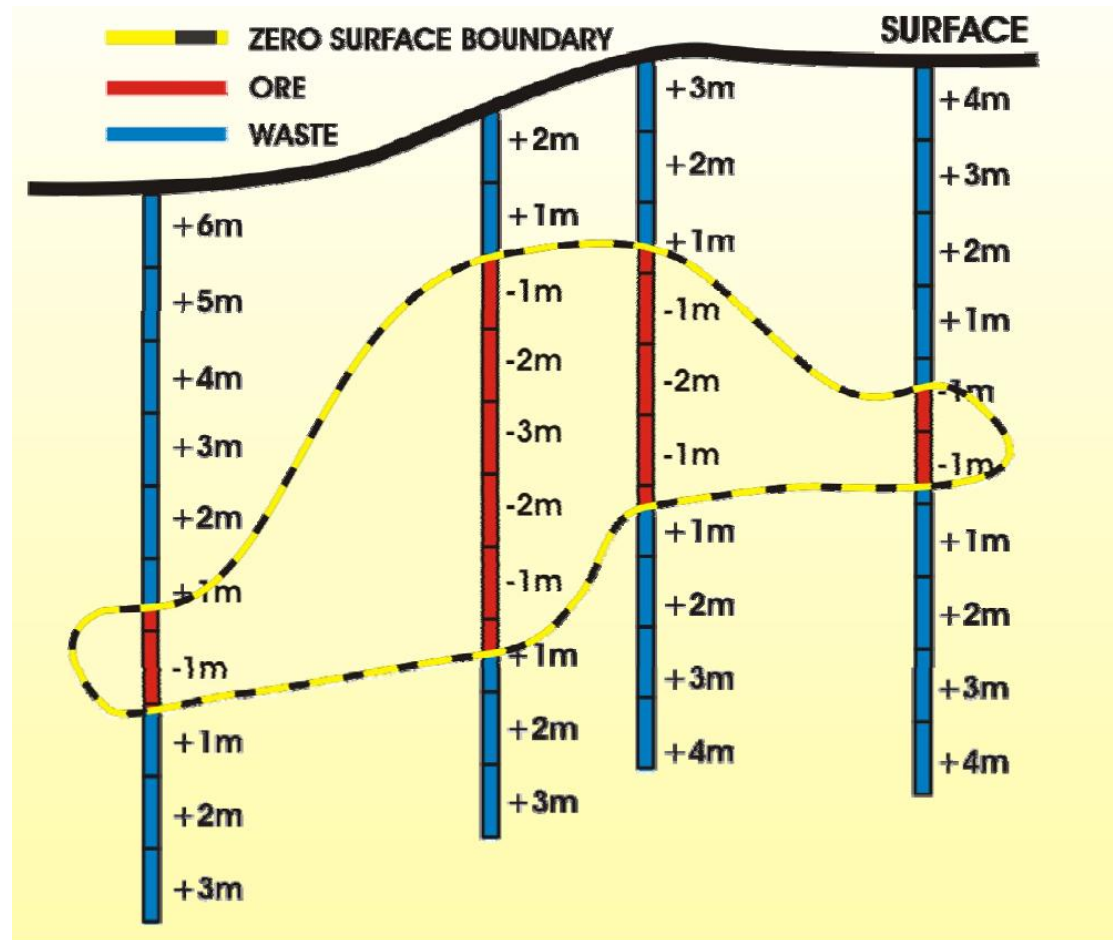


Surface representation



Pasos modelamiento implícito

- Calcular distancia “distancia al contacto más cercano”
- Interpolación y se busca distancia 0

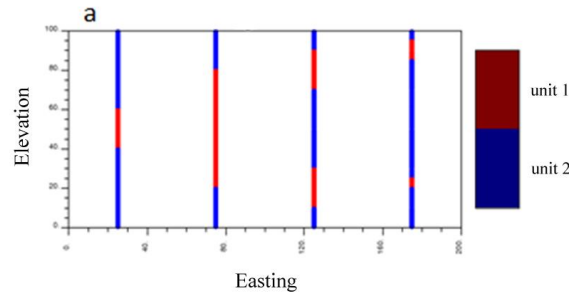


Modelamiento implícito

Ejemplo 2 unidades

Ejemplo 2 unidades
geológicas:

- Para cada muestra es calculada la distancia al contacto más cercano

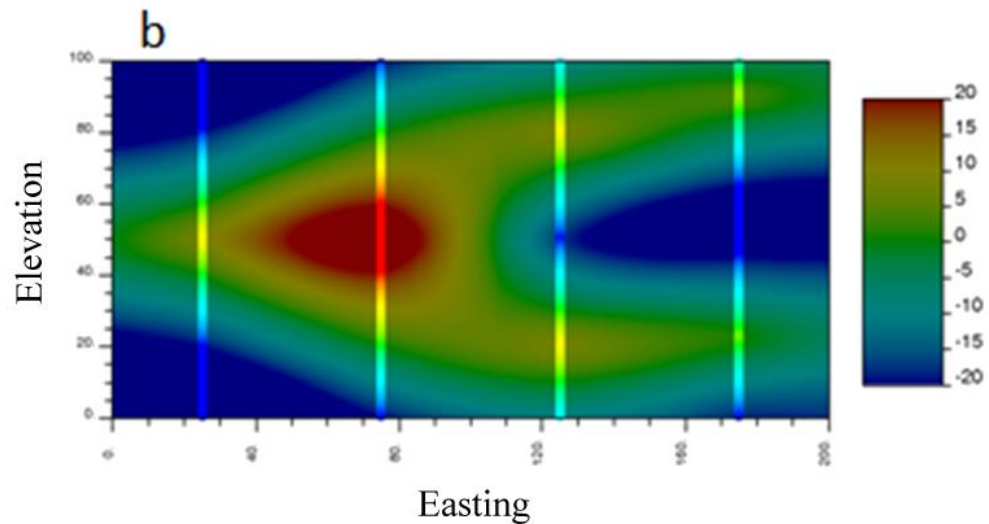
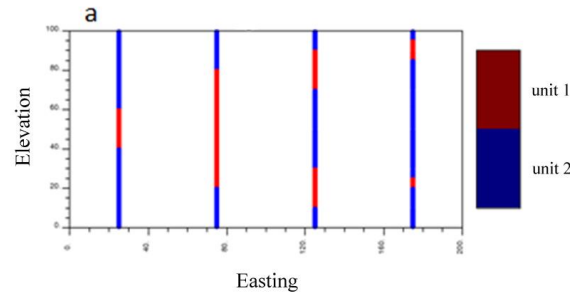


Modelamiento implícito

Ejemplo 2 unidades

Ejemplo 2 unidades geológicas:

- Para cada muestra es calculada la **distancia al contacto más cercano**
- Interpolación de la distancia en el dominio

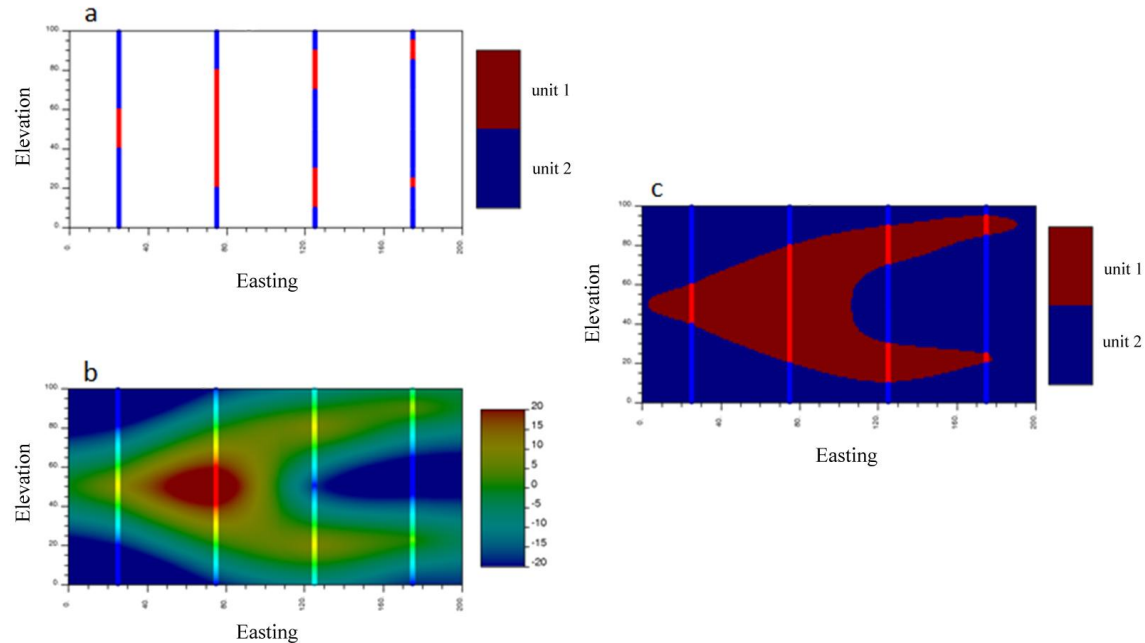


Modelamiento implícito

Ejemplo 2 unidades

Ejemplo 2 unidades geológicas:

- Para cada muestra es calculada la **distancia al contacto más cercano**
- Interpolación de la distancia en el dominio
- Se extrae la distancia cero isosuperficie como unidad borde geológica

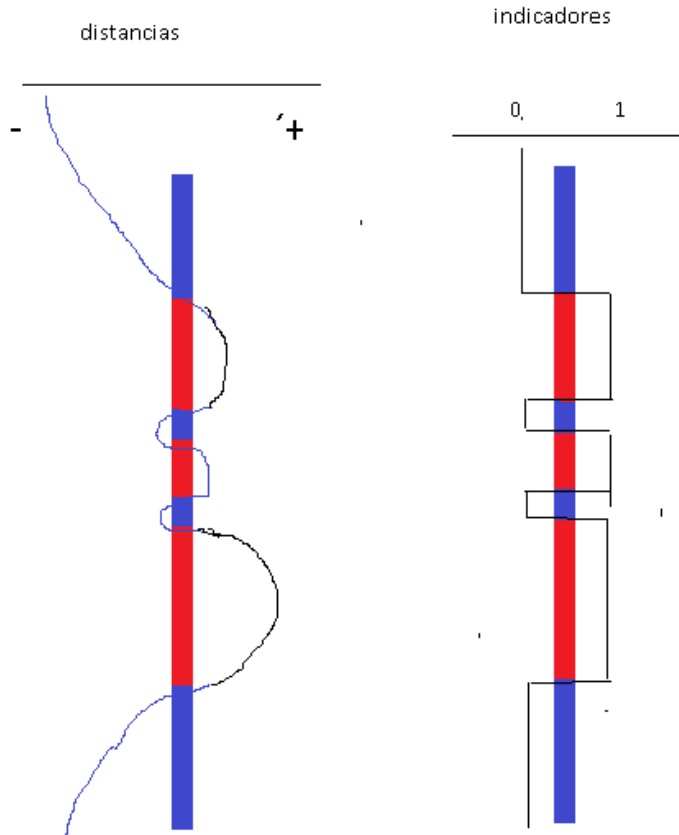


Fuente A. Cáceres, X. Emery, Luis Aedo, Osvaldo Gálvez et al. "Stochastic geological modelling using implicit boundary simulation" Geomin 2011

Modelamiento implícito vs Kriging de indicadores

- La mayor ventaja es que esta contiene más información que los indicadores.
- Más allá de la unidad geológica de cada muestra la distancia hasta el contacto más cercano informa acerca de la configuración de la unidad geológica

Consideraciones



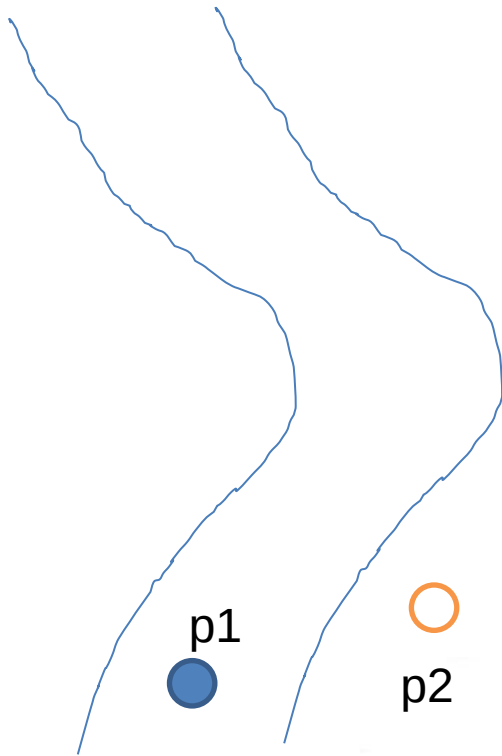
Debido a la codificación de distancia al contacto los interceptos más largos tendrán mayor “peso” (distancias mayores) en el momento de la interpolación que los interceptos de menor tamaño.

- Lo cual puede o no estar acorde al fenómeno:
 - Pensar en estratos de cm de espesor vs cuerpos lenticulares

Ciego siguiendo un camino sin bastón (indicator)

Depende sólo de lo que siente en
sus pies

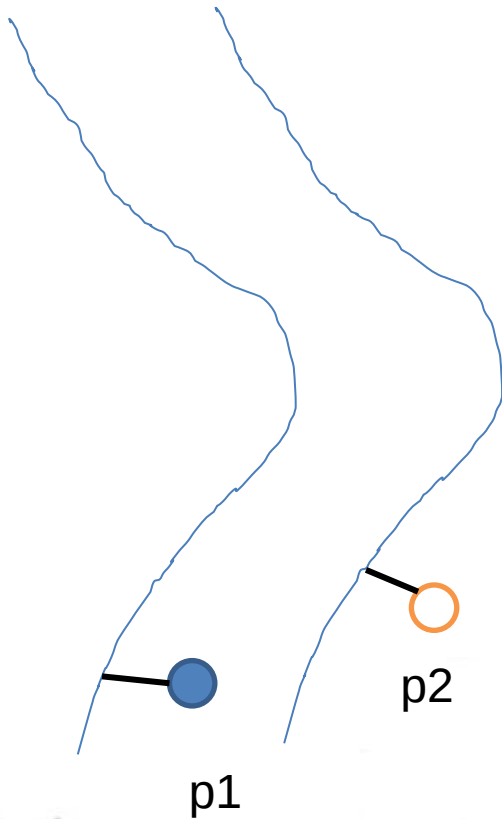
Fuera (0)
Dentro (1)



Ciego siguiendo un camino con baston telescopico

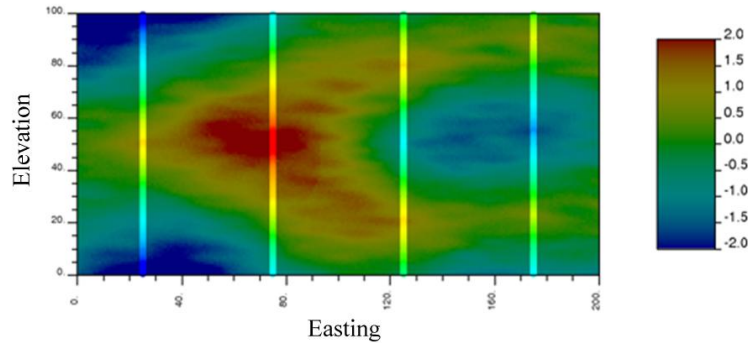
Depende sólo de lo que siente en
sus pies
También sabe la distancia al borde

Fuera (0)
Dentro (1)

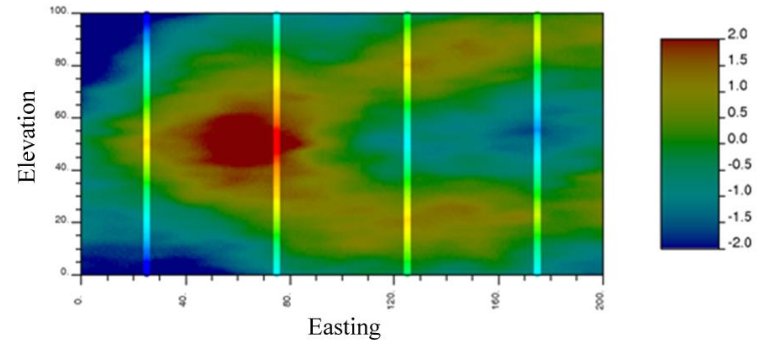


Simulación implícita de borde

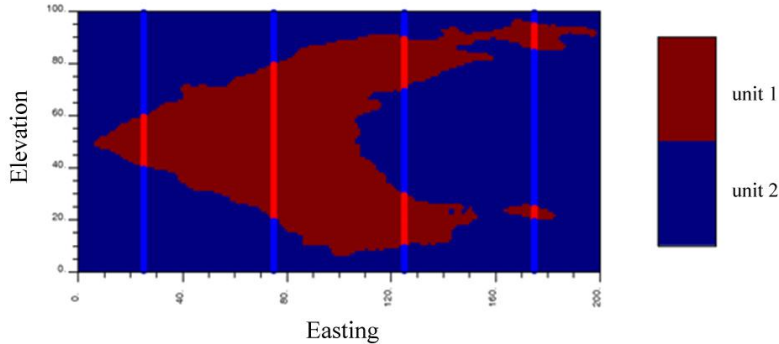
Realisation #1



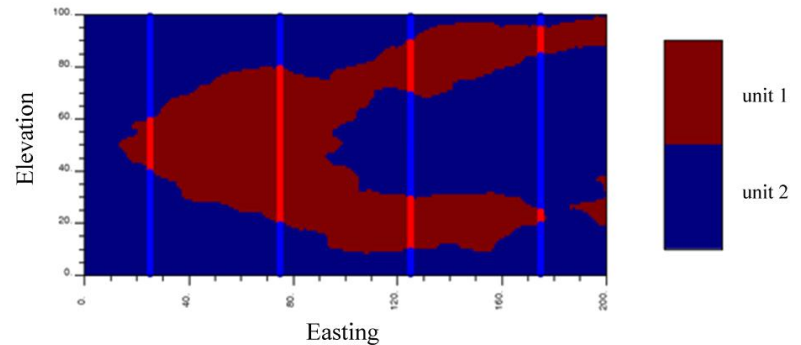
Realisation #2



Realisation #1

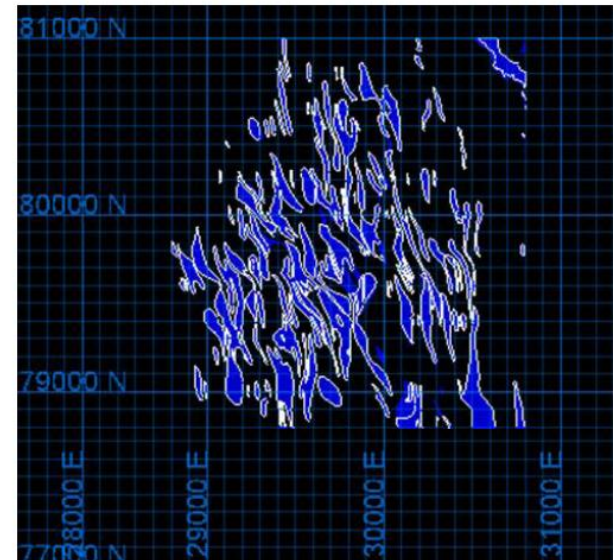
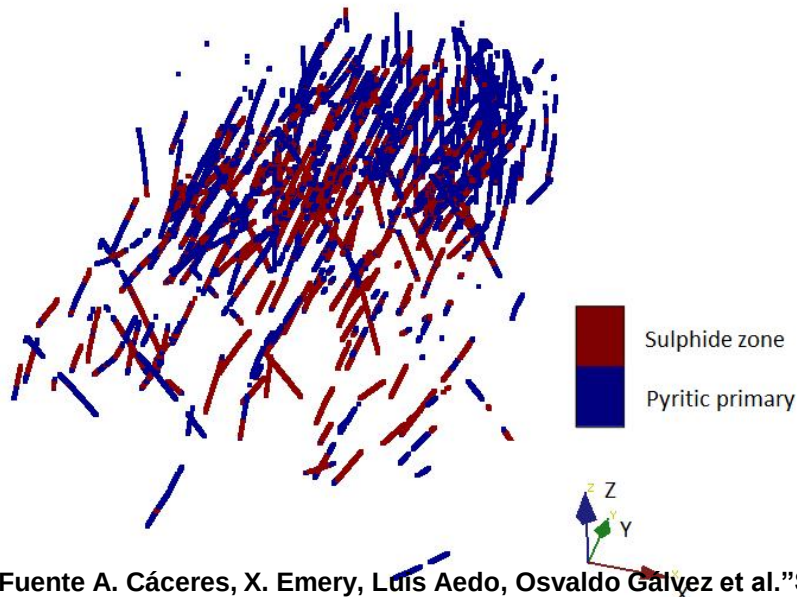


Realisation #2



Caso estudio

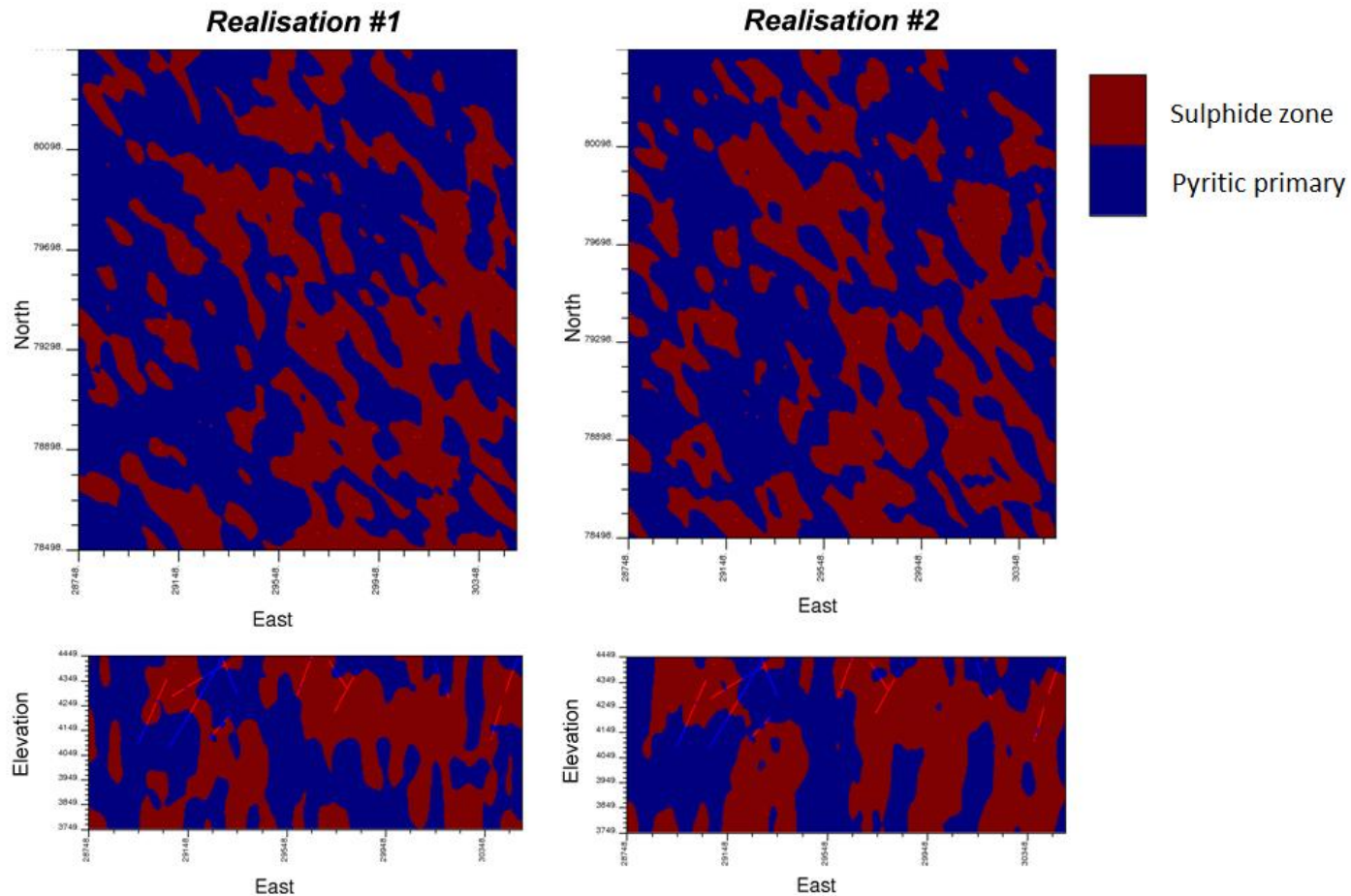
- **Presentación de los datos**
 - Rosario Oeste
 - 53,735 diamond drill hole samples with information on mineral zones: **pyritic primary** / **sulphide zone**



Fuente A. Cáceres, X. Emery, Luis Aedo, Osvaldo Galvez et al. "Stochastic geological modelling using implicit boundary simulation" Geomin 2011

Aplicación

- Ejemplo de realizaciones de simulación condicional

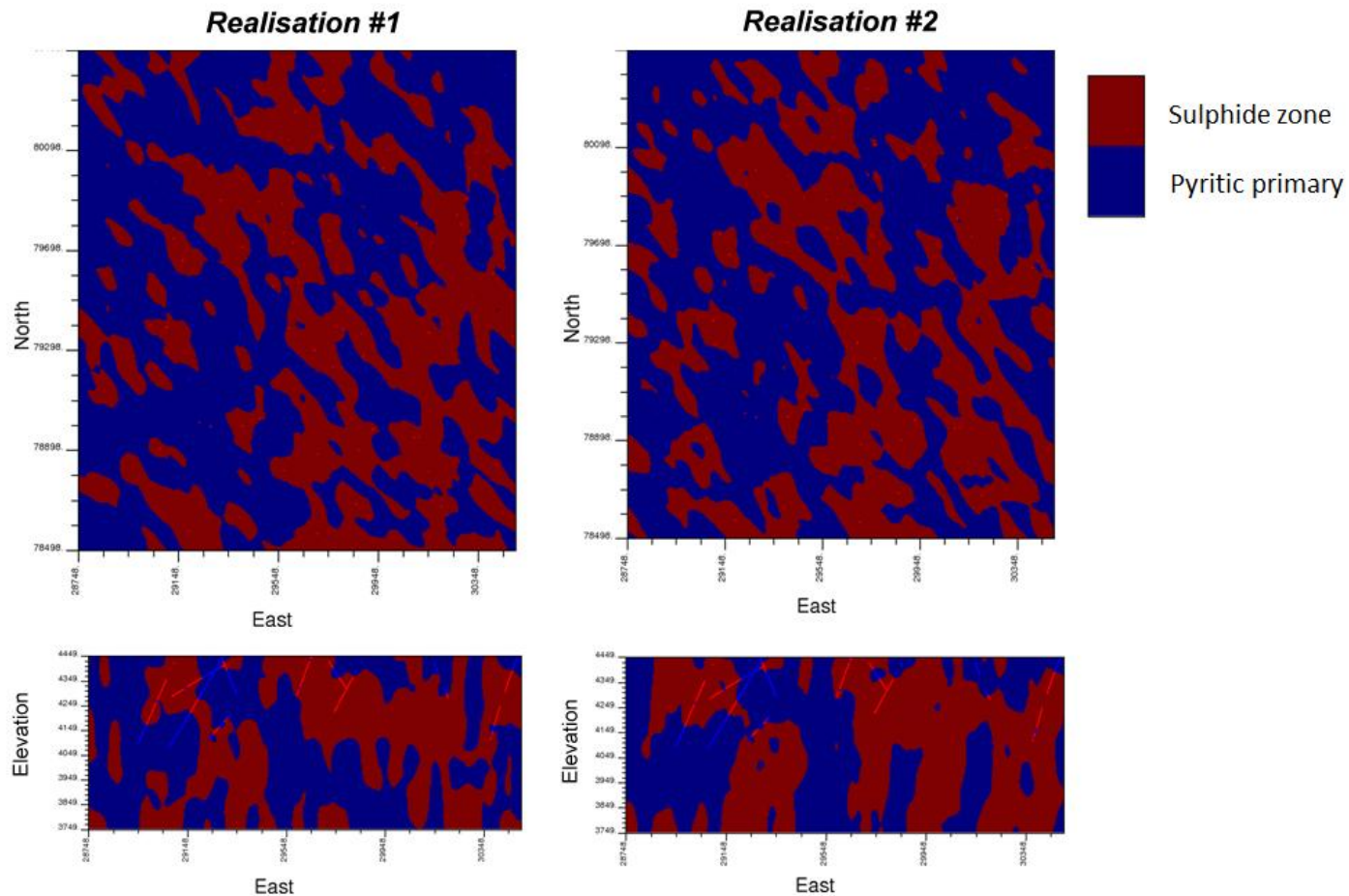


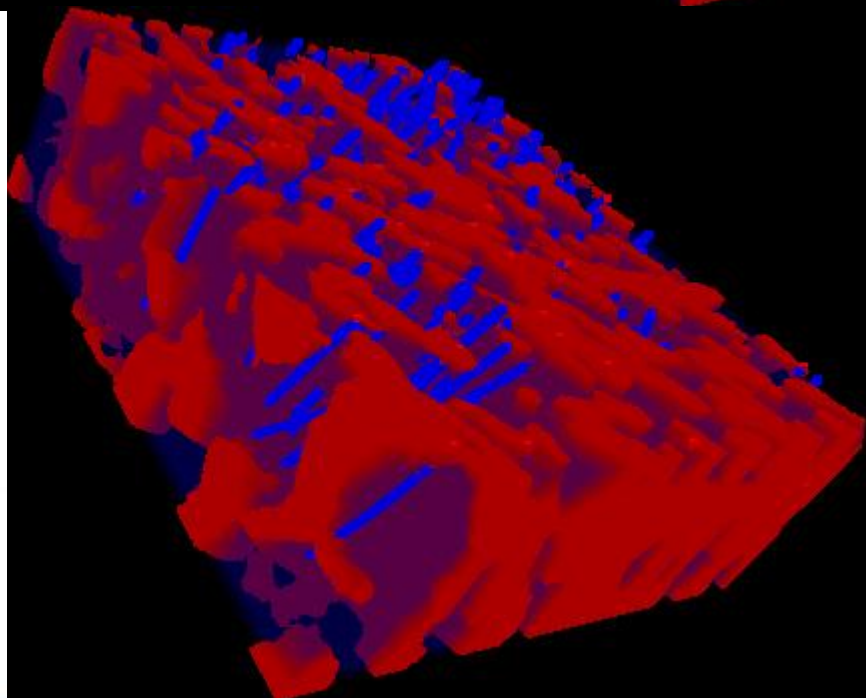
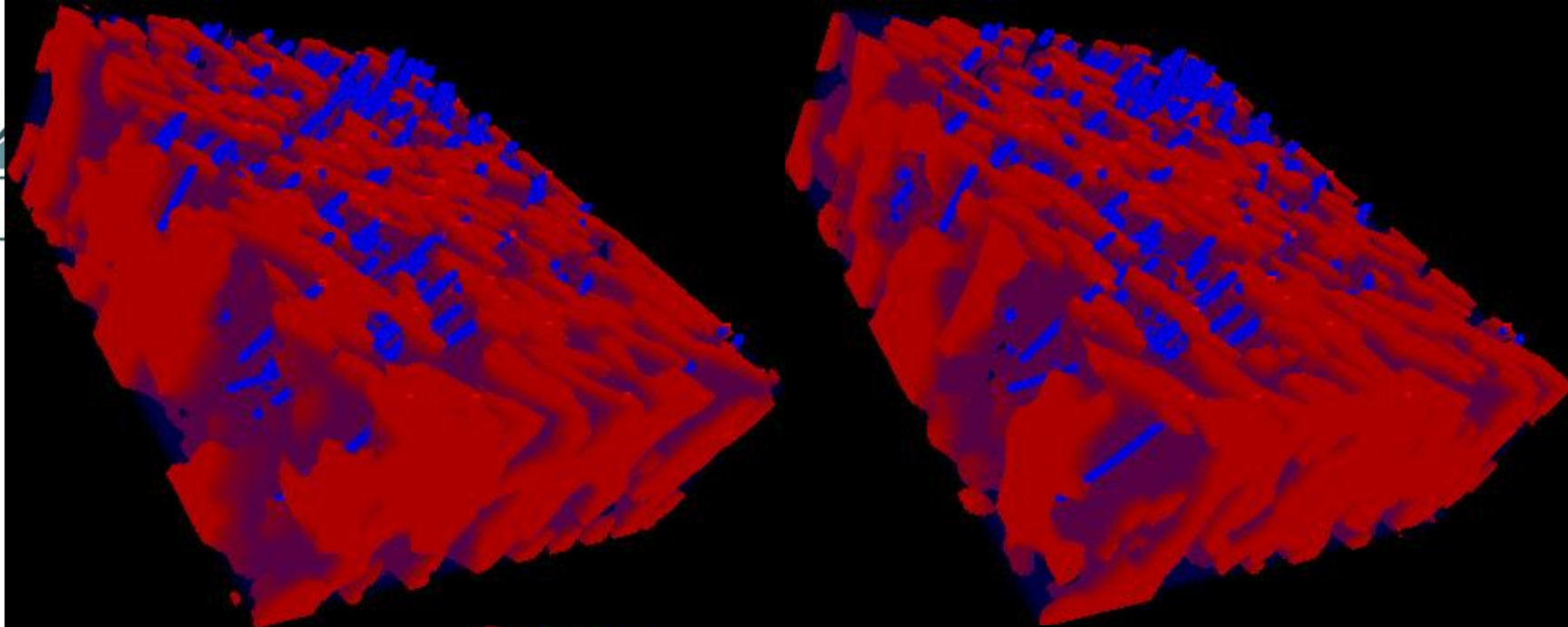
Evaluación de métodos

- **Validación cruzada geológica**
 - Dos métodos fueron comparados:
 - **implicit boundary simulation (IBS)**
 - **sequential indicator simulation (SIS)**
 - Remoción de cada sondaje y simulación de zonas minerales, utilizando los sondajes restantes → opción de comparar “real” vs “simulado”

Aplicación

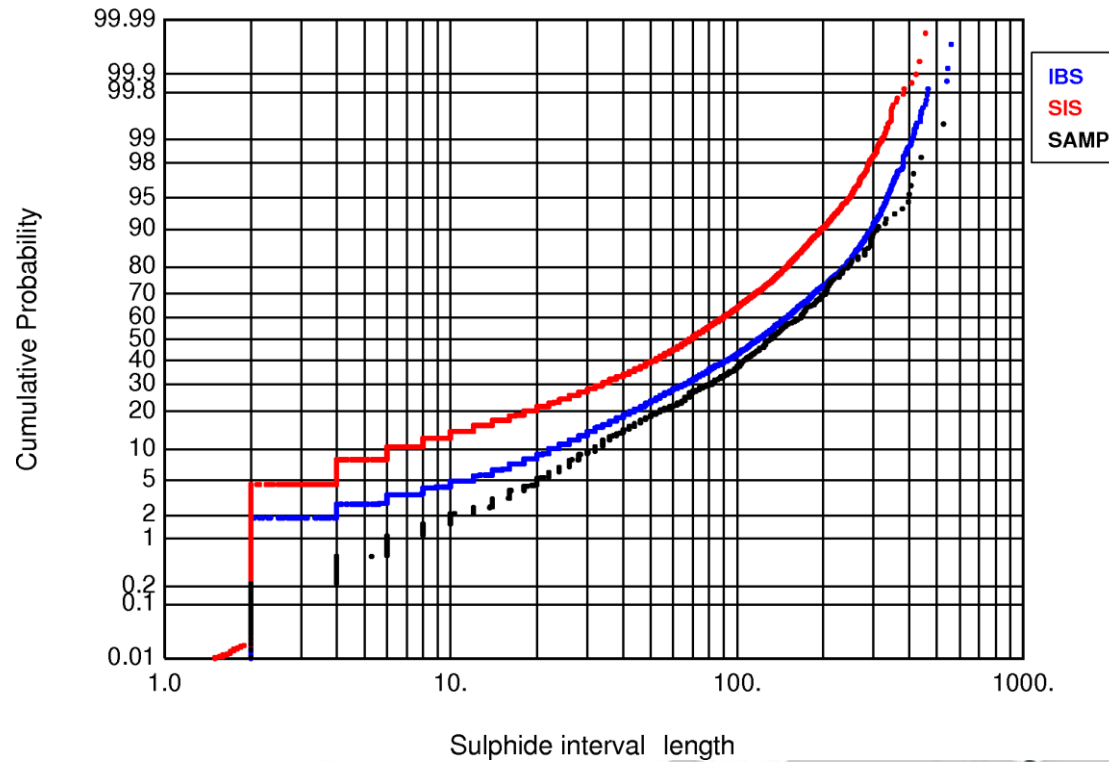
- Ejemplo de realizaciones condicionales





Application

- Reproducción de la distribución intervalos de sulfuros



- La simulación implícita de bordes reproduce mejor el variograma de indicador y distribución de largos de los sulfuros

Esta **reproduce borde regulares y patrones conectados**

- A diferencia SIS, IBS que usa la distancia al contacto más cercano contiene más información de las zonas minerales y puede mejorar la predicción



Estimación de recursos minerales



Estimación de recursos minerales (1)

- Depósitos de menor ley y más marginales
 - Geología más compleja
 - Más elementos o análisis a estimar
 - Sulfuros: CuT, Mo, As, Au, Sb...
 - Óxidos: CuT, cobre soluble, QLT
- > Existen relaciones entre los distintos elementos o análisis**
- > Tabla periódica**

Estimación de recursos minerales (2)

- Geometalurgia
 - Busca establecer dominios que controles y para la predicción en los procesos
 - **Mineralogía sulfuros (mapeo, microscopia y QEMSCAN)**
 - **Calidad de concentrado**
 - Extracciones o recuperaciones
 - Dureza (tratamiento)
 - **Análisis proxy**
 - » **Másivos , baratos, rápidos aplicables sobre sondajes de manera de poder corregionalizar (test de laboratorios caros, lentos y escasos)**

Multivariable

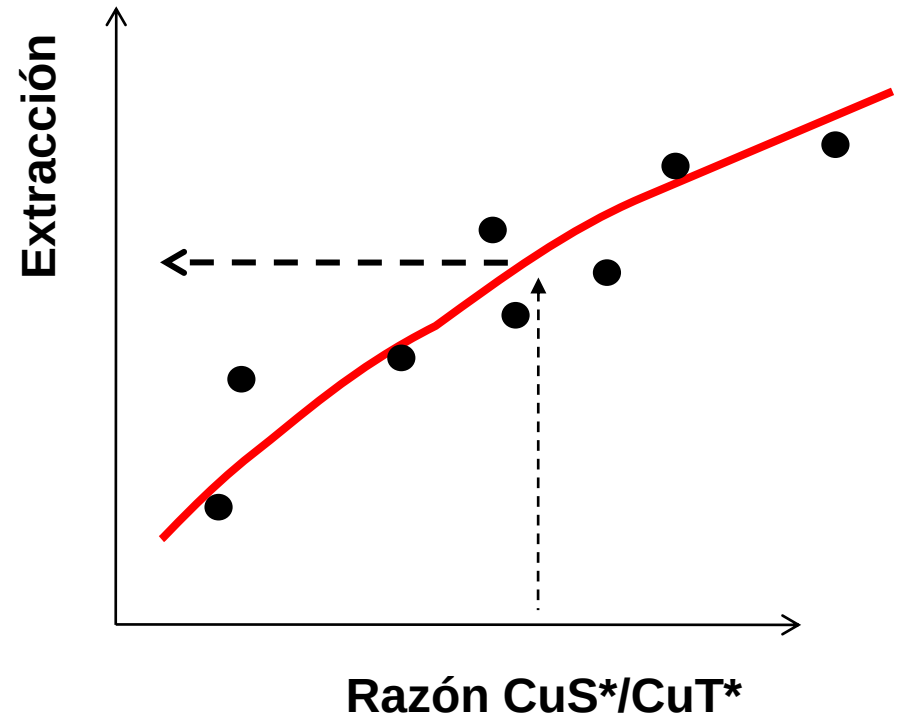
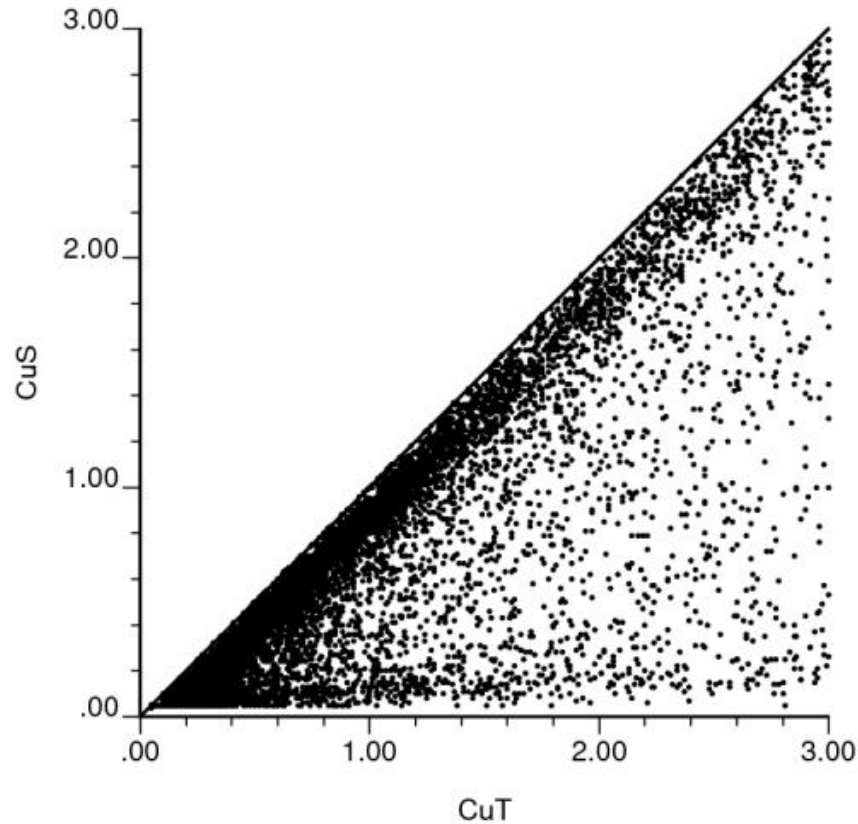
- Tradicional Cokriging
- Investigación multivariables
 - Buscar mejores predictores en términos bivariables
 - Simulaciones (caso isotopico)
 - Step wise, **PCA**, MAF
- Desarrollo procedimiento por Geolnova en colaboración U.de Chile “KMG+MAF”



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Ingeniería de Minas

Predicción multivariable



Caso estudio: Radomiro Tomic

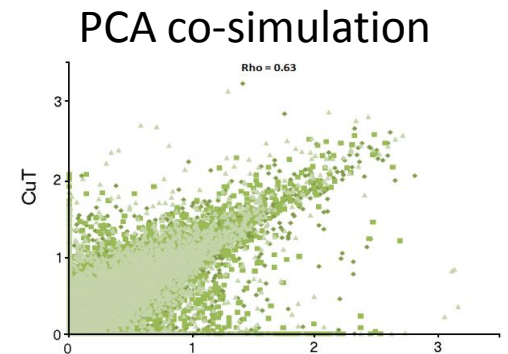
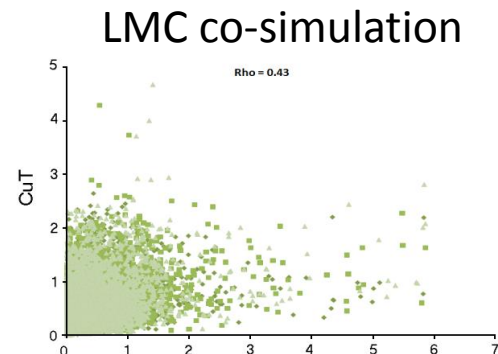
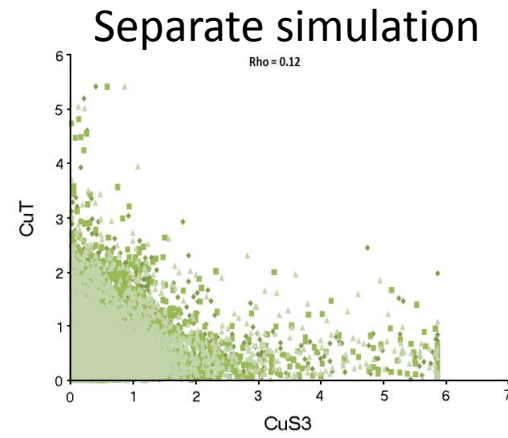
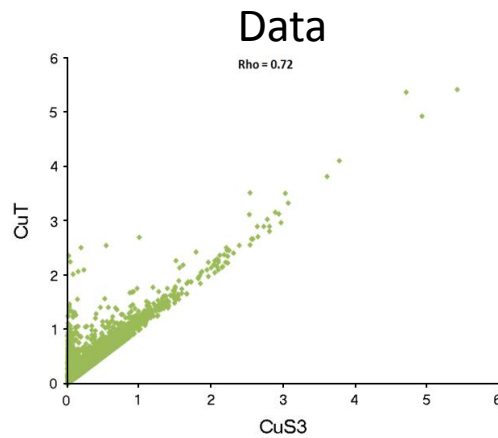
- Zona de óxidos
 - CuT, CuS3 y CuS4)
 - Fe
 - Mo
 - Mn
 - CIT and CIS

Fuente: P. Rivera, X. Emery and E. Magri, A comparison of three geostatistical approaches for co-simulating mineral grades
MININ 2010



Caso estudio: Radomiro Tomic

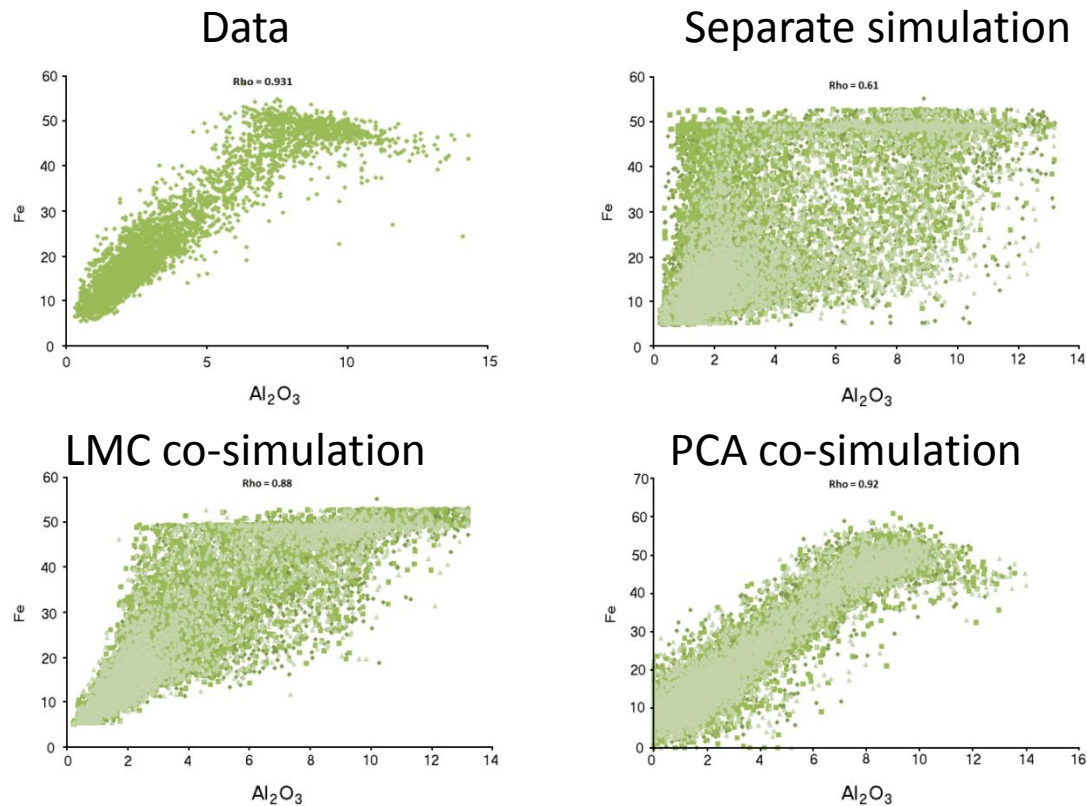
Scatter CuT y CuS3



Fuente: Patrick Rivera, Xavier Emery and Eduardo Magri, A comparison of three geostatistical approaches for co-simulating mineral grades
MININ 2010

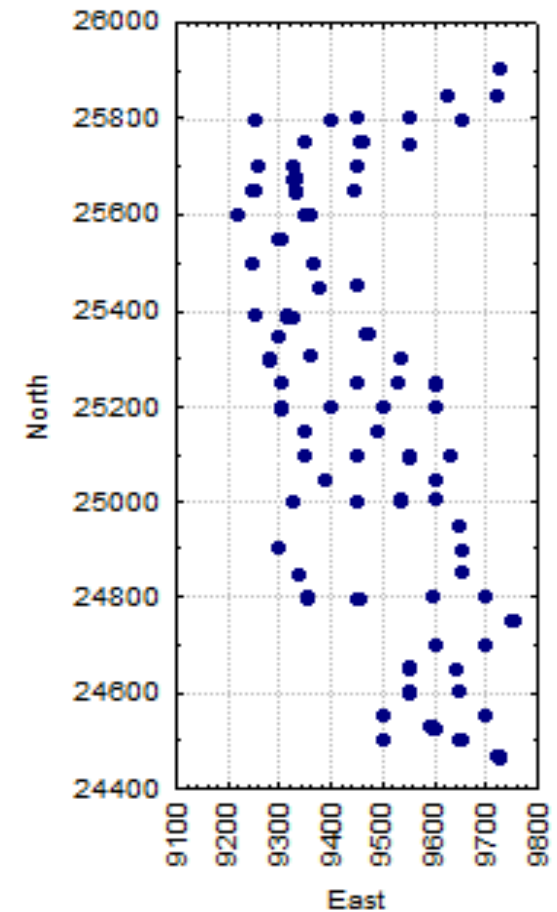
Caso estudio Cerro Matoso

Scatter Al_2O_3 y Fe



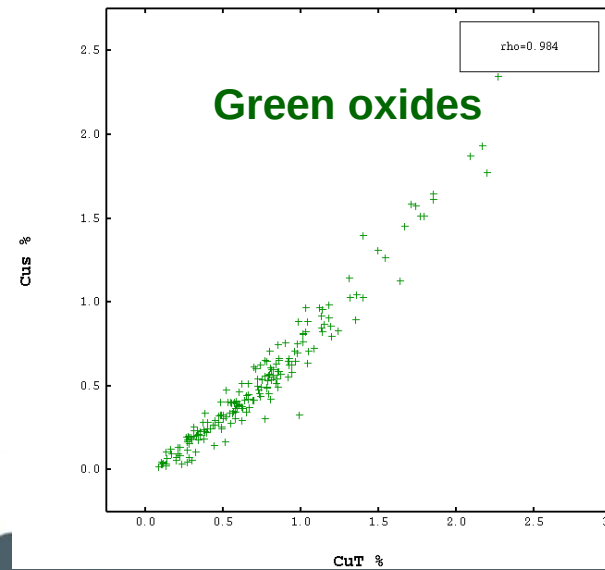
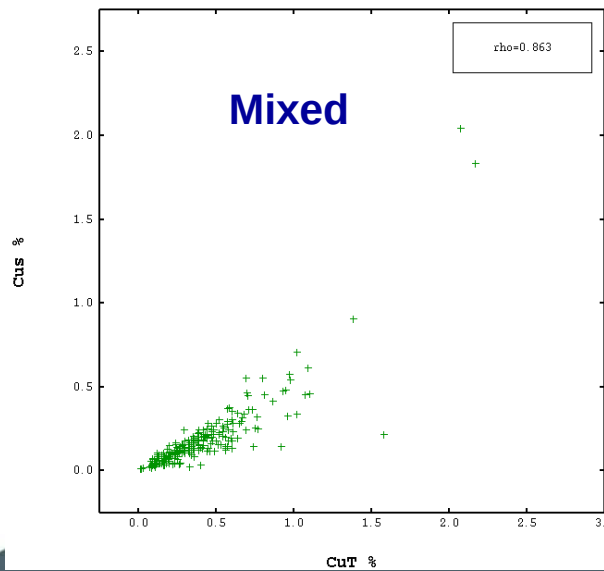
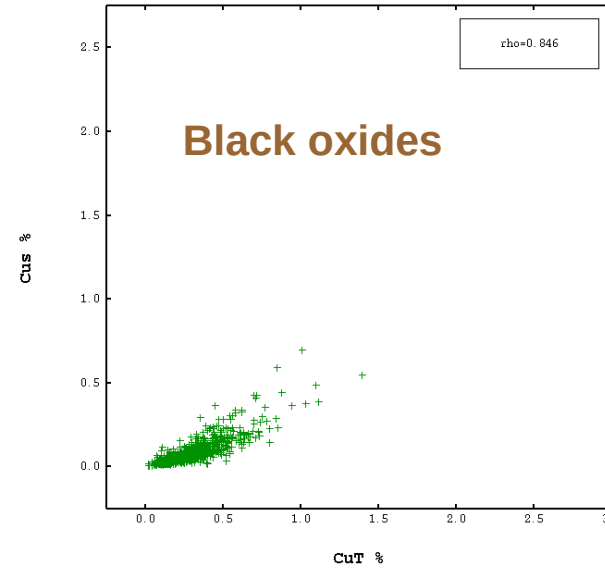
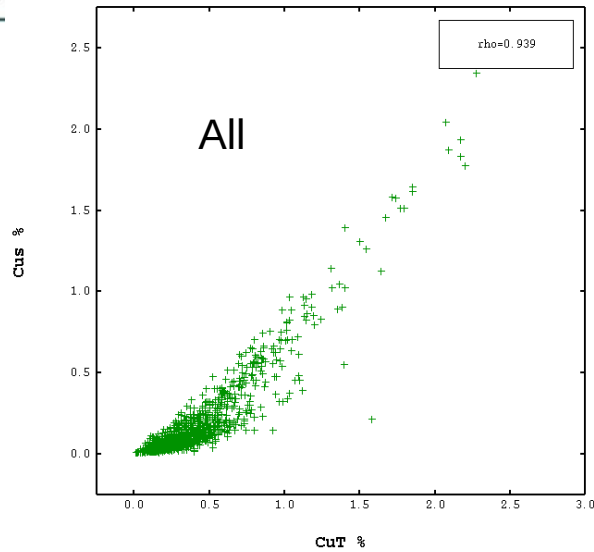
Kriging Multigaussiano + MAF

- 1289 DDH muestras (1.5 m) , con CuT y Cus, mineralización exótica
- **Mina Ministro Hales** (MMH)
- Datos Isotopicos



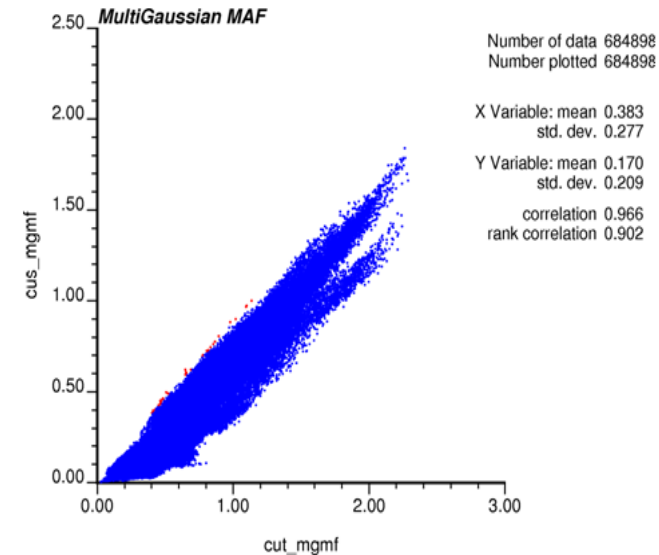
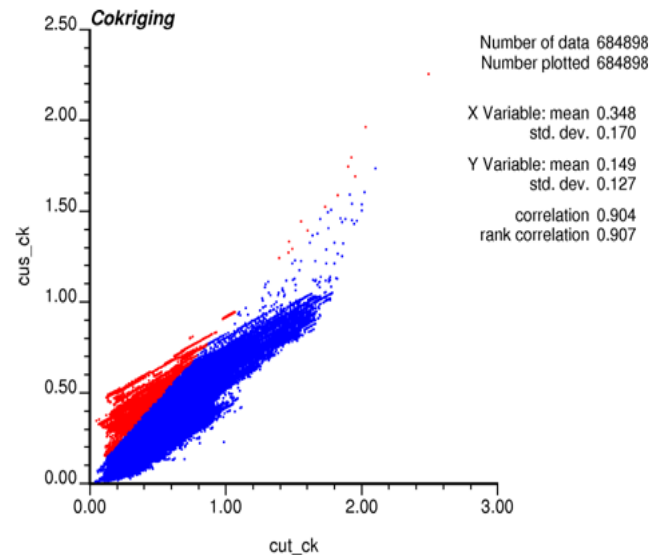
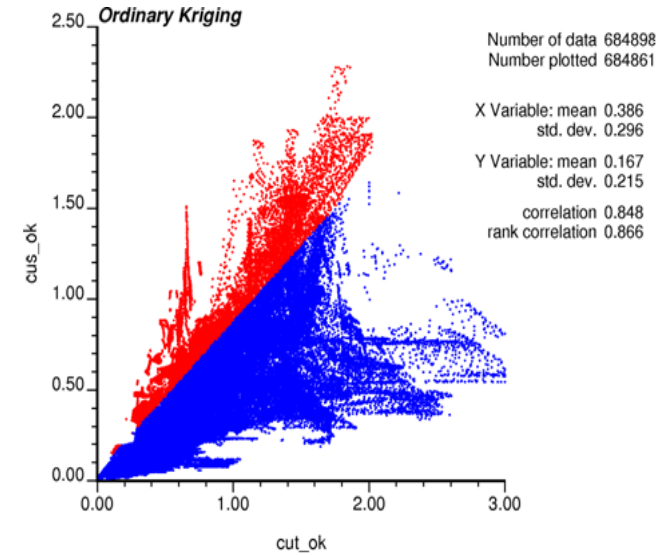
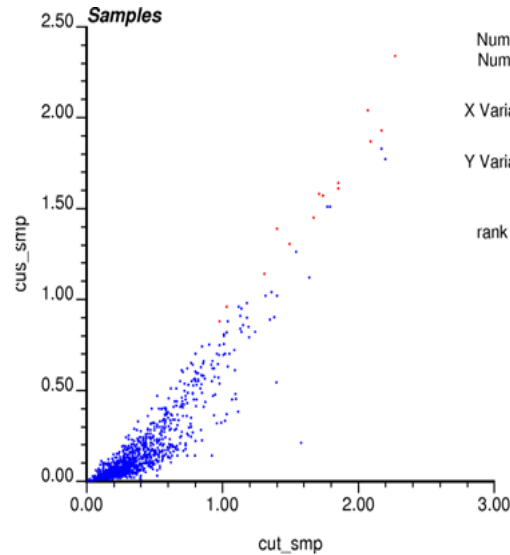
Fuente: A. Cáceres, R., X. Emery, J. Díaz. Total and soluble copper grade estimation using minimum/maximum autocorrelation factors (MAF) and multigaussian kriging. GEOMIN 2011

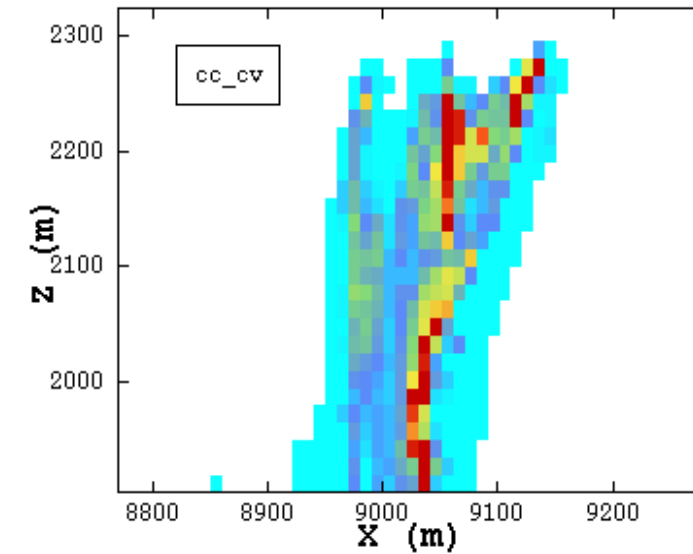
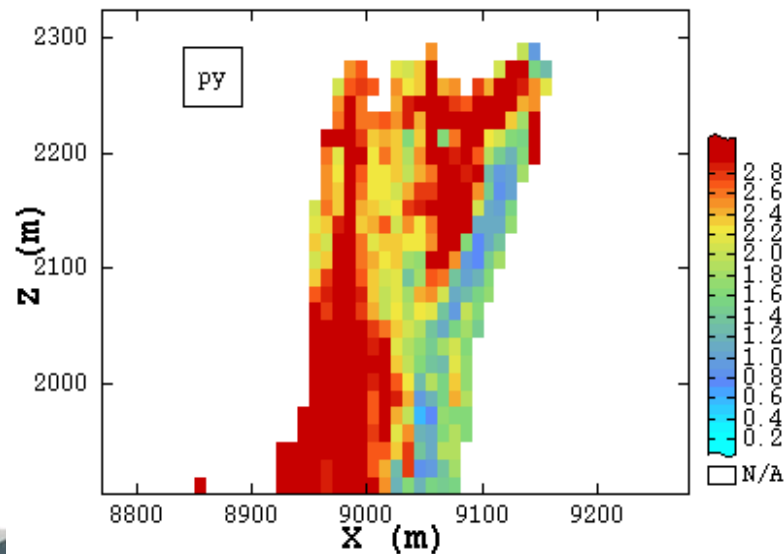
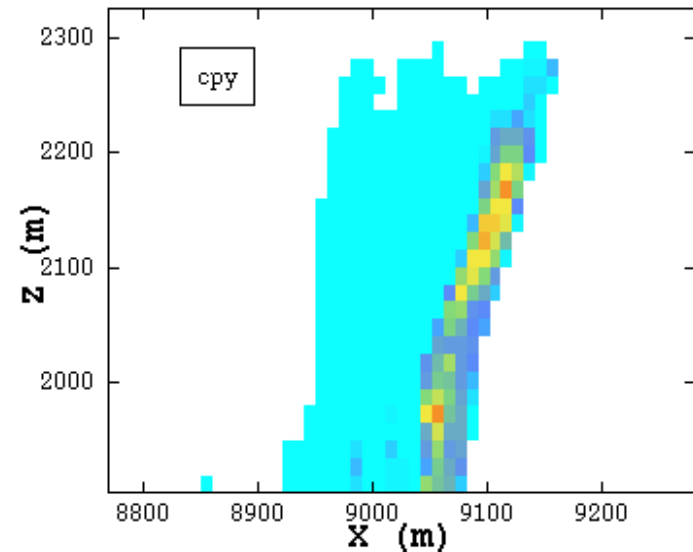
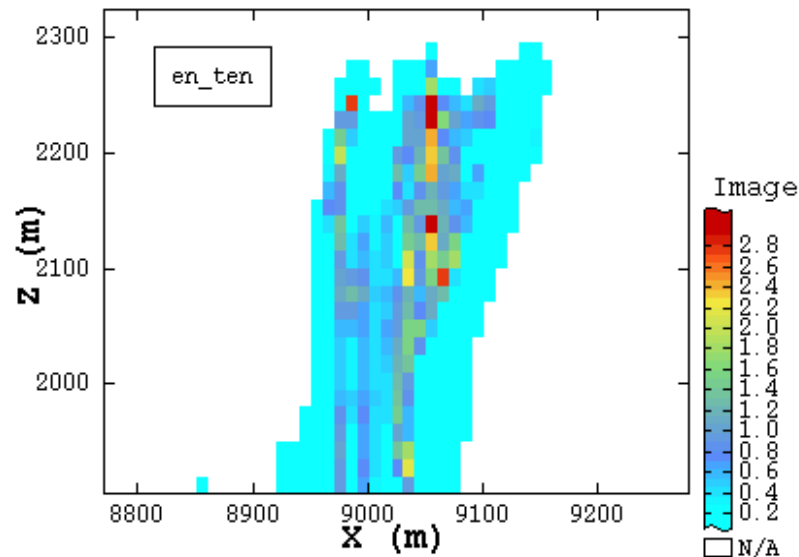
Gráfico de dispersión por unidad

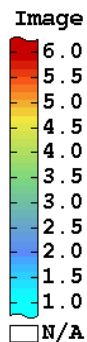
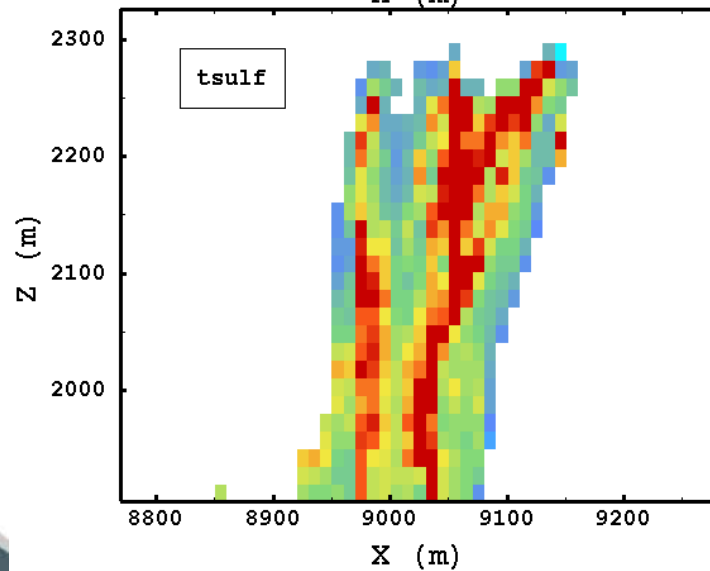
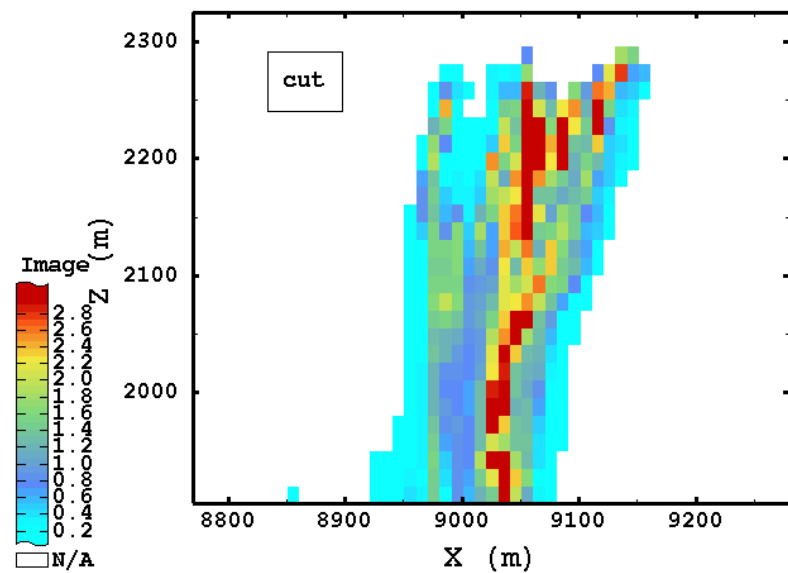
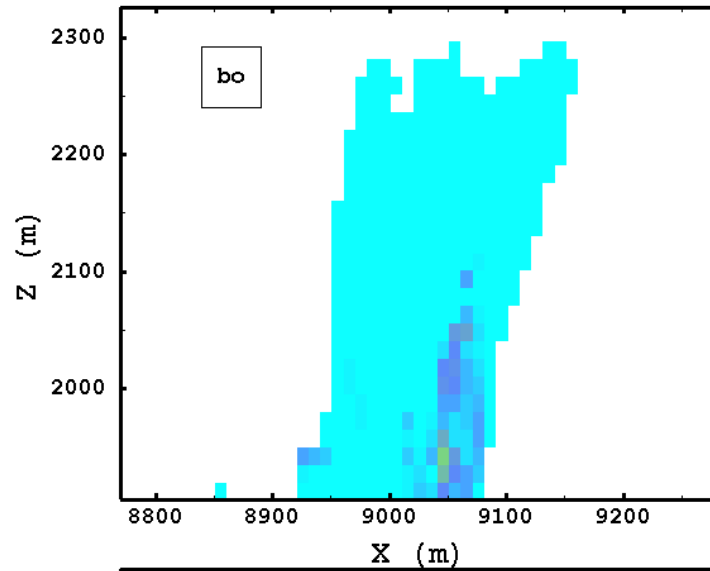


Resultados Kriging Multigaussiano con MAF

— Dependence between total and soluble copper grades







Reflexiones finales (1)

- La conceptualización geológica es clave
- Modelamiento implícito
 - Alternativa a las aproximaciones tradicionales y puede arrojar mejores resultados
- Análisis exploratorio de datos
 - Se debe aplicar desde el inicio, geología, geometalurgia, geotecnica etc.
 - **Multivariantes**, combinando fuentes de información distinta

Reflexiones finales (2)

- Estimación de recursos
 - Aumenta el número de elemento o análisis estimar.
 - Aproximaciones multivariantes son cada vez relevantes
 - Necesidad de reflejar relaciones naturales entre elementos y análisis
 - Enfoque independiente contravienen naturaleza de los
 - Geometalurgia
 - Estimación de especies minerales, dureza

Reflexiones finales (3)

– Geometalurgia

- Estimación de especies minerales, dureza
- Análisis proxy





Agradecimientos





Muchas gracias!!!

