



Ingeniería de Minas
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

Clasificación de recursos

● Prim 2018

Relator: [Alejandro Cáceres](#)



CÓDIGOS INTERNACIONALES

- **Categorización de recursos minerales** (o geológicos) y reservas mineras es una de las etapas **más críticas en la evaluación** de un proyecto minero
 - Financiamiento e inversiones dependen de la cantidad (tonelaje) y calidad (ley) de los recursos y reservas
- Es también uno de los procedimientos **más subjetivos** en la evaluación de recursos
 - Clasificación queda sujeta a la opinión experta de un especialista en evaluación de yacimientos



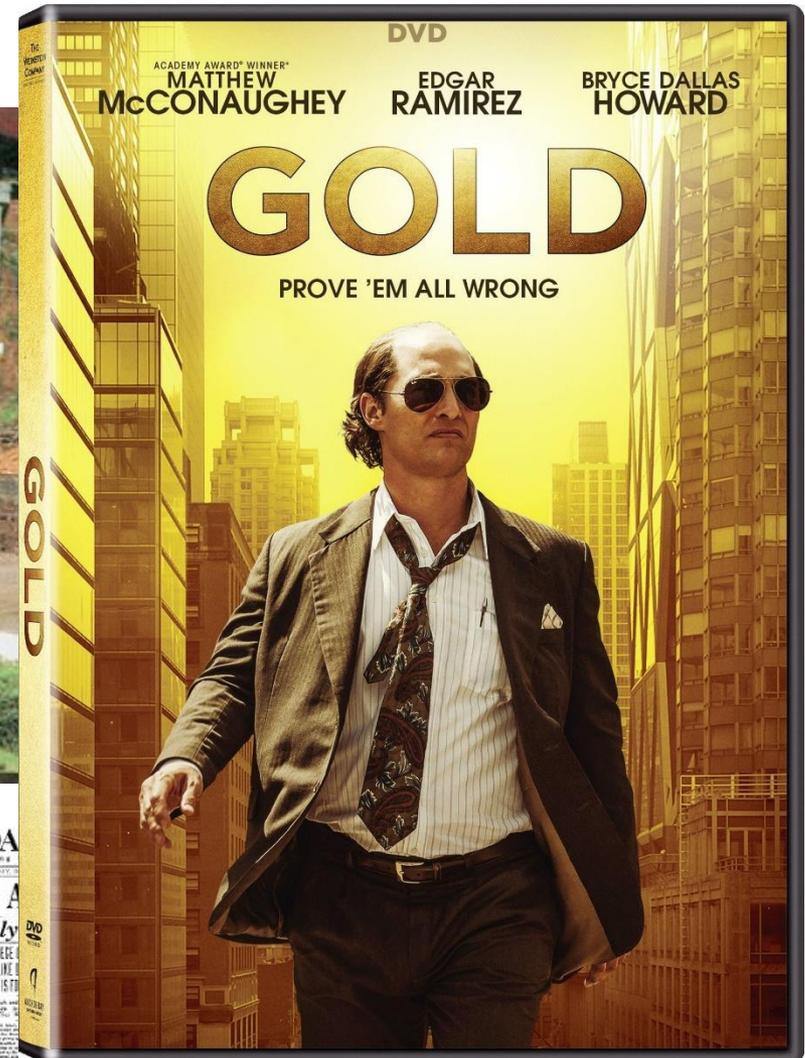
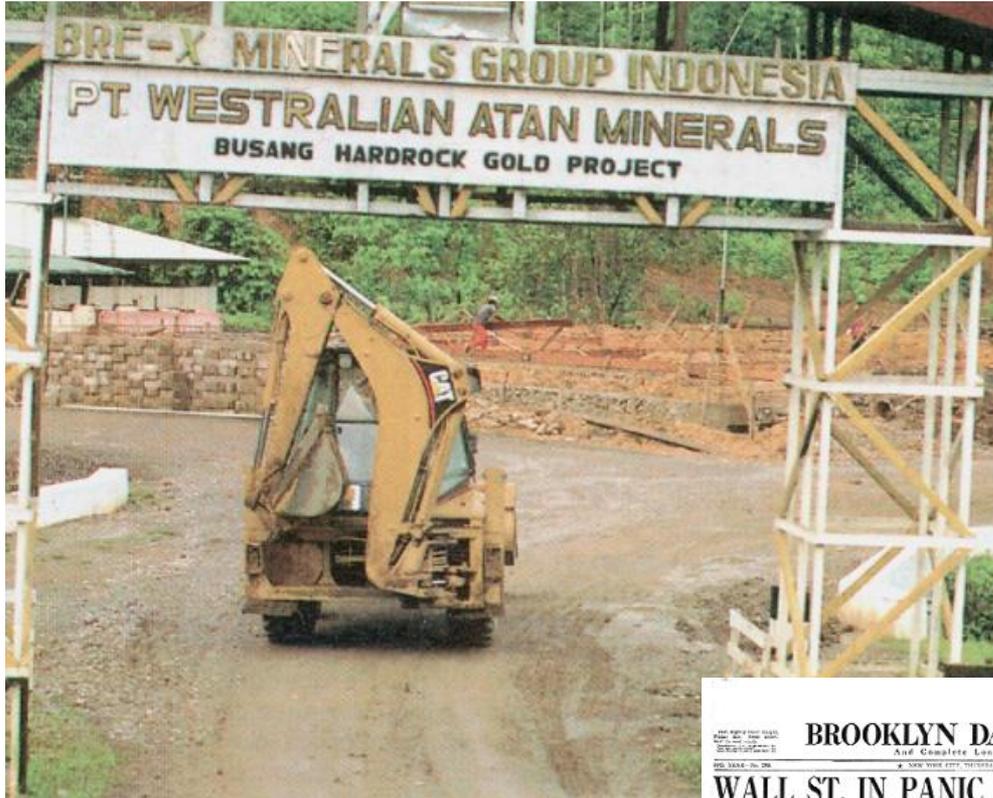
Códigos internacionales

- **¿Qué necesito para evaluar correctamente activos mineros?**

Para evaluar activos mineros es necesario una plataforma común de **conceptos claros** y una **nomenclatura estándar** sobre criterios y prácticas de evaluación de los prospectos de exploración, recursos y reservas mineras.

Códigos Internacionales

● Caso Bre-X



- ¿Que es un Código Internacional?

Instrumento que **codifica y categoriza el grado de incerteza que afecta a los recursos y a las reservas mineras** para propósitos de **información pública** y que orienta, de este modo, el proceso de conversión de los primeros en las segundas para efectos de **mitigar riesgos y sustentar, bajo un mínimo estándar de confiabilidad, los proyectos y negocios mineros.**

Códigos Internacionales

- Definen **estándares mínimos** para el reporte público de resultados de exploración, evaluación de recursos y reservas
- Entregan un **sistema para la clasificación** de valores estimados de tonelaje y ley de acuerdo a confianza geológica y tomando en cuenta consideraciones técnicas y económicas
- Describe las **calificaciones** y tipo de experiencia requerida para ser una Persona Competente / Calificada
- Entrega una lista resumida de los principales **criterios** a ser considerados al preparar reportes de resultados de exploración, recursos y reservas

Códigos Internacionales

- Idea básica: **definir el grado de confianza en la estimación de la cantidad y calidad del recurso**
- Satisfacer restricciones impuestas por los mercados financieros y los inversionistas
- Hoy, la categorización aún **se deja a juicio de un experto**, pero:
 - Debe ser reproducible
 - Debe ser auditable
 - Especialista debe estar calificado y debe ser reconocido entre sus pares
 - Se privilegia técnicas convencionales (probadas)

- Se basan en ciertos principios de aplicación
 - **Transparencia**: en el sentido que las reglas de aplicación deben ser explícitas, concisas, no sujetas a dobles interpretaciones.
 - **Materialidad**: en el sentido que las reglas de aplicación deben ajustarse a los aspectos relevantes, fundamentales, y esenciales que influyen directa y específicamente en la definición y certificación de prospectos de exploración, recursos, y reservas mineras.
 - **Competencia**: en el sentido que las reglas de aplicación ameritan ser certificadas por profesionales calificados, competentes, sujetos y regidos por conductas de ética profesional.
 - **Imparcialidad**: en el sentido que las reglas de aplicación son utilizadas sin intención de privilegiar un determinado resultado.

- **Persona competente:**

- Prepara los informes de estimación, categorización y evaluación de recursos y reservas

- **Requisitos:**

- Ser miembro de una organización gremial o colegio profesional de la especialidad relevante (ingeniero de minas o geólogo)
 - Facultades disciplinarias en caso de vulnerar normas de ética profesional
- Tener al menos **5/10 años de experiencia relevante** en la mineralización y tipo de yacimiento estudiado
 - Principio de auto-regulación

Códigos Internacionales



Códigos Internacionales

- Códigos para la clasificación de recursos y reservas.
 - **JORC (AUSTRALIA)**
 - SAMREC (SUDAFRICA)
 - **NI 43-101 (CANADÁ)**
 - **CIM (CANADÁ)**
 - IMM (REINO UNIDO)
 - UNFC (NACIONES UNIDAS)
 - SEC SEM (EE.UU.)
 - CODIGO CHILENO
 - CODIGO RUSO
 - CODIGO CHINO

- Es el estándar de facto

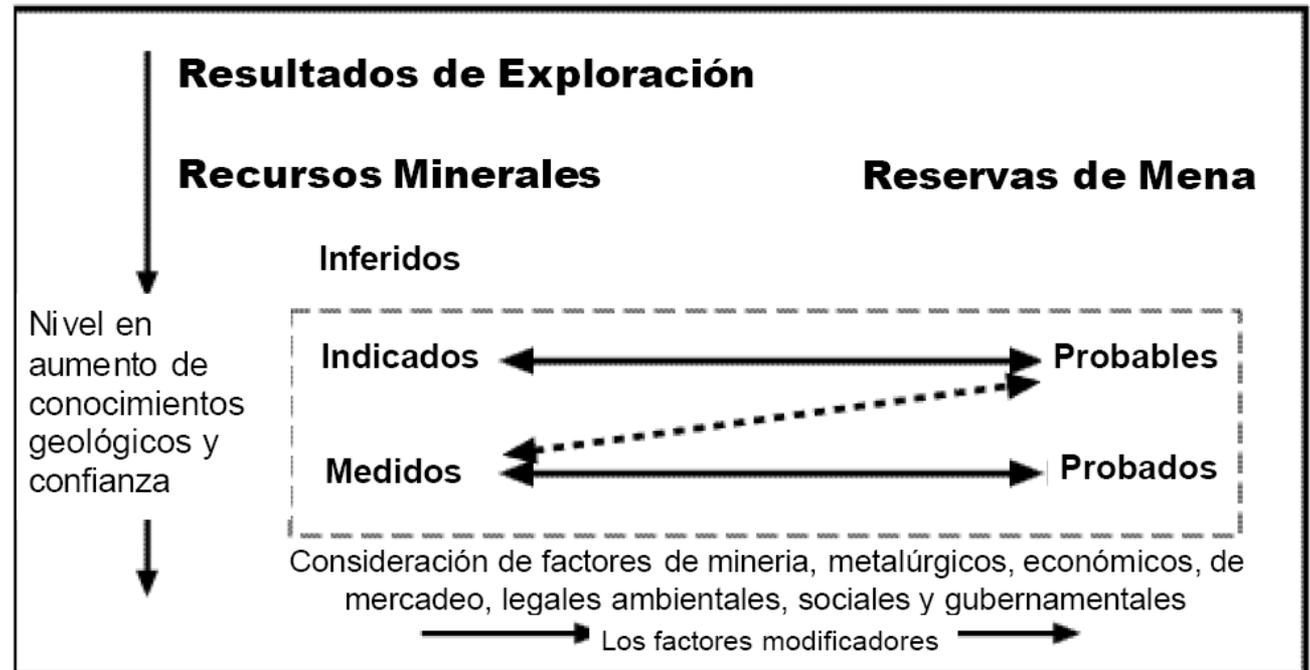
- Define:

- RECURSOS:

- Medidos
- Indicados
- Inferidos

- RESERVAS:

- Probadas
- Probables



● **Recurso Mineral:**

Concentración u ocurrencia de material de interés económico intrínseco en o sobre la corteza de la Tierra en forma y cantidad en que haya probabilidades razonables de una eventual extracción económica.

La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencia y conocimientos específicos geológicos.

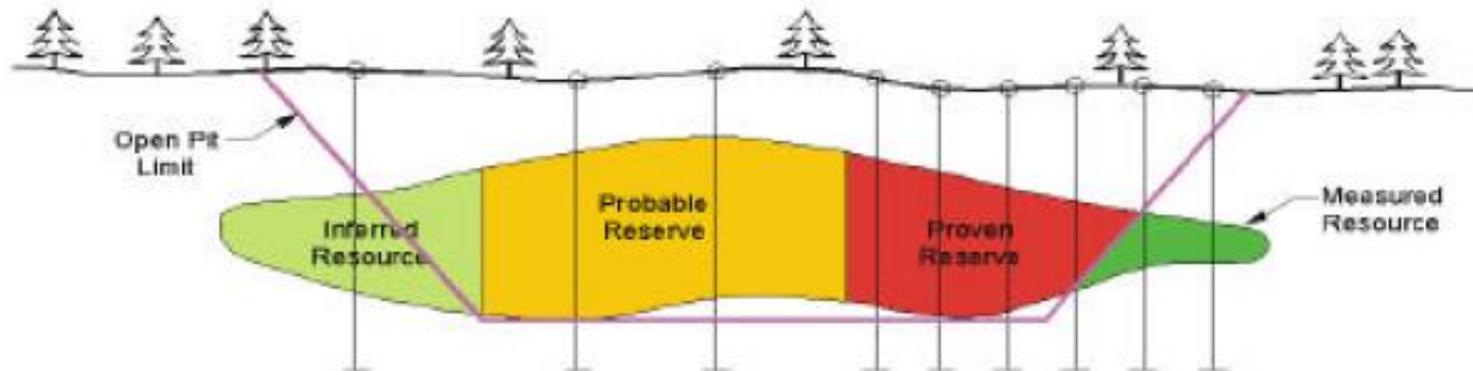
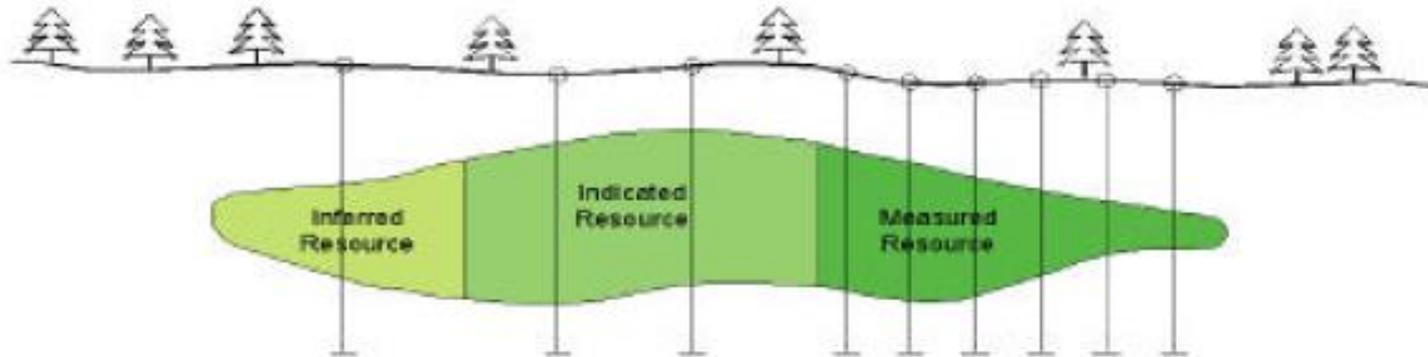
Los Recursos Minerales se subdividen, en orden de confianza geológica ascendente, en categorías de Inferidos, Indicados y Medidos.

● **Reserva Minera:**

Es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido o Indicado. Incluye dilución de materiales y tolerancias por pérdidas que se puedan producir cuando se extraiga el material. Se han realizado las evaluaciones apropiadas, que pueden incluir estudios de factibilidad y contemplan la consideración de y modificación por factores razonablemente asumidos de extracción, metalúrgicos, económicos, de mercados, legales, ambientales, sociales y gubernamentales. Estas evaluaciones demuestran en la fecha en que se reporta que podría justificarse razonablemente la extracción.

Las Reservas Mineras se subdividen, en orden creciente de confianza, en Reservas Probables y Reservas Probadas. Nótese que la definición de Reservas Posibles ha caído en desuso, debido a que los códigos no autorizan declarar reservas que provienen de recursos geológicos inferidos.

Diferencias entre categorías



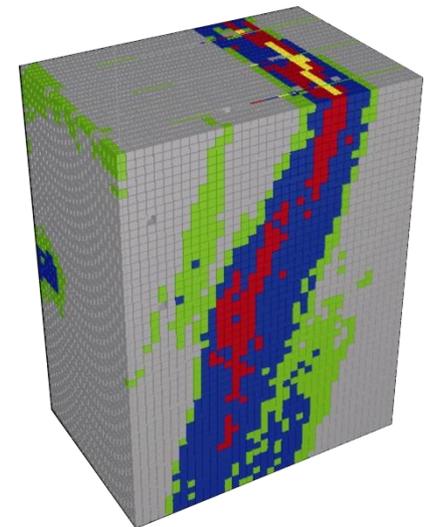


INCERTIDUMBRE Y CATEGORIZACIÓN

- La evaluación de recursos y reservas requiere de la participación de profesionales de varias disciplinas
 - Geología
 - Muestreo
 - Análisis químicos
 - Ingeniería de Minas
 - Ingeniería Geotécnica o Mecánica de Rocas
 - Hidrogeología
 - Procesamiento de Minerales y Metalurgia
 - Medio Ambiente
 - Legal
 - Comunidad
 - Finanzas

Fuentes de error

- Las principales fuentes de error e incertidumbre en la estimación de recursos son:
 - Muestreo de datos
 - Interpretación del modelo geológico
 - Recolección de datos
 - Interpolación de leyes
 - Complejidad geología y variabilidad de leyes
- Las principales fuentes de error e incertidumbre en la estimación de reservas son:
 - Pérdidas de mineral y dilución
 - Métodos de explotación mineros
 - Selección de leyes de corte económicas
 - Optimización de rajo o caserones



Errores Mina-Planta

- Muchos problemas de reconciliación Mina-Planta se deben a:
 - Problemas de muestreo
 - Incorrecta interpretación del control geológico en la mineralización
 - Aplicación de técnicas (particularmente técnicas disponibles en paquetes computacionales) como caja negra, sin revisar los parámetros ni concentrarse en la solución del problema
 - Pérdida de mineral y dilución excesiva durante la explotación



ASPECTOS CLAVES DE LA CLASIFICACIÓN

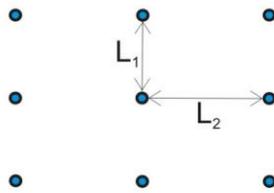
Aspectos claves clasificación de recursos

- Los siguientes aspectos deben ser considerados en una clasificación de recursos:
- Calidad de los datos
 - Existencia de registro físico de los datos
 - QA/QC de leyes, mapeos, certificados, desviaciones, posición, etc.
 - Método de perforación, muestreo y análisis químicos
- Aspectos geológicos
 - Complejidad geológica del yacimiento – Continuidad y ocurrencia de mineralización
 - Conceptualización geológica Madura, entendimiento de controles de mineralización
 - Construcción de modelo geológico (nivel de interpretación (sobre/sub modelado)
- Estimación de recursos
 - Continuidad de mineralización
 - Continuidad de leyes
 - Unidades de estimación que controlen las leyes de elementos de interés
- **Densidad de información → Principal medio para reducir incertidumbre**
 - Nivel de información disponible c/r a aspectos anteriores
 - Disposición de la información (agrupamiento)
 - Información en zonas explotadas vs no explotadas

Densidad de información

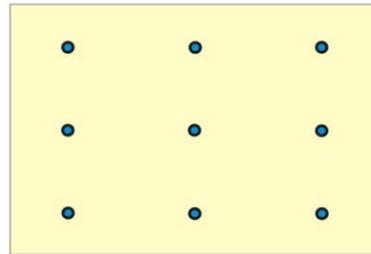
- Está asociada a una malla de muestreo
- Se puede medir de varias maneras

Drillhole Spacing



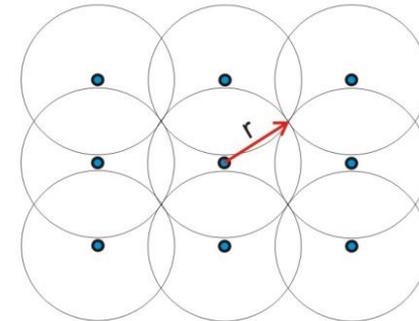
Parameters: L_1 and L_2
Units: meters

Drillhole Density

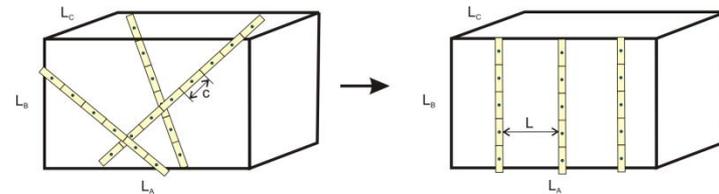
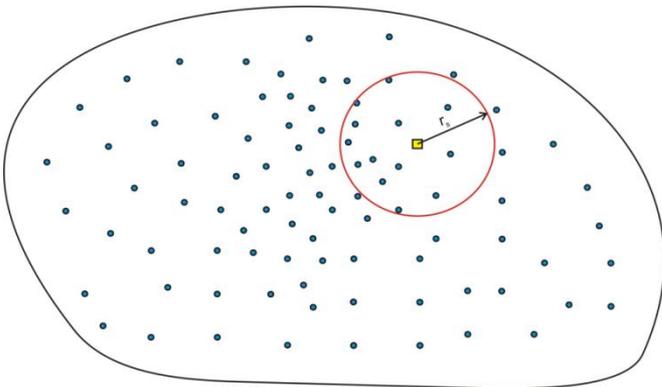


Parameter: d
Units: number/(100x100m²)

Radius from Drillhole



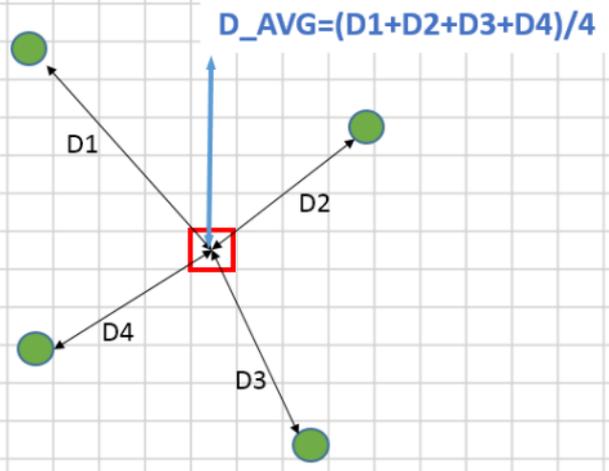
Parameter: r
Units: meters



Se requieren algunos supuestos para medir la densidad de información o, equivalentemente, asociar la información a una malla de muestreo

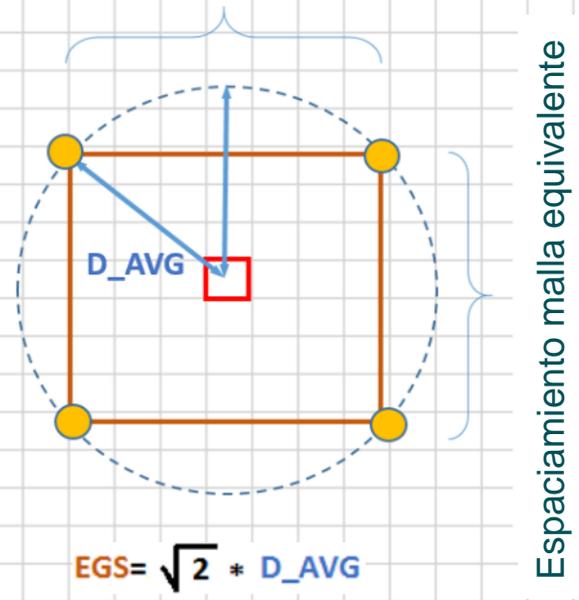
Densidad de infomación-Cálculo de malla equivalente

Configuración real de muestras



- Muestras reales
- Bloque objetivo

Configuración malla equivalente



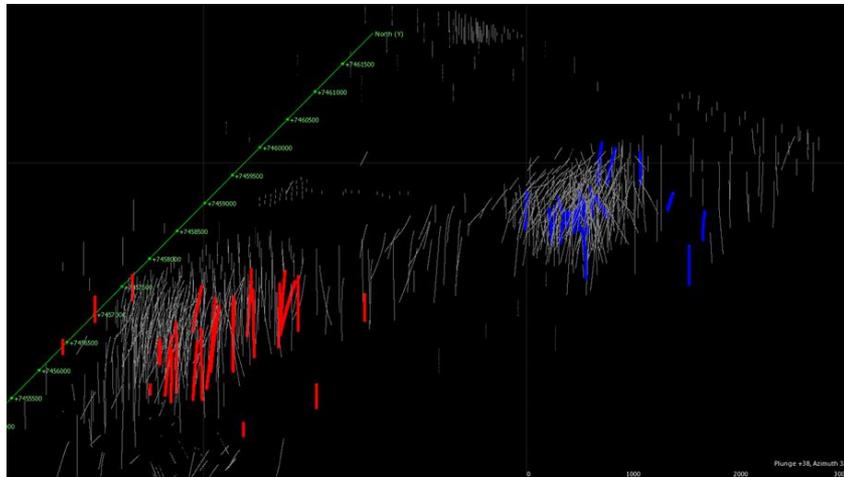
- Muestras equivalentes
- Bloque objetivo

A partir de distancia promedio de 4 muestras de 4 sondajes se calcula “malla equivalente”, funciona bien en operaciones a cielo abierto

Reducción de incertidumbre por densidad de información

● ¿Cómo se reduce la incertidumbre?

1. Aumentando conocimiento y entendimiento geológico del depósito
2. Perforando más sondajes y tomando más muestras



Sondajes adicionales en sectores N y S

En general la densidad de información medida como mallas de sondajes, metros de sondajes adicionales es la forma de comunicar la información necesaria para reducir incertidumbre en la operación.

CLASIFICACIÓN USANDO EPV

ERROR-PROBABILIDAD-**V**OLUMEN

Densidad de información vs incertidumbre

- Los métodos geométricos para clasificación son fáciles de entender, pero no miden la incertidumbre (error), ni el riesgo
- Se hace cada vez más necesario (incluso los códigos lo sugieren o exigen) cuantificar la incertidumbre o el riesgo en la estimación
- En el código JORC:

Discussion of relative accuracy/confidence.

- *Where appropriate a statement of the relative accuracy and/or confidence in the Ore Reserve estimate using an approach or procedure deemed appropriate by the Competent Person. For example, the application of statistical or geostatistical procedures to quantify the relative accuracy of the reserve within stated confidence limits, or, if such an approach is not deemed appropriate, a qualitative discussion of the factors which could affect the relative accuracy and confidence of the estimate.*
- *The statement should specify whether it relates to global or local estimates, and, if local, state the relevant tonnages or volumes, which should be relevant to technical and economic evaluation. Documentation should include assumptions made and the procedures used.*
- *These statements of relative accuracy and confidence of the estimate should be compared with production data, where available.*

Requerimientos para cuantificación de incertidumbre

● Volumen:

- La variabilidad se reduce a gran escala
- Volumen se traduce a periodo de producción, es decir, tiempo

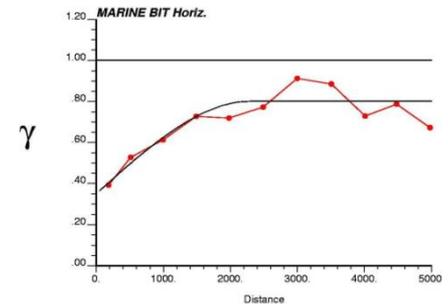


● Continuidad geológica:

- Depende de la geometría, continuidad y ocurrencia la unidad geológica de estimación (vetas vs zonas masivas)

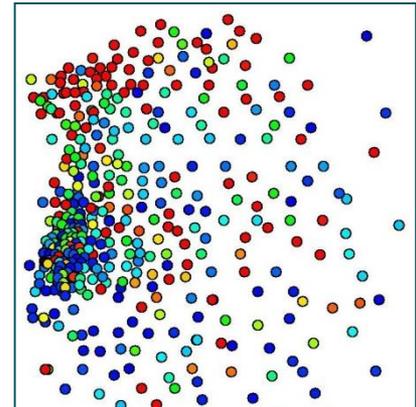
● Configuración de las muestras

- Distribución de sondajes no uniforme
- A mayor densidad de datos, menos incertidumbre



● Leyes altas o bajas

- La variabilidad depende de la ley \rightarrow efecto proporcional



- Hay tres aspectos que participan en la categorización basada en probabilidades:
 - Medida de incertidumbre +/- (error)
 - Probabilidad de estar dentro del intervalo
 - Volumen

- El reporte de la incertidumbre es claro y comprensible (cuantifica el error esperable):
 - Volúmenes de producción trimestral cuya ley está dentro de un 15% del valor estimado 90% del tiempo se definen como medidos
 - Volúmenes de producción anual cuya ley está dentro de un 15% del valor estimado 90% del tiempo se definen como indicados

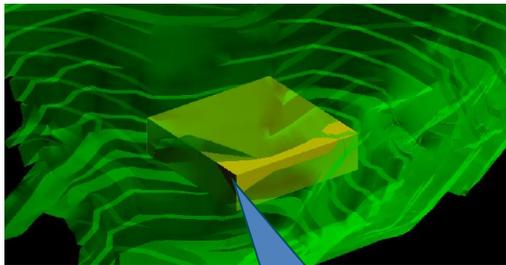
Elementos definitorios de clasificación EPV

- Clasificación queda definida por tres elementos

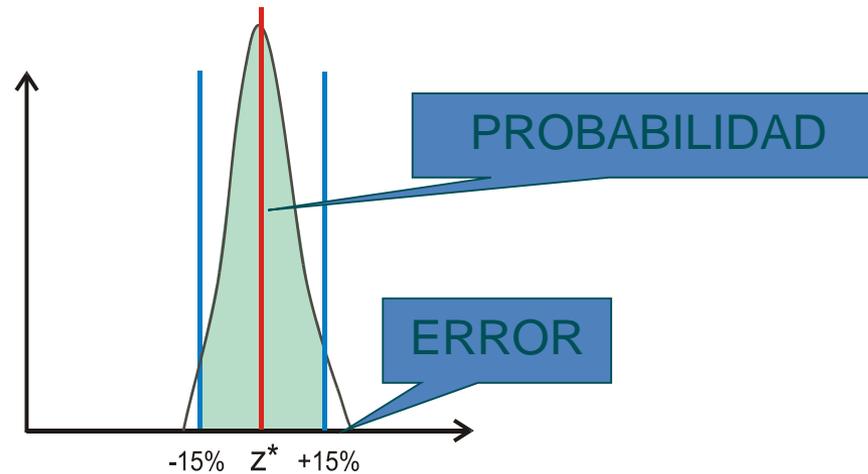
Error → $\pm 10 / 15 / 20\%$ del valor estimado

Probabilidad → 80 / 85 / 90% del tiempo

Volumen → producción mensual / trimestral / anual

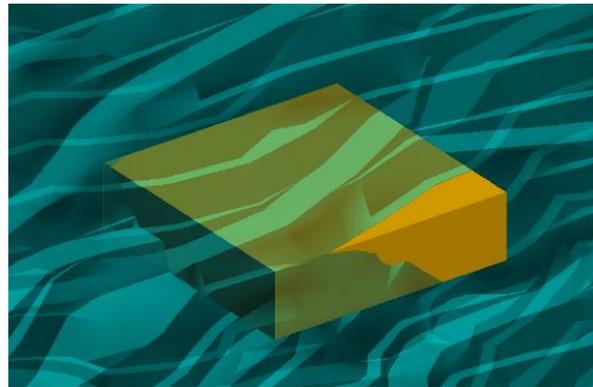


VOLUMEN



Volumen

- Volumen relevante para la evaluación técnico-económica
- Se puede considerar un paralelepípedo regular para simplificar el cálculo, donde se califica el error asociado a su estimación
- Se puede considerar el volumen (más complejo) de un periodo de producción (que sale del plan).



- Al categorizar recursos, se debe asumir un ritmo de producción razonable. El resultado es altamente sensible a esta elección.
- Geometría suele no ser un problema importante.
- Si hay varias frentes independientes de producción, se pueden combinar bajo este supuesto.

Medida del error

- En la práctica se consideran parámetros tales como:
 - 5 % para depósitos muy continuos
 - 25% para depósitos muy heterogéneos – indica una predicción generalmente mala
 - 15% es un valor razonable y bastante aceptado
- Código chileno sugiere 7% para pórfidos de cobre...

Probabilidad de estar dentro del intervalo

- Considerando la medida del error (intervalo entorno al valor estimado), falta decidir con qué frecuencia (probabilidad) esto debe ocurrir

- 80%: P10 a P90

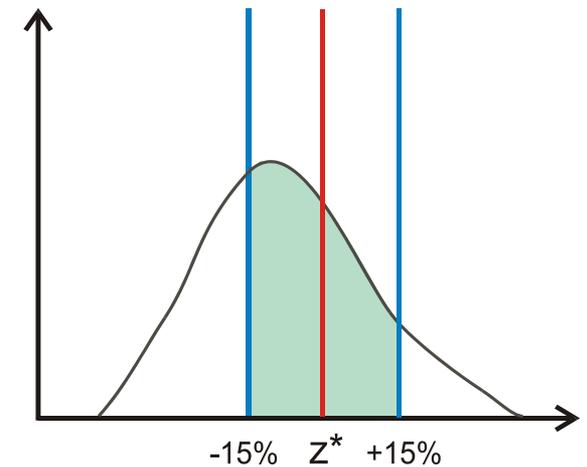
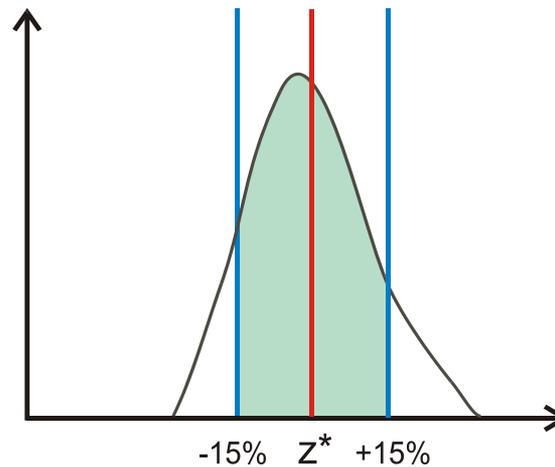
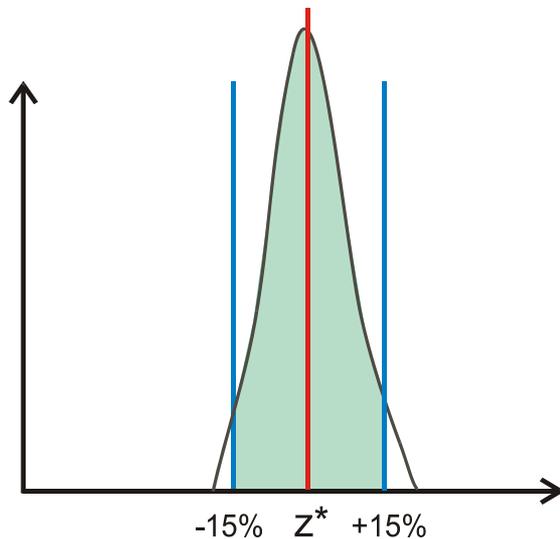
- 90%: P05 a P95

Probability
to be within:

95%

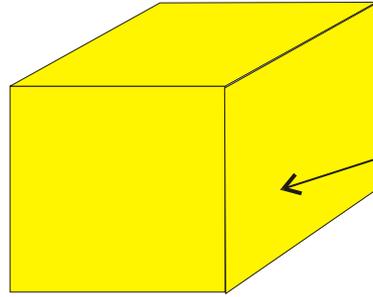
80%

50%

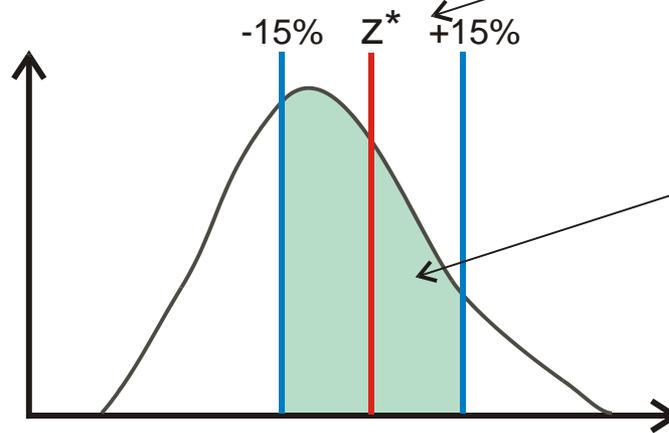


Gentileza Mario Rossi

Resumen E-P-V



1. Volumen relevante para la evaluación técnico-económica



2. Ley estimada z^* y medida del error $\pm 15\%$

3. Probabilidad de estar dentro del intervalo del error

¿Cumple el área celeste con esta condición?

Link- Error de estimación con densidad de información

- En organizaciones mineras es más sencillo de comunicar la información requerida para disminuir incertidumbre en términos de densidad de información, tanto en proyectos como en operación.
- Por lo cual en general se definen metodologías que relacionan los potenciales **errores de estimación** sobre volúmenes relevantes a la planificación, probabilísticamente, con la densidad de información.
- Para realizar el link, se considera que para una densidad dada de información, se puede estimar con poco error la ley de la producción sobre volúmenes relevantes para la planificación (mes, trimestre, año).
- Además, de asumir cierta «regularidad» del error de estimación en todo el dominio

Link- Error de estimación con densidad de información

- En general la **cuantificación de los potenciales errores de estimación** se realiza usando métricas derivadas de kriging o simulación, en caso de contar con producción por medio de retro-conciliación.
- La **densidad de información** es considerada en los cálculos de incertidumbre por medio de mallas de sondajes sintéticos, o con la información real, a veces se utilizan métricas resumen de información real como la “malla equivalente”.
- El link se realiza al relacionar un nivel de información (malla, malla equivalente) con un error de estimación, con lo cual se toma una decisión de clasificación en medidos, indicados e inferidos.
- La implementación corresponde a mapear el nivel de información (pintar) en el modelo de bloques, lo cual se realiza usando normalmente, varianza de kriging o mapeo de malla equivalente de sondajes.
- Luego se clasifican los bloques según varianza de kriging, malla equivalente y se suaviza para evitar efectos de sal y pimienta.



METODOLOGÍAS DE CLASIFICACIÓN



Figure 1. Measured, Indicated and Inferred Resource Category Outlines- Section 1950C

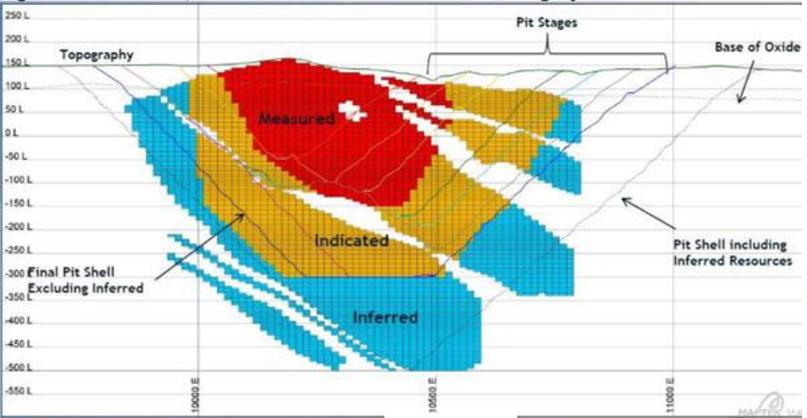
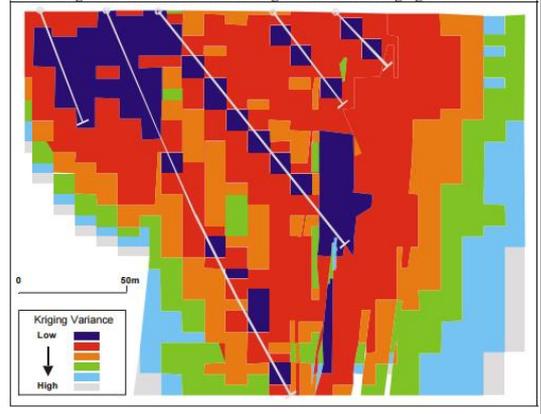
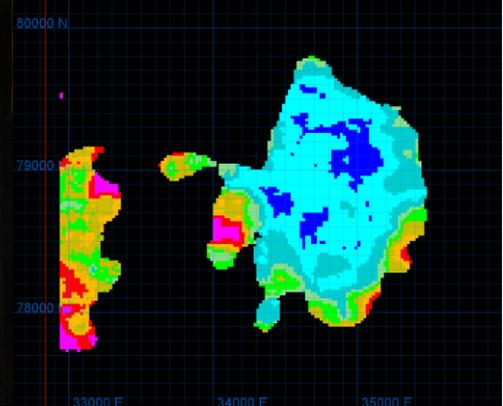
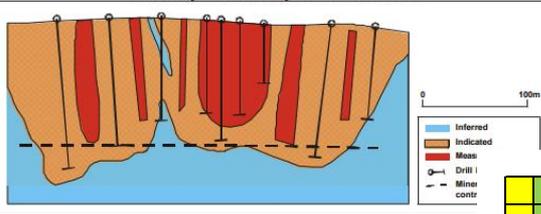


Figure 2 – Cross Section showing Variations in Kriging Variance

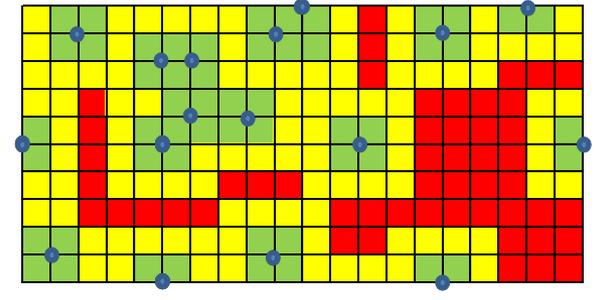
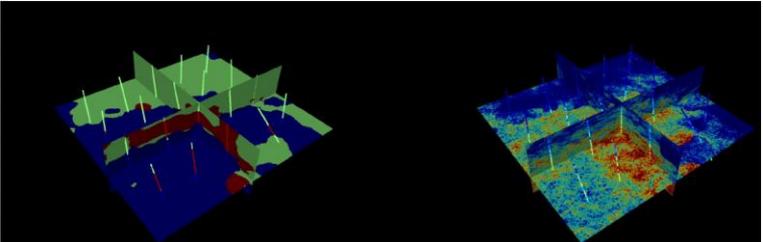
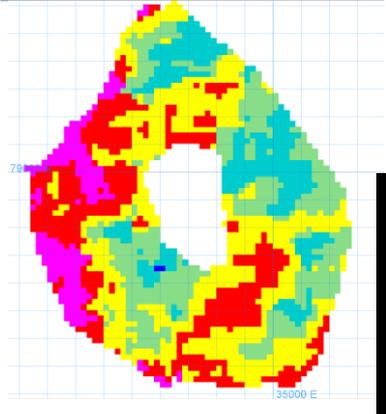
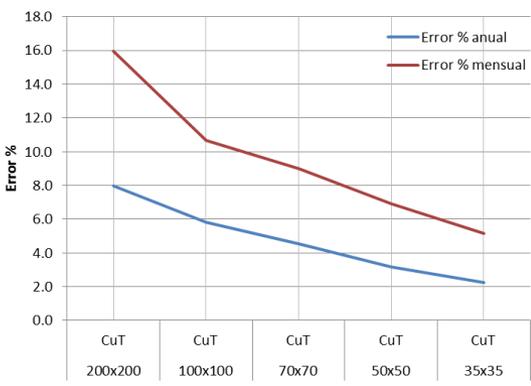


In Figure 2, corridors of low kriging variance following otherwise isolated drillholes. Kriging variance is one of the block parameters that is sometimes translated directly into resource classifications.

Figure 3. Cross Section showing Classification following Drillholes and also being Artificially Influenced by Search Parameters



Error % anual vs mensual





BENCHMARK DENSIDAD DE INFORMACIÓN

- Información de entrada
 - **Base de datos estimación**
 - **Modelo de bloques con categorías**
 - i. Recursos por categoría $CuT \geq 0.1\%$
 - ii. Se asigna la categoría de los bloques a sondajes
 - iii. Largos de sondajes por categoría $CuT \text{ MB} > 0.1\%$
 - iv. Ton/metros de sondajes por categoría (óxidos sulfuros)

- Información de entrada

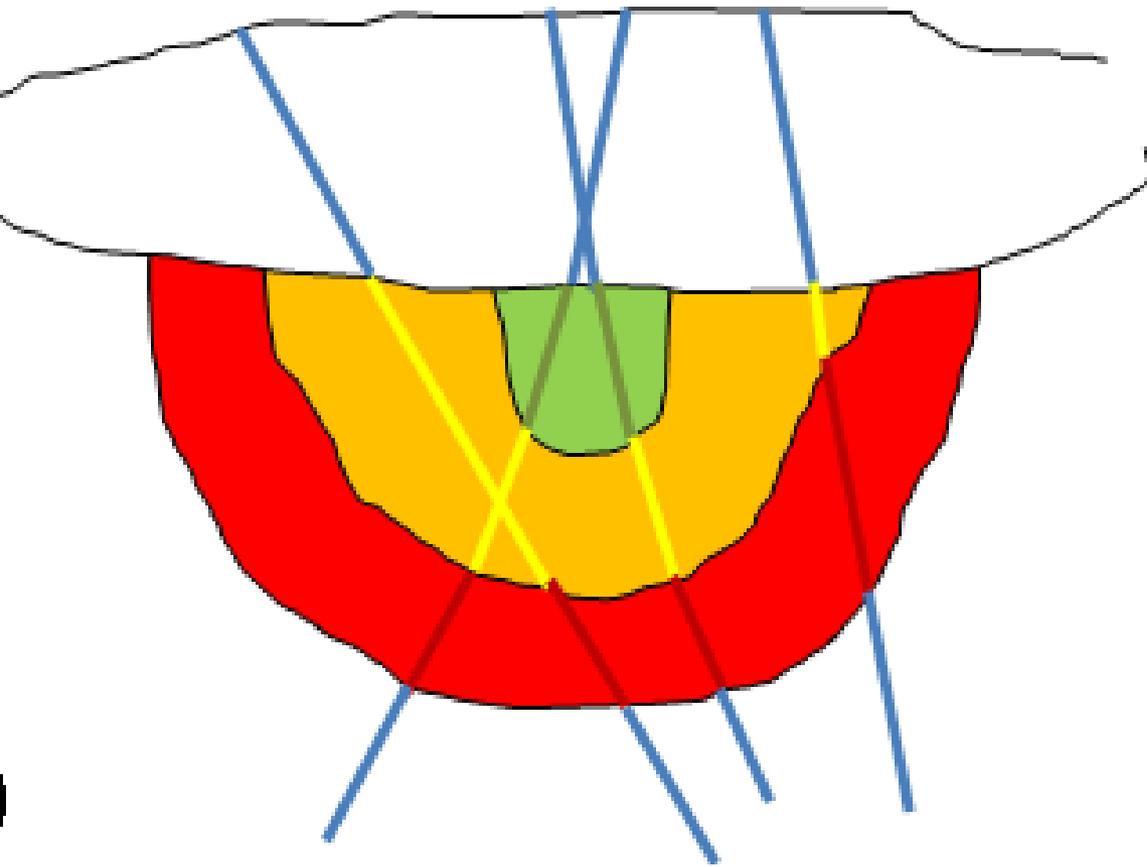
- **Base de datos estimación**

- **Modelo de bloques con categorías**

- Recursos por categoría $CuT \geq 0.1\%$
- Se asigna la categoría de los bloques a sondajes
- Largos de sondajes por categoría $CuT_{MB} > 0.1\%$
- Ton/metros de sondajes por categoría (óxidos sulfuros)

Toneladas por metros efectivos en mineralización y categoría

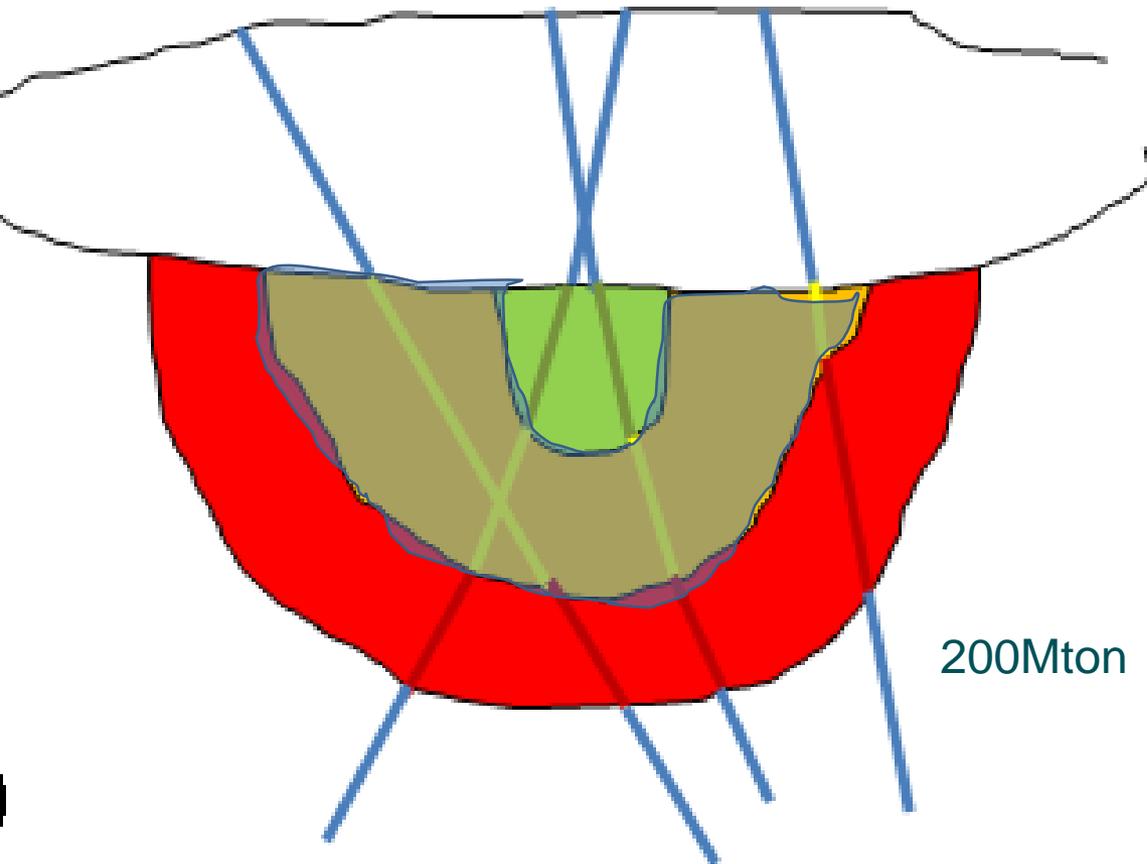
Metodología



Leyenda

- Medido
- Indicado
- Inferido

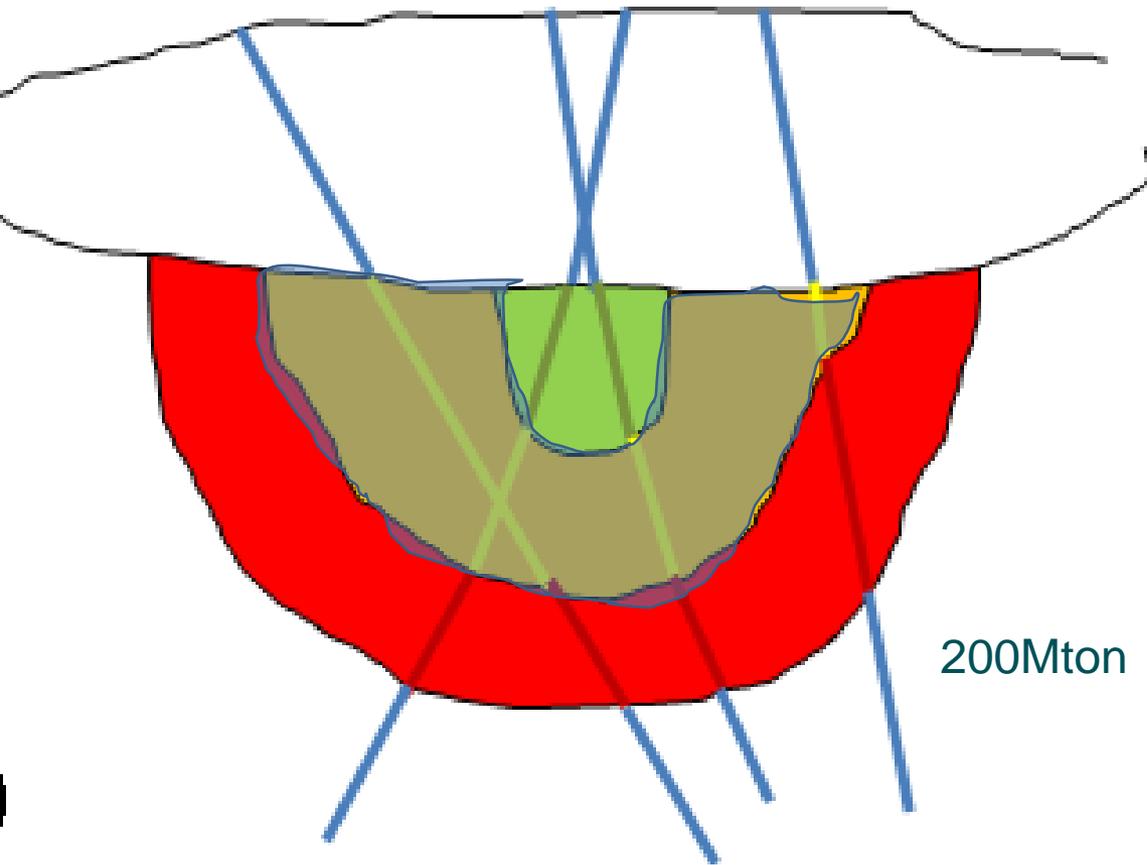
Metodología



Leyenda

- Medido
- Indicado
- Inferido

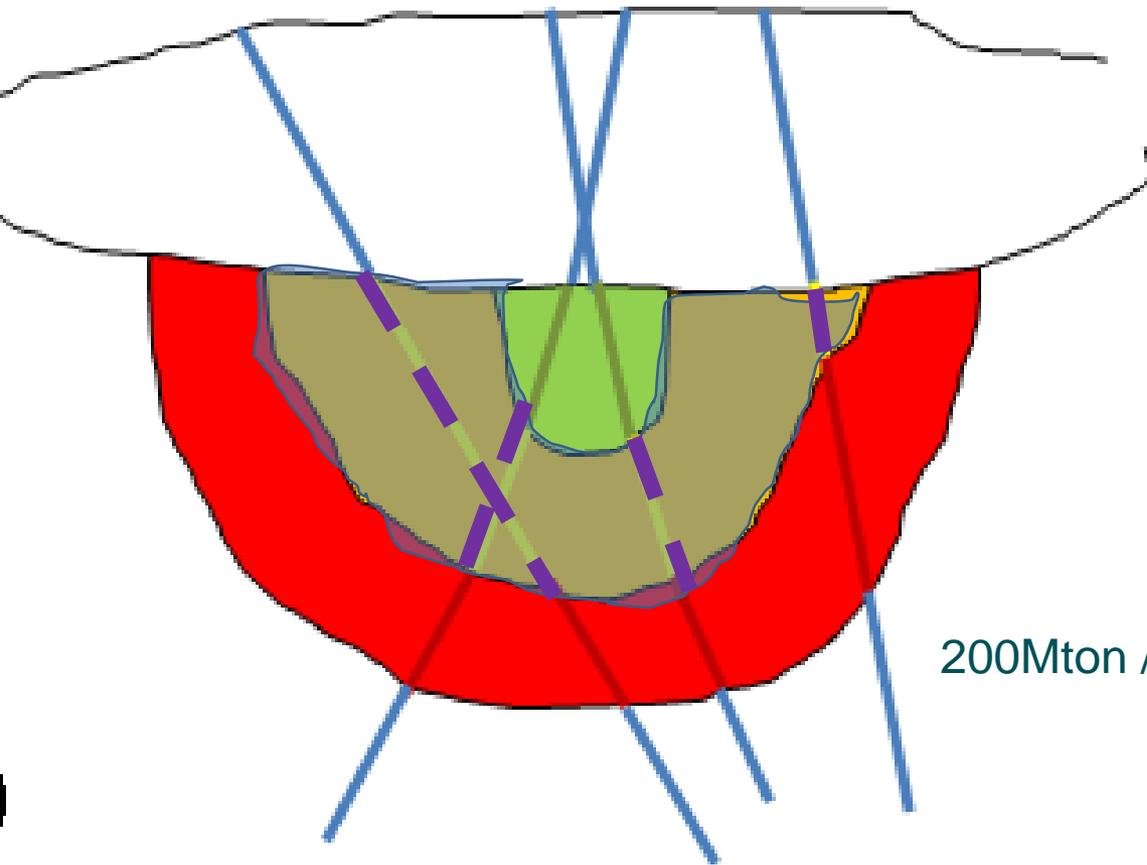
Metodología



Leyenda

- Medido
- Indicado
- Inferido

Metodología

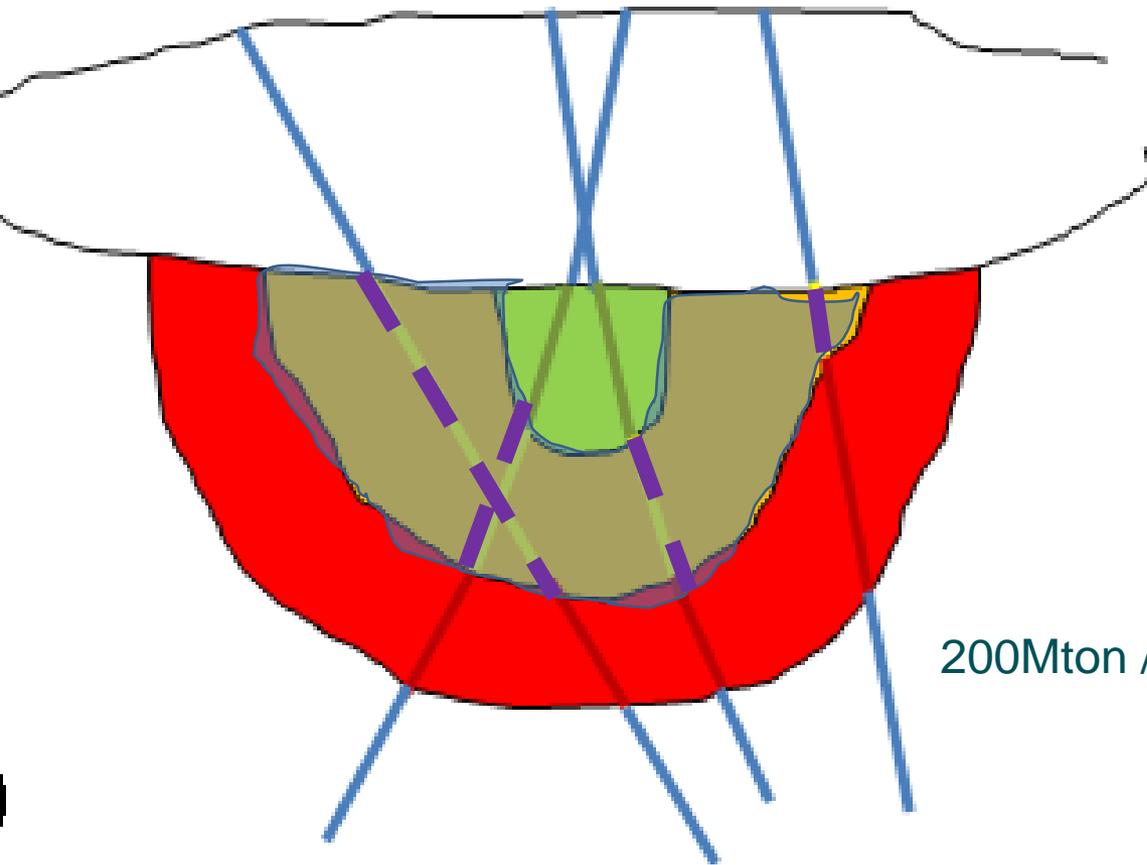


Leyenda

- Medido
- Indicado
- Inferido

200Mton / 5000 metros

Metodología

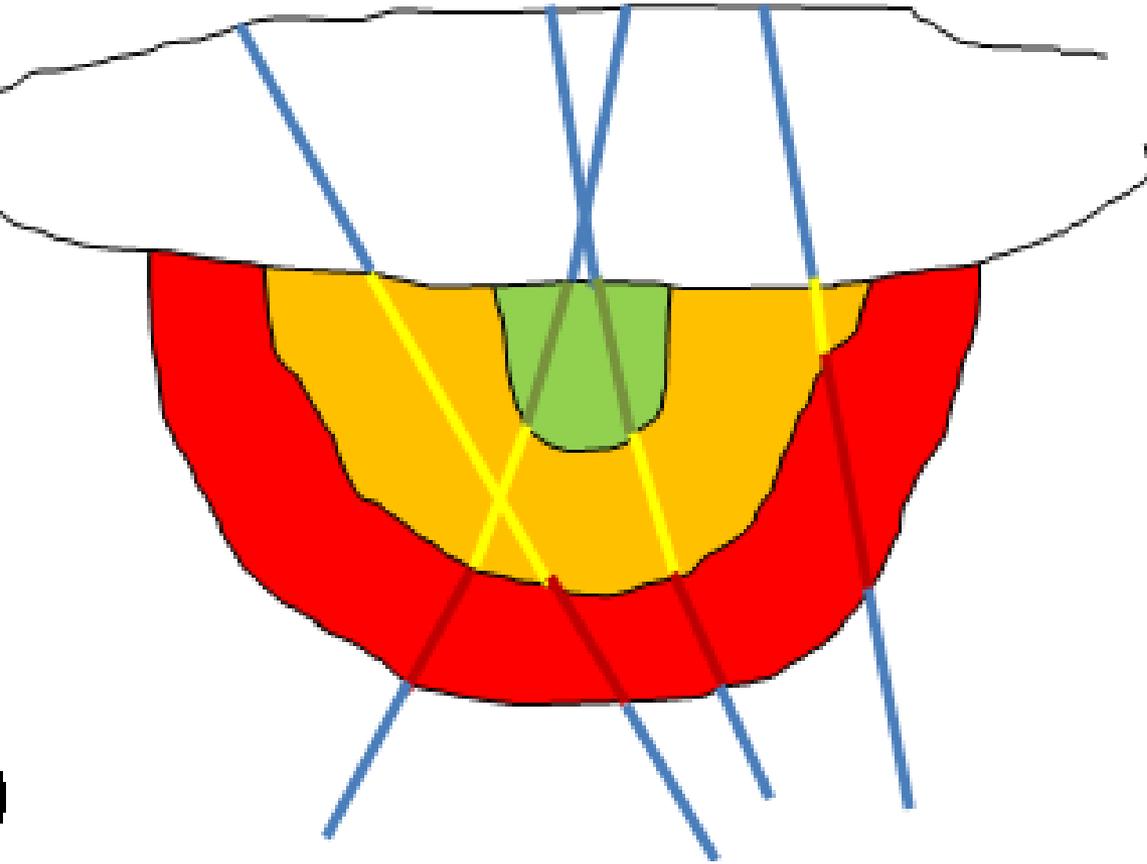


Leyenda

-  Medido
-  Indicado
-  Inferido

200Mton / 5000 metros = 40000 ton/metro

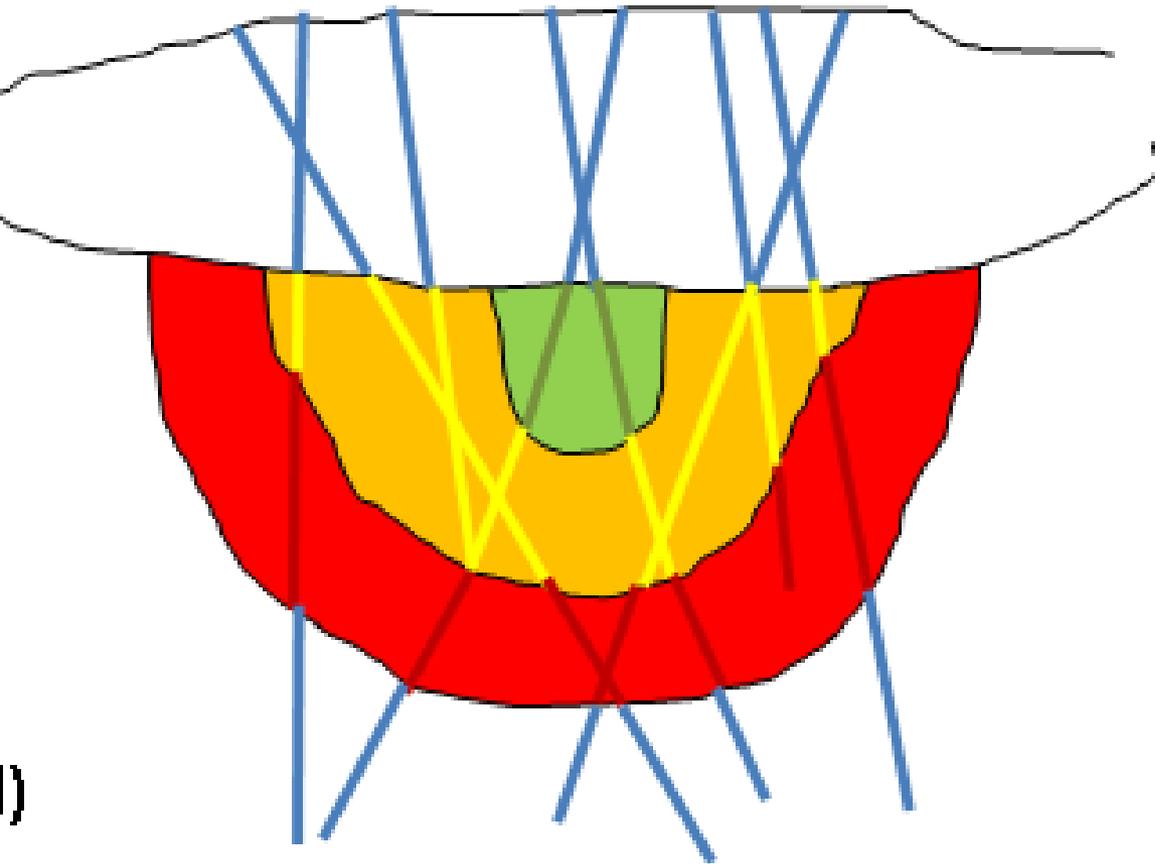
Metodología



Leyenda

-  Medido
-  Indicado
-  Inferido

Metodología

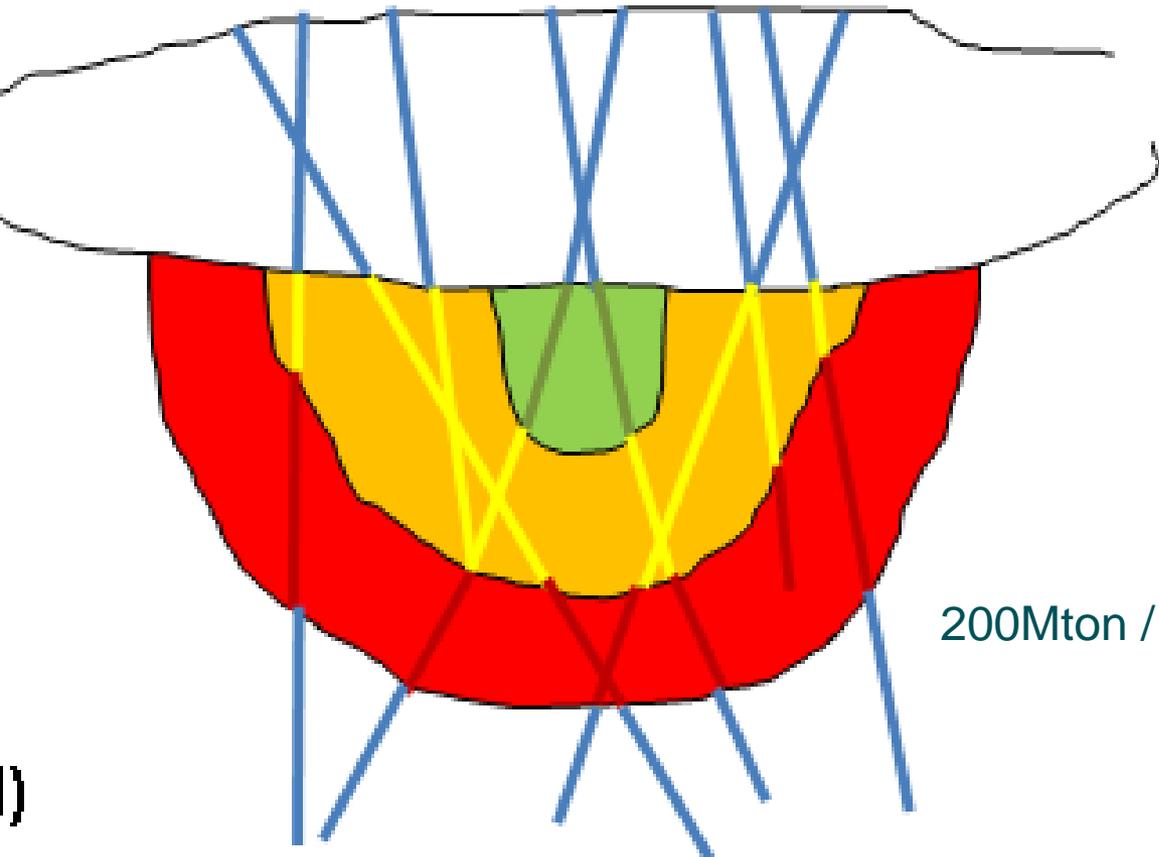


Leyenda

-  Medido
-  Indicado
-  Inferido

Se agregan 3000 mt
en indicados

Metodología



Leyenda

- Medido
- Indicado
- Inferido

200Mton / 8000 metros = 25000 ton/metro

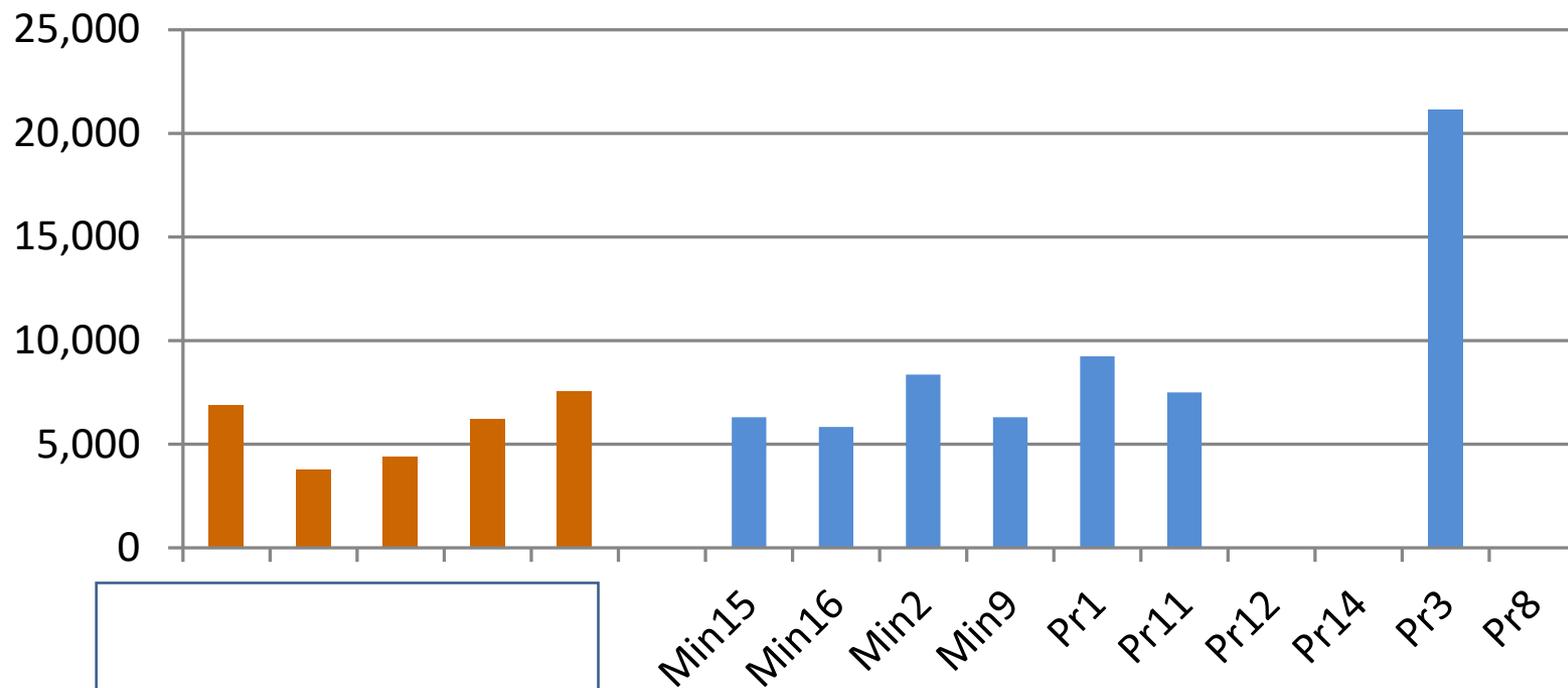
Benchmarking

- 15 depósitos de cobre
 - Mayoritariamente Chile
 - 6 proyectos y el resto minas en operación
 - Características geológicas principales conocidas 15
- 15 pórfidos cupríferos
- Depósitos de: Codelco, AMSA, Xstrata copper, AngloAmerican, BHP entre otros...

TONELADAS POR METRO DE SONDAJES

SULFUROS

Medido Sulfuros [Ton/m]

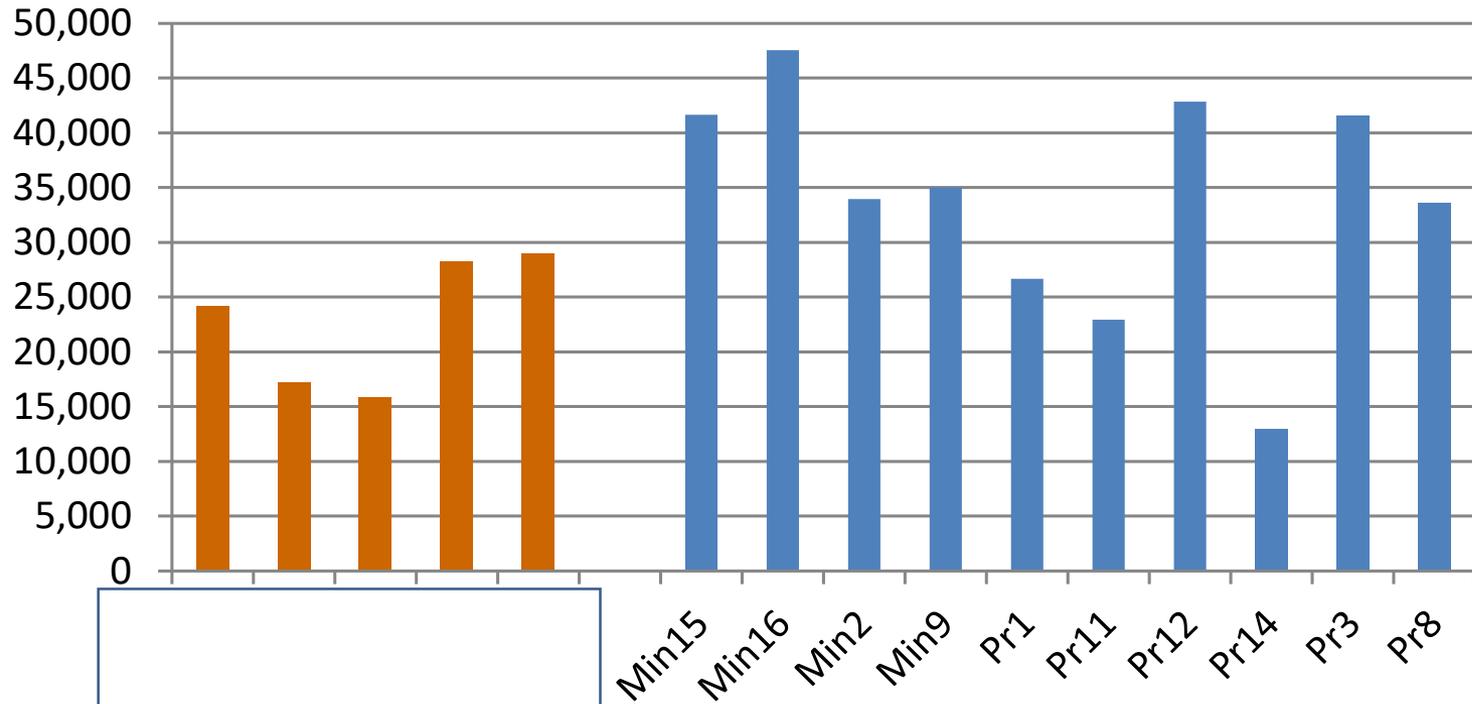


[Empty box]

Global		Resto
7,781	5,746	9,234

Ton/metros categoría indicado

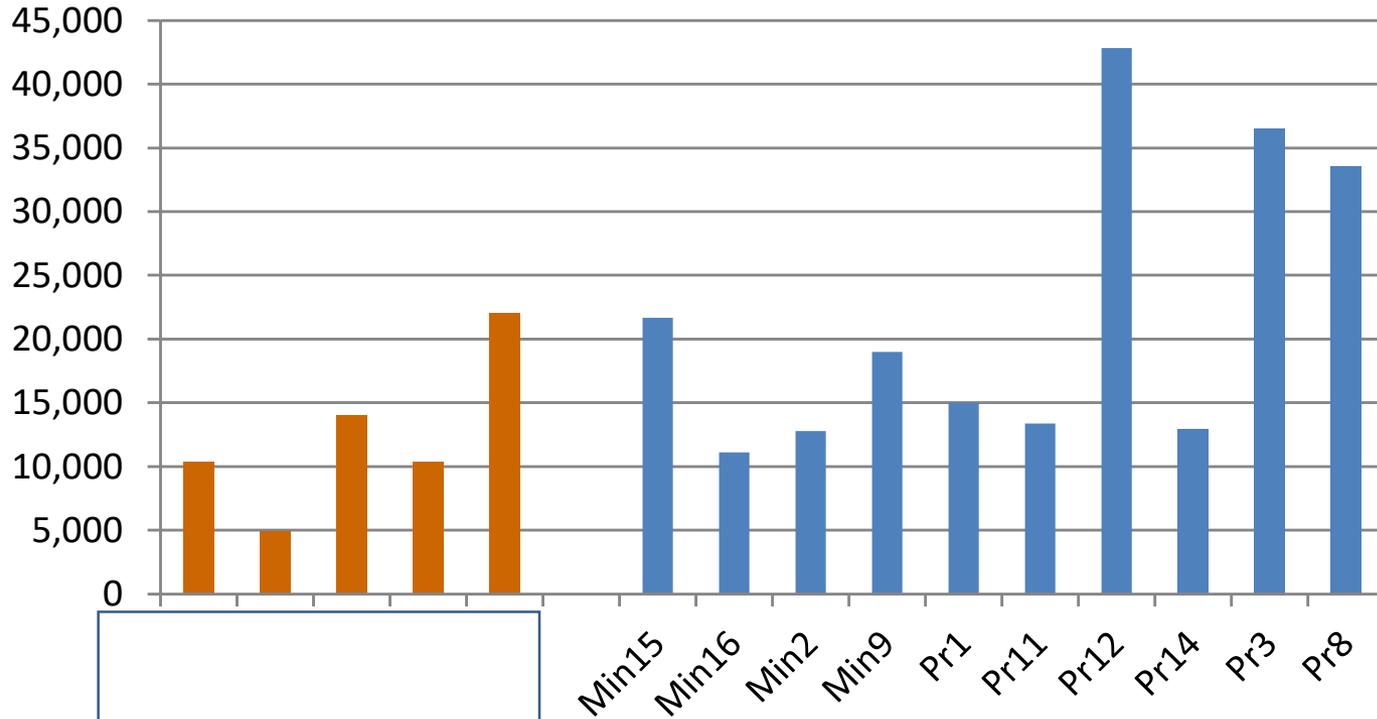
Indicado Sulfuros [Ton/m]



Global		Resto
30,211	22,907	33,001

Ton/metros categoría medido + indicado

Medido+Indicado Sulfuros [Ton/m]



Global		Resto
18,705	12,343	21,363

- Criterio de recursos medidos de la **compañía** esta del orden resto de industria
- Criterios de recursos indicados de la **compañía** tienden a ser más conservadores que resto de faenas → **en el margen**
- Sería recomendable que la **compañía** contara con un sistema comparativo de recursos entre depósitos y proyectos en distintas etapas.

Revisión de algunas metodologías

En general las metodologías **actuales** poseen dos grandes etapas:

- 1) Definición de errores, volúmenes y mallas de sondajes asociados
- 2) Mapeo de densidad de información asociado a errores y volúmenes en modelo de bloques.

1) Metodologías definitorias de errores, dado volúmenes y nivel de información:

1. Datos de producción / conciliación
2. Error relativo de kriging para definir errores y mallas de sondajes asociados
3. Simulación no condicional para definir errores y mallas de sondajes
4. Simulación condicional para definir errores y mallas de sondajes
5. Simulación condicional para clasificación de incertidumbre directa

2) Procesos de mapeo de densidad de información:

1. Varianza de corte para mapeo en modelo de bloques mallas de sondajes.
2. Malla equivalente para mapeo en modelo de bloques de densidad de información
3. Configuración de muestras / pasadas

Metodologías definatorias



METODOLOGÍA 1: BASADA EN ERROR RELATIVO DE KRIGING

Idea central es calcular un error relativo en un volumen de producción a partir de la varianza de kriging, según diferentes niveles de información.

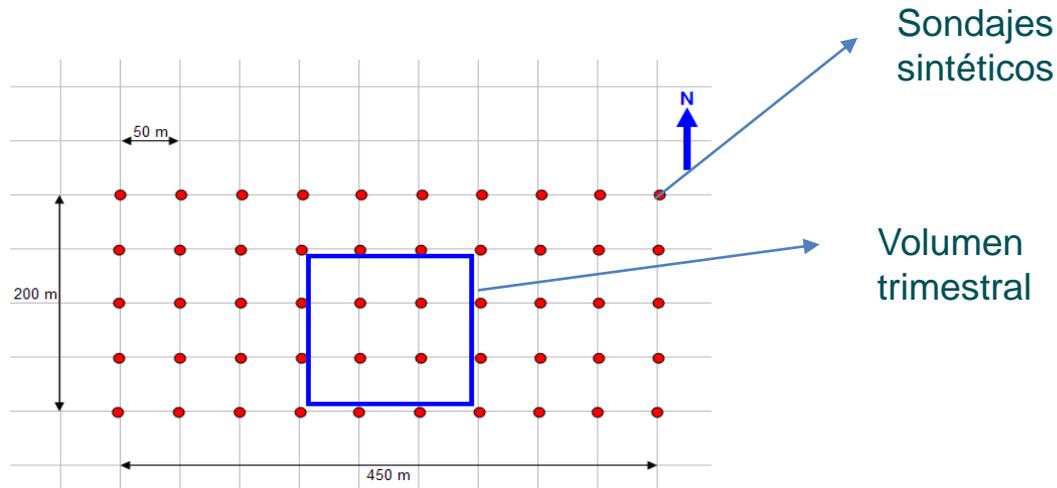
Como input utiliza:

- Variograma por ug
 - Mallas de sondajes sintéticos para emular diferentes niveles de información
 - Volumen de producción conceptual.
-
- Los pasos para su ejecución son los siguientes:
 1. Cálculo del variograma relativo general
 2. Def. volumen de producción
 3. Def. mallas sintéticas (35x35, 50x50, 70x70, 100x100)
 4. Cálculo de varianzas de kriging en volumen de producción con mallas de sondajes sintéticas
 5. Cálculo de error de estimación a partir de varianza de kriging
 6. Definir medidos/indicados/inferidos según errores aceptados y mallas que lo cumplen

1. Determinar el variograma relativo general o equivalentemente, el variograma y estandarizarlo por la media de las muestras al cuadrado
→ Si la media es constante, entonces son iguales
2. Definir el volumen de producción equivalente a un mes, un trimestre y un año
→ Considerar varias frentes independientes si corresponde
- 3-4.
Hacer kriging ordinario de la ley del volumen de producción (mensual con la configuración de muestras existente con sondajes sintéticos a diferentes mallas.
→ Se debe usar alta discretización del volumen de producción
→ Repetir para volúmenes trimestral y anual con diferentes niveles de información

Ilustración pasos 3-4

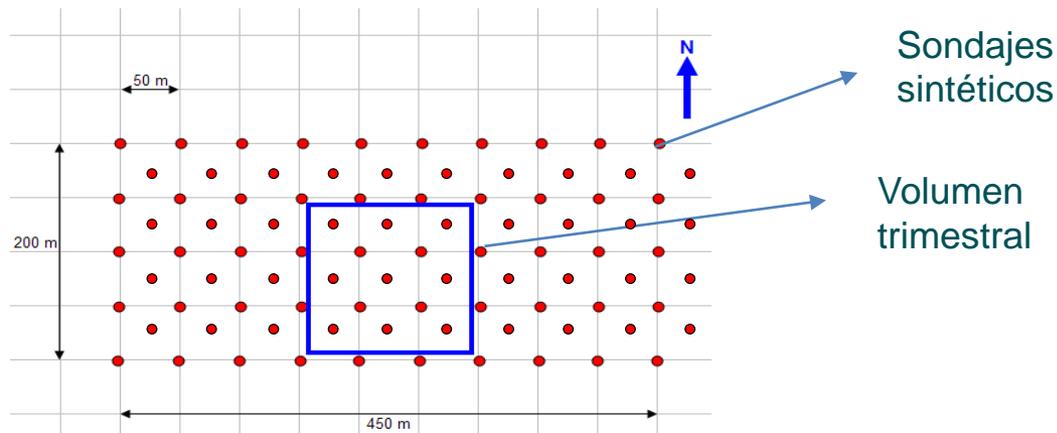
● Ejemplo para una malla de 50x50 y volume trimestral



El ejercicio se realiza para diferentes niveles de información y volúmenes

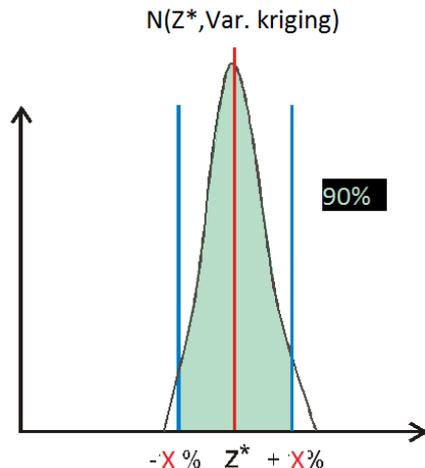
Dado que la varianza de kriging no depende del valor de los datos es sencillo obtener las varianzas de kriging con esta aproximación

● Ejemplo para una malla de 35x35 y volume trimestral



Cálculo de error de estimación

- La varianza de kriging calculada corresponde a una varianza relativa
- Se puede determinar el error estándar y utilizarlo para clasificar
 - Se calcula el error relativo **a un 90% de confianza**, se asume distribución gaussiana con varianza igual a la varianza de kriging del volumen de producción



X es el % error asociado a un nivel de confianza de 90% dado la varianza de kriging del volumen evaluado a cierto nivel de información.

El valor estimado Z^* no es necesario, se assume insesgo

- Se categorizan los recursos como **medidos** si el error estándar para una producción mensual (trimestral) es menor al 15%
- Se categorizan los recursos como **indicados** si el error estándar para una producción trimestral (anual) es menor al 15%
- Se puede determinar la malla de sondeos mínima para definir los recursos en cada categoría

Ejemplo de resultado

		20 ktpd			40 ktpd		
		Measured		Indicated	Measured		Indicated
	Grid	1 month	3 months	1 year	1 month	3 months	1 year
Unit 1	30 x 30	45,8	30,8	15,4	35,9	24,2	12,1
	30 x 60	59,9	42,6	21,3	49,0	33,1	16,5
	60 x 60	70,8	52,1	26,1	59,0	41,6	20,8
Unit 2	30 x 30	20,9	15,8	7,9	17,5	13,1	6,5
	30 x 60	34,8	28,7	14,4	30,8	24,1	12,1
	60 x 60	39,0	32,5	16,3	34,7	27,8	13,9
Unit 3	30 x 30	25,5	18,3	9,1	20,8	14,4	7,2
	30 x 60	38,6	30,5	15,3	33,6	24,4	12,2
	60 x 60	48,1	39,3	19,6	42,6	32,8	16,4

- Metodología válida según JORC:
 - Considera continuidad espacial
 - Considera volumen de producción
 - Cuantifica el error asociado a la estimación

De este modo esta aproximación relaciona un potencial error de estimación, un volumen de producción, una probabilidad y una densidad de información (malla de sondajes)



METODOLOGÍA 2: BASADA EN SIMULACIÓN NO CONDICIONAL + MALLA DE SONDAJES

- Se puede definir una metodología para categorización y definición de mallas “óptimas” de exploración en base a simulación.
- Criterios de clasificación serán del tipo:
 - Recursos **medidos**: aquellos en que el valor real se encuentre en el intervalo de $\pm 15\%$ del valor estimado, un 90% del tiempo, considerando un volumen trimestral.
 - Recursos **indicados**: aquellos en que el valor real se encuentre en el intervalo de $\pm 15\%$ del valor estimado, un 90% del tiempo, considerando un volumen anual.
 - Recursos **inferidos**: los restantes que hayan sido inferidos razonablemente.

Idea central Metodología 2

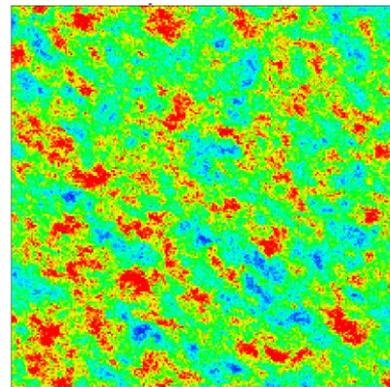
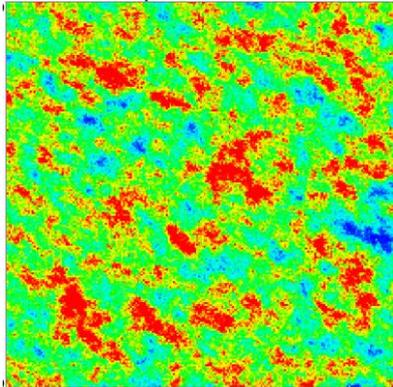
Idea central es determinar la malla de sondajes que asegura una estimación, cuyo potencial error de estimación cumple un criterio de nivel de error (puede ser Ley, Ton o metal) con cierto nivel de confianza, sobre un volumen de producción.

Para ello:

1. Generar simulaciones **no condicionales** (consideran el variograma e histograma)
2. Muestrear estas simulaciones condicionales con sondajes ficticios en distintas “mallas” 50x50 m; 100x 100 etc.
3. Estimar con las mallas ficticias
4. Calcular intervalos de confianza con diferente nivel de información

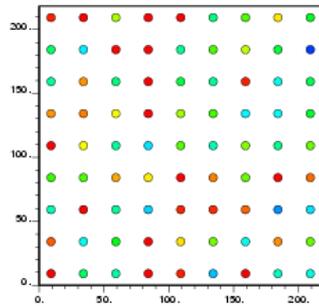
Metodología 2: Simulaciones no condicionales

- Para cada unidad:
 - Desagrupar
 - Transformar a $N(0,1)$
 - Calcular variograma de valores transformados
 - Modelar variograma
 - Simular: Generar 100 realizaciones densas **no condicionales** que reproduzcan el histograma desagrupado y variograma

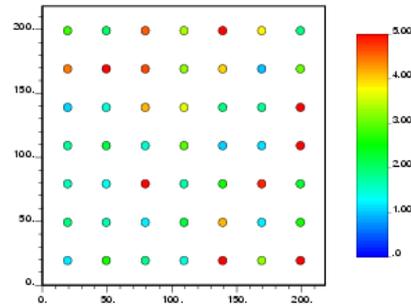


Metodología 2: Muestreo ficticio sondajes sintéticos

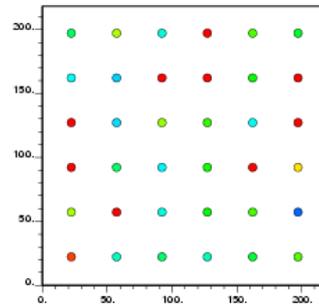
- Validar las realizaciones: reproducción de histograma y variograma
- Calcular el promedio de cada realización para un volumen mensual, trimestral, anual.
- Muestrear cada realización con distintas mallas de exploración (espaciamientos)



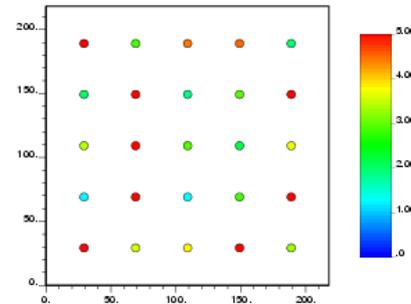
25 x 25



30 x 30



35 x 35



40 x 40

Metodología 2: Cálculo de intervalo

- Hacer kriging a distintos volúmenes de producción
 - Kriging de bloques más pequeños y rebloqueo
 - Kriging de volumen de producción de una sola vez
- Contar cuántas veces el valor real está dentro de cada intervalo ± 10 / 15 / 20% del valor estimado, se considera real el de las realizaciones.
- El número de veces dividido por el número de realizaciones y multiplicado por 100 es la probabilidad de pertenecer a dicho intervalo

Niveles de errores

V Malla

	Grid	±5%	±10%	±15%	±20%
Monthly	25	83.2	90.8	95.0	99.1
	30	71.7	82.2	92.3	97.9
	35	60.5	77.7	90.5	96.6
	40	57.1	69.0	87.8	95.8
	Grid	±5%	±10%	±15%	±20%
Quarterly	25	85.8	94.8	98.3	100.0
	30	78.5	91.0	97.3	99.8
	35	68.3	87.0	96.5	99.5
	40	61.8	79.8	92.8	98.0
	Grid	±5%	±10%	±15%	±20%
Yearly	25	92.0	100.0	100.0	100.0
	30	85.0	99.0	100.0	100.0
	35	81.0	97.0	100.0	100.0
	40	74.0	95.0	99.0	100.0

Probabilidades

Por ejemplo: si fijo un error de un 15% a volumen mensual la malla de 35x35 cumple con esa condición con una probabilidad de 90.5%

Dicho de otro modo: una **malla de 35x35** m, permite generar una estimación con un **error de +-15%** en un **volumen mensual**, con una probabilidad de 90.4%



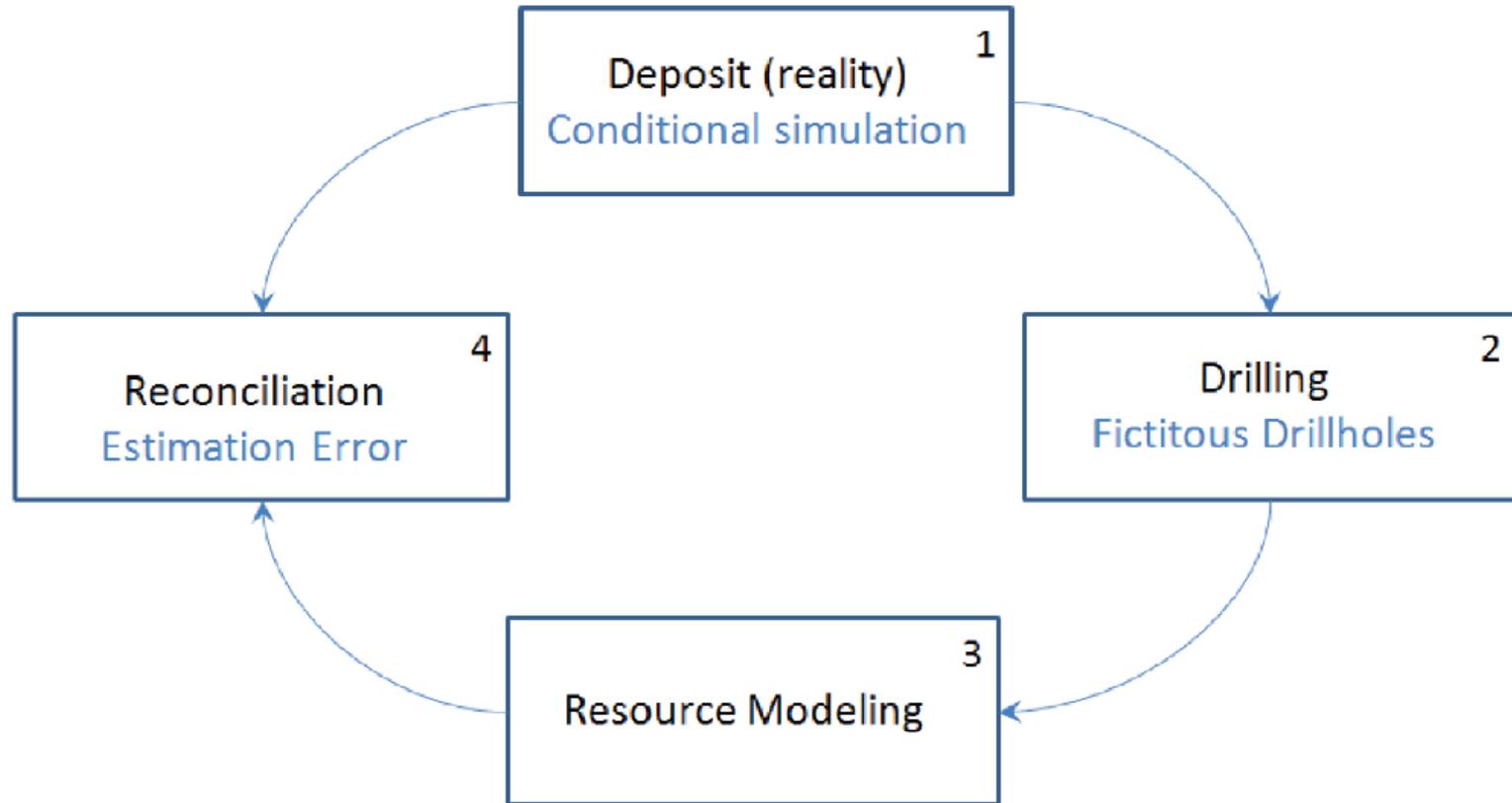
**METODOLOGÍA 3: BASADA EN
SIMULACION CONDICIONAL+
MALLA DE SONDAJES
“ESTUDIO DE MALLA”**

Idea central metodología 3

Determinar potenciales errores de estimación con diferentes niveles de información, para diferentes volúmenes de producción, luego determinar la malla de sondajes que se asocia al nivel de error aceptado.

Procedimiento:

1. Generar simulaciones condicionales de leyes y geología
2. Generar mallas de sondajes ficticias con diferentes espaciamentos
3. Modelar la geología y estimar recursos usando mallas de sondajes ficticias con diferentes espaciamentos
4. Generar conciliaciones de realizaciones de las simulaciones condicionales (consideradas como la realidad) vs. los modelos estimados con diferente información.
5. Definir las mallas asociadas al nivel de error definido para cierto volumen de producción

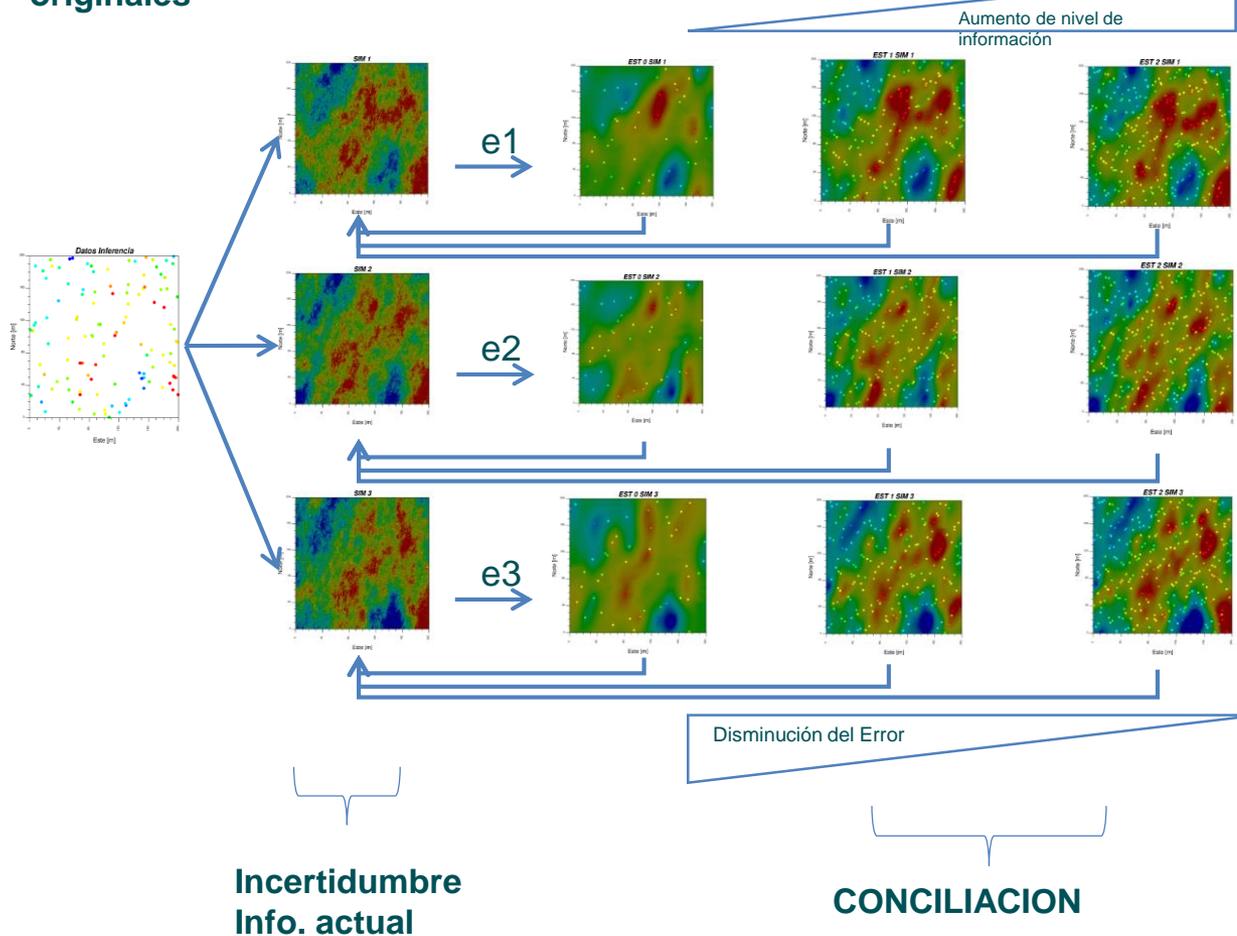


Metodología gráfica

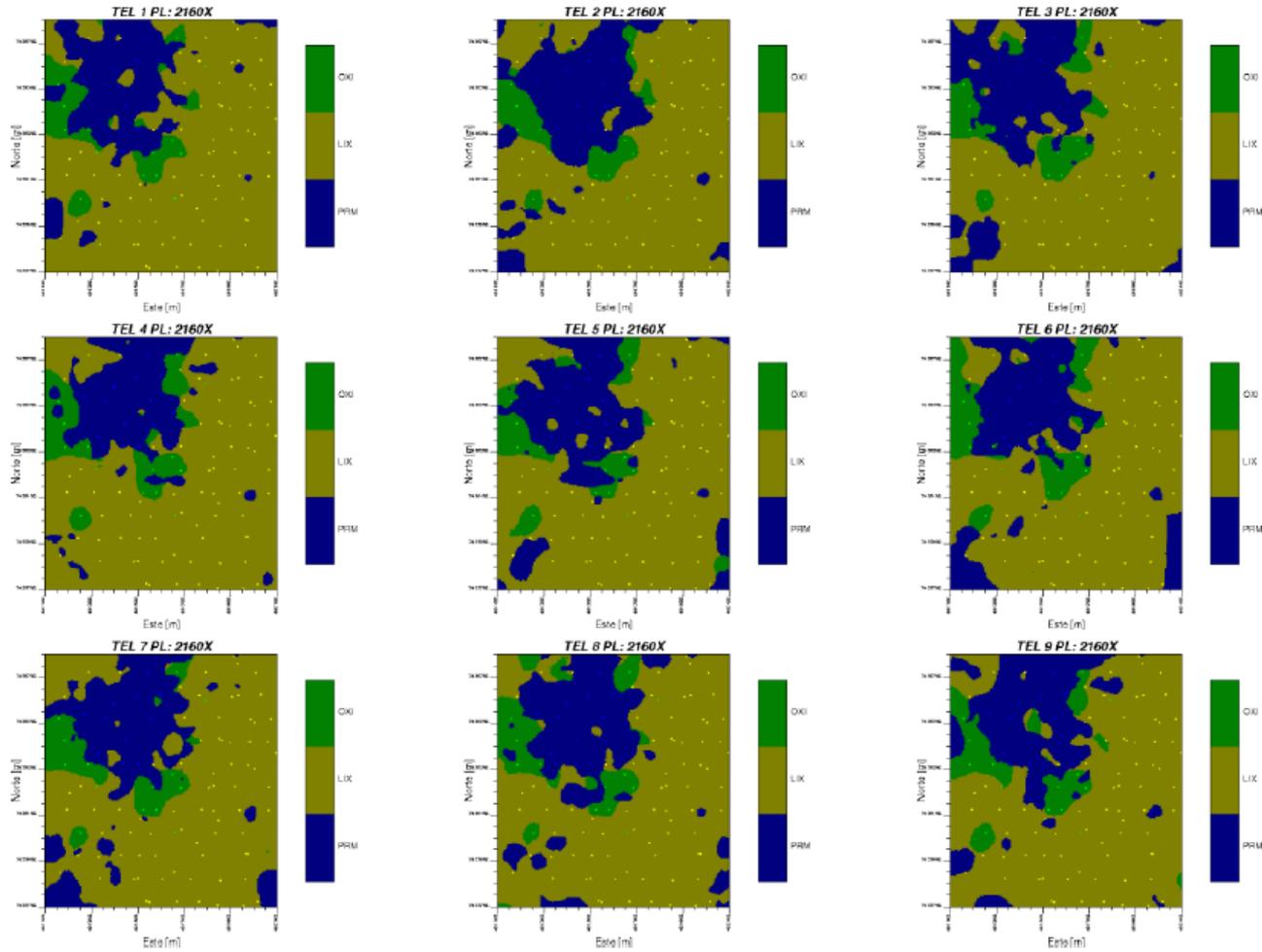
Muestras originales

Realizaciones

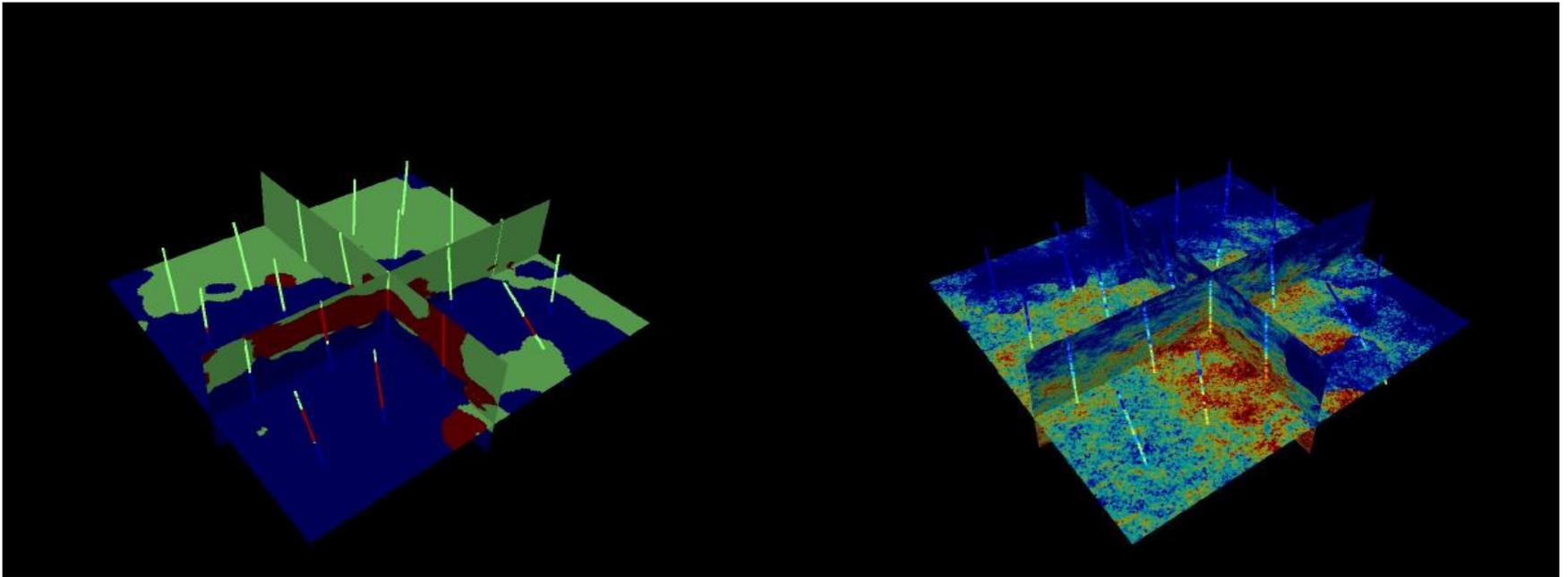
Muestreo y estimación



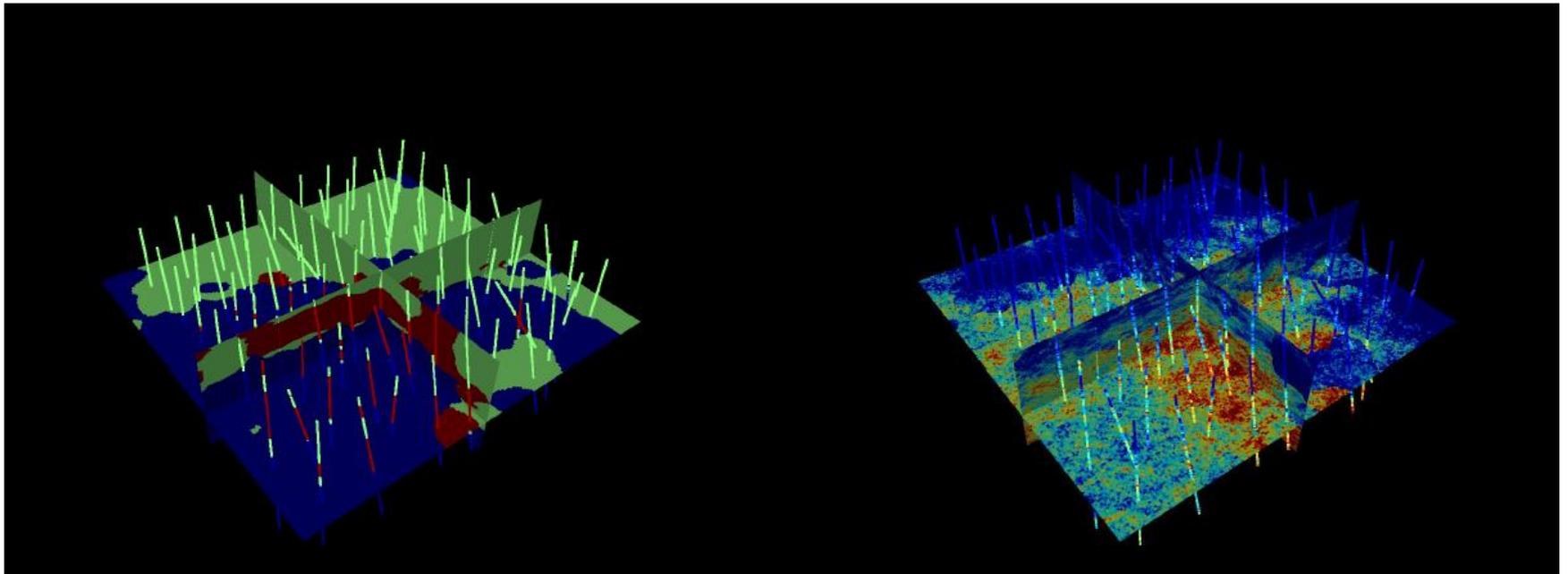
Simulaciones Geología



Se muestrea geología y leyes de cut desde realizaciones

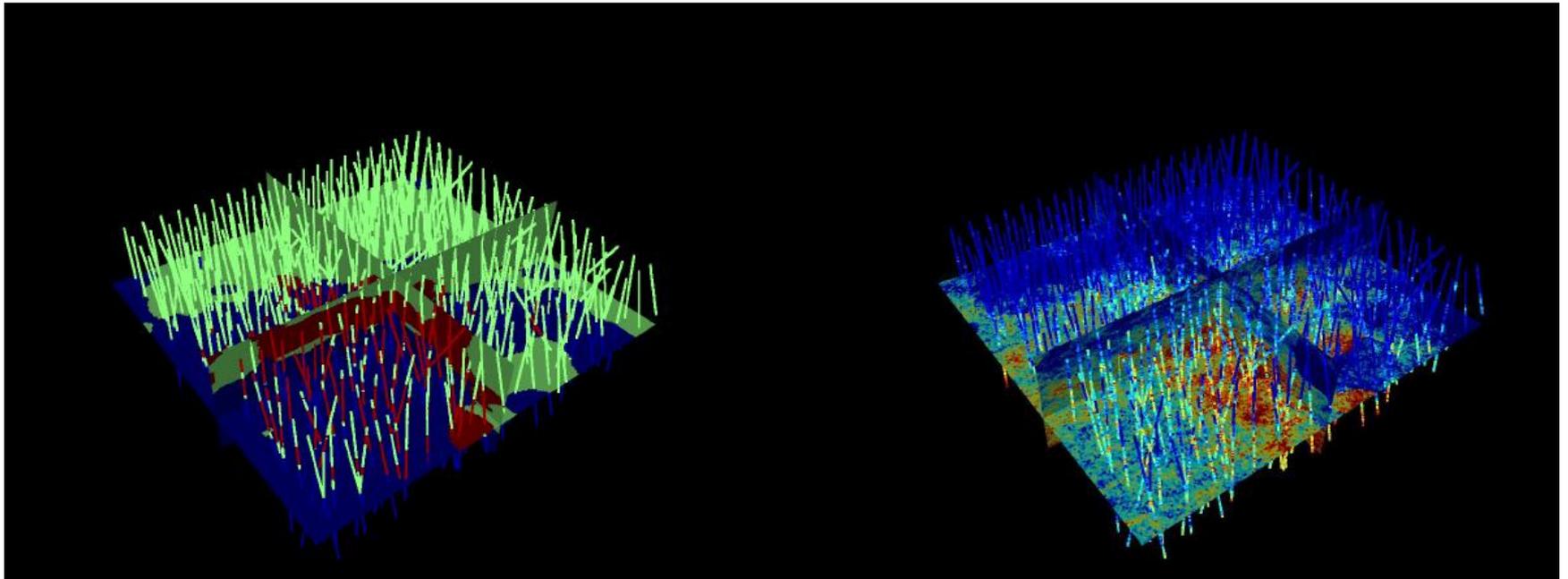


Se muestrea geología y leyes de cut desde realizaciones



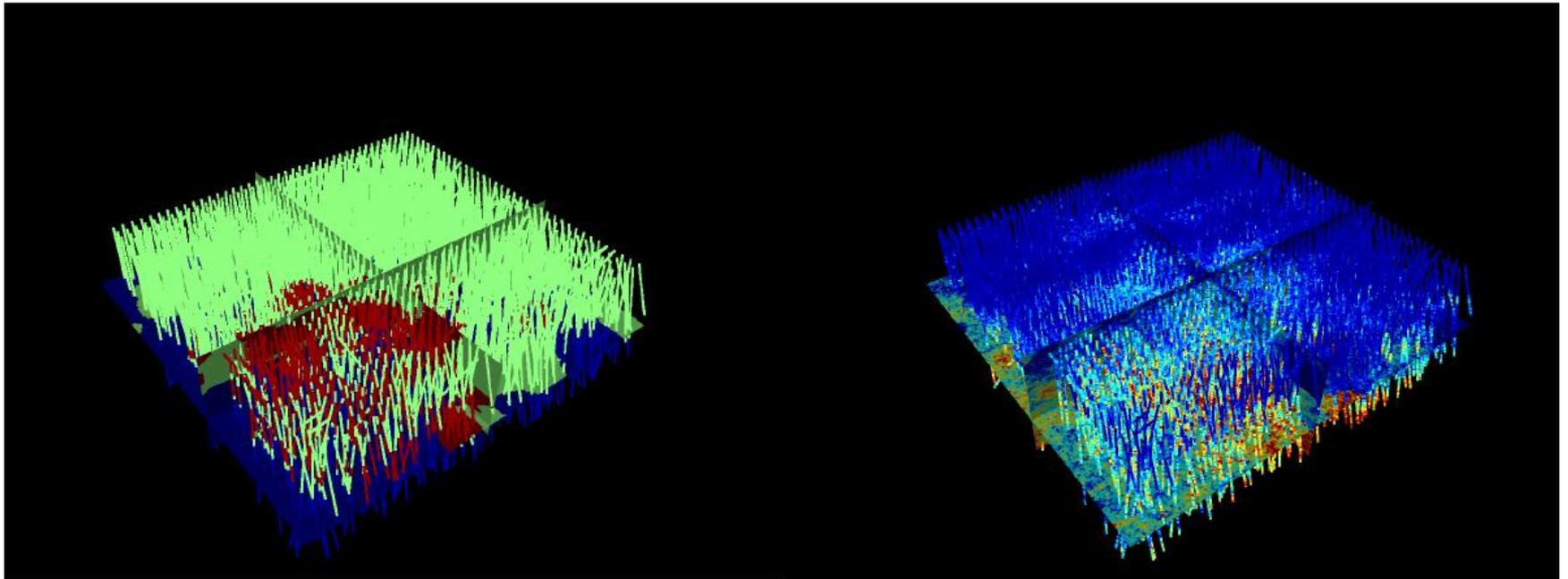
Mallas de muestreo 50 m

Se muestrea geología y leyes de cut desde realizaciones



Mallas de muestreo 25 m

Se muestrea geología y leyes de cut desde realizaciones

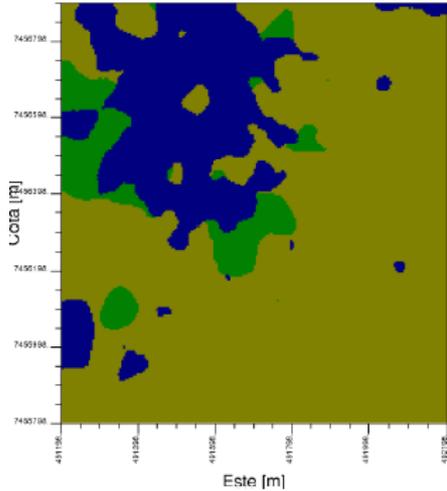


Modelos con distinta información

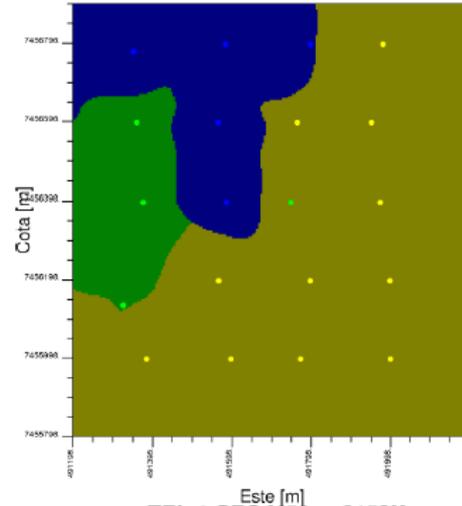
Modelos geológicos con diferentes mallas de sondajes

“realidad”,
Simulación
condicional

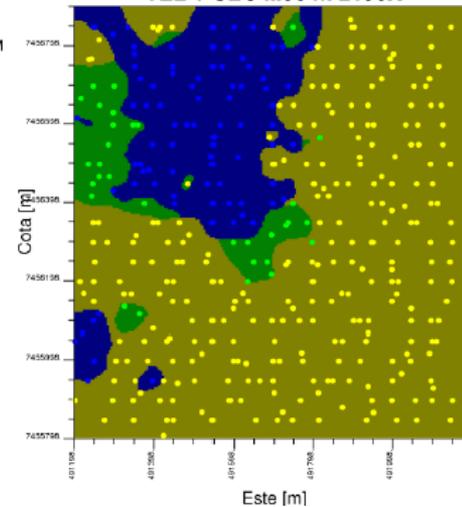
TEL 1 SEC 2158X



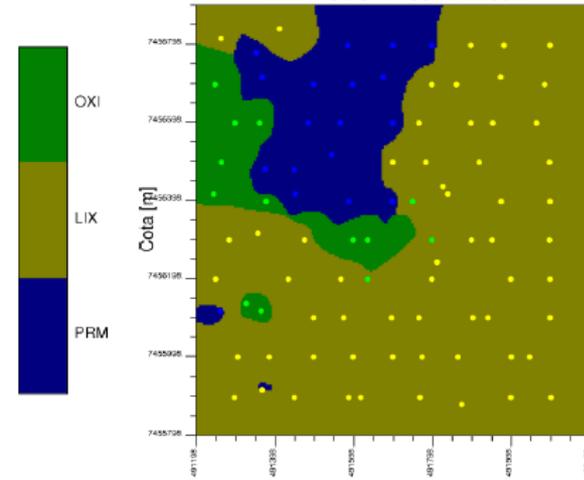
TEL 1 SEC M200 m 2158X



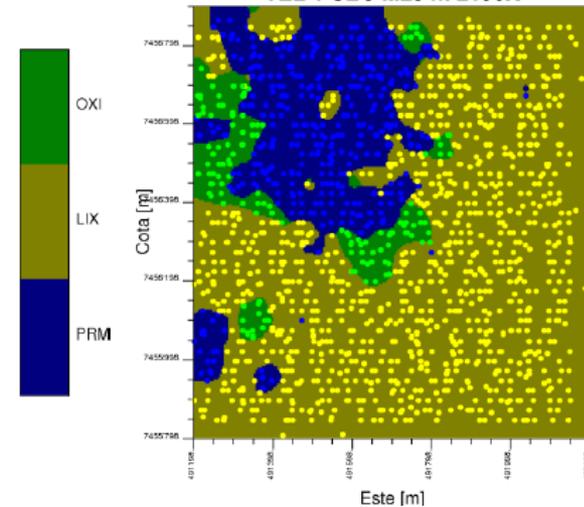
TEL 1 SEC M50 m 2158X



TEL 1 SEC M100 m 2158X



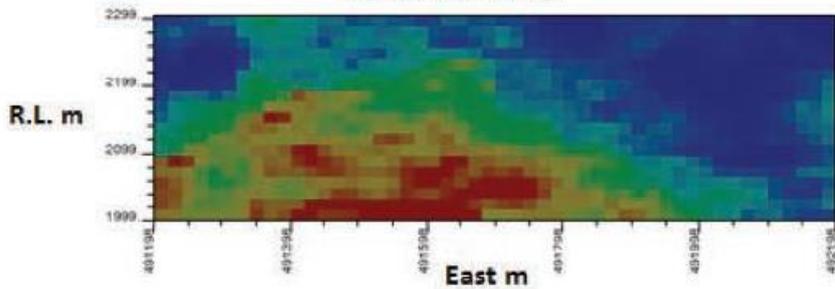
TEL 1 SEC M25 m 2158X



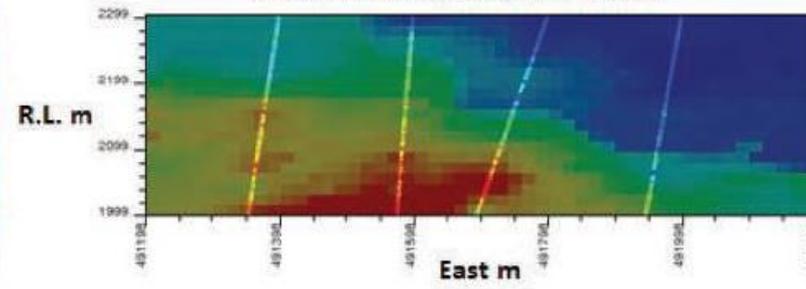
Modelos con distinta información

“realidad”, simulación condicional

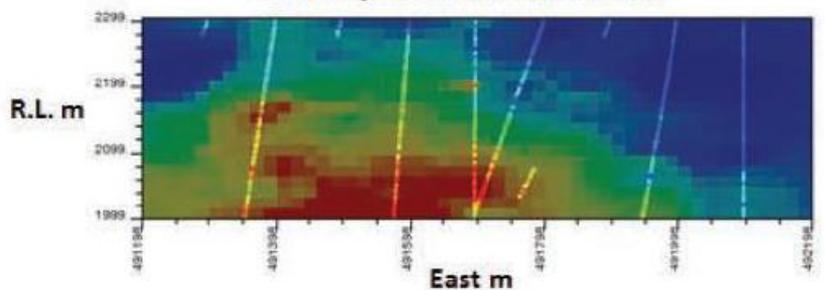
Target realisation



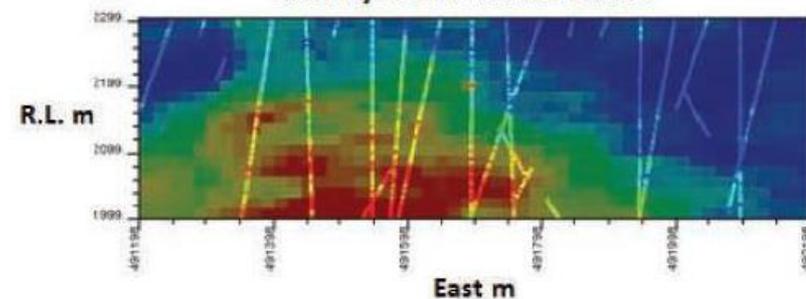
200 m by 200 m Resource model



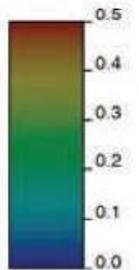
100 m by 100 m Resource model



50 m by 50 m Resource model

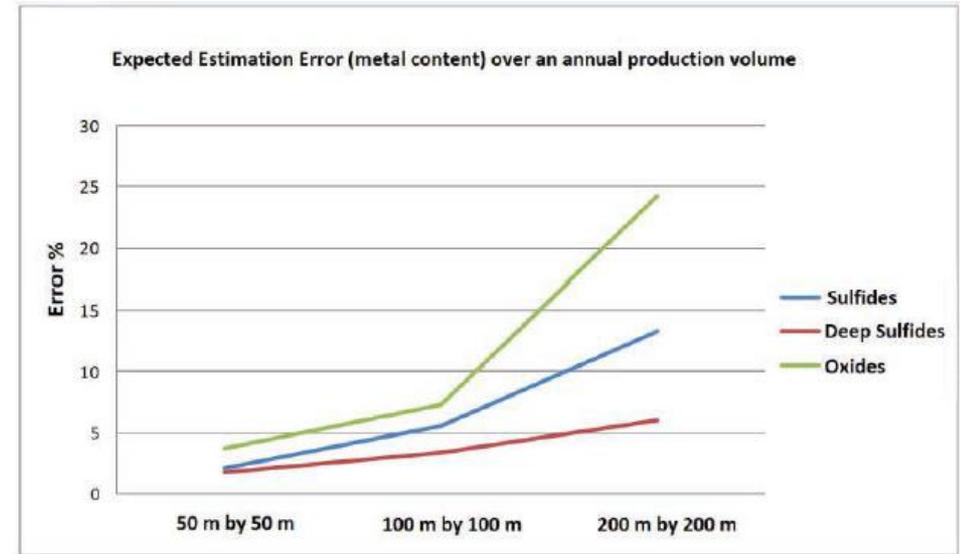
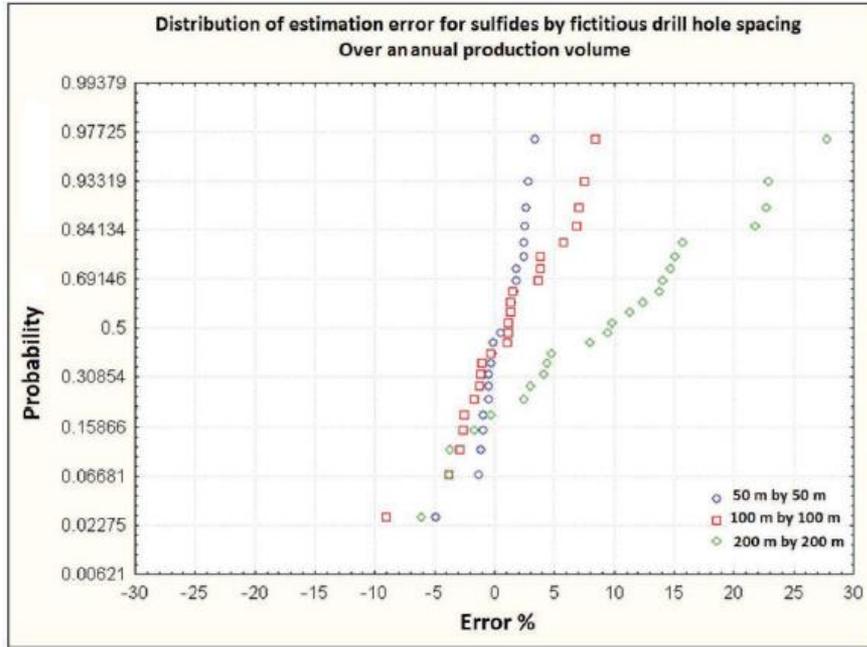


Copper grades



Estimaciones de cut con distinta información usando modelos geológicos asociados a diferentes mallas

Relación Errores, nivel de información

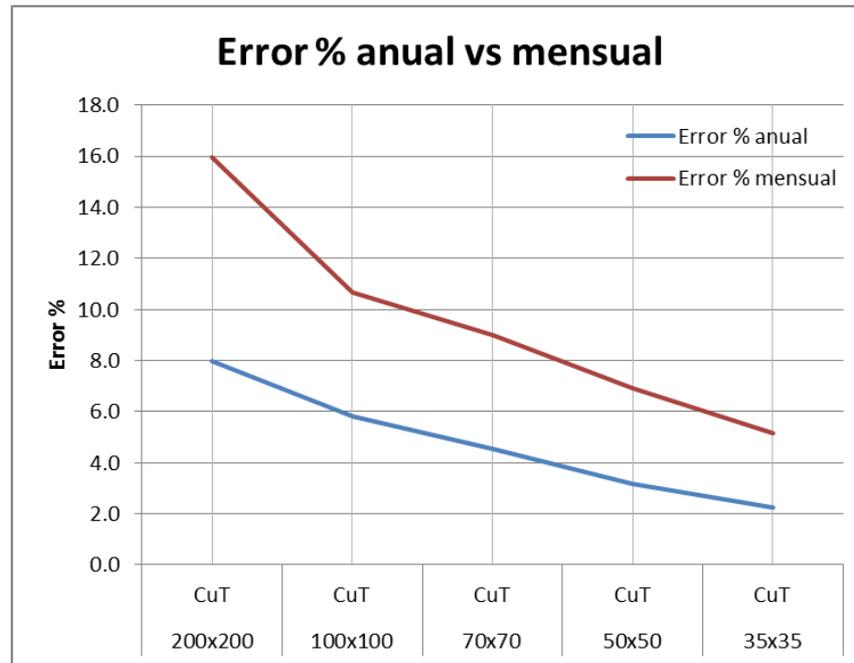


Diferentes errores con diferentes mallas, volúmenes de producción y zonas del depósito, es este ejemplo con el mismo nivel de información las zonas de óxidos presentan mayor error en un volumen anual futuro real.

Paso siguiente es mapear la malla en el modelo de bloques con la información disponible

Errores de estimación anuales vs mensuales

Anuales vs Mensual, CuT



Malla	Variable	Error % anual	Error % mensual
200x200	CuT	8.0	16.0
100x100	CuT	5.8	10.7
70x70	CuT	4.5	9.0
50x50	CuT	3.2	6.9
35x35	CuT	2.2	5.1

Resultados de otro análisis comparando errores anuales y mensuales



**METODOLOGÍA 4: BASADA EN
SIMULACION CONDICIONAL
MÉTRICAS DE INCERTIDUMBRE EN
VOLÚMENES MÓVILES**

La idea central es tomar decisiones usando métricas de incertidumbre, derivadas de simulaciones condicionales de geología y leyes.

Procedimiento:

1. Generar simulaciones condicionales de geología y leyes
2. Definir métricas de incertidumbre → intervalo de confianza del 90% del set de realizaciones
3. Efectuar cálculo en volúmenes móviles, relevantes a la producción
4. Clasificar directamente sobre la métrica de incertidumbre en el modelo de bloques.

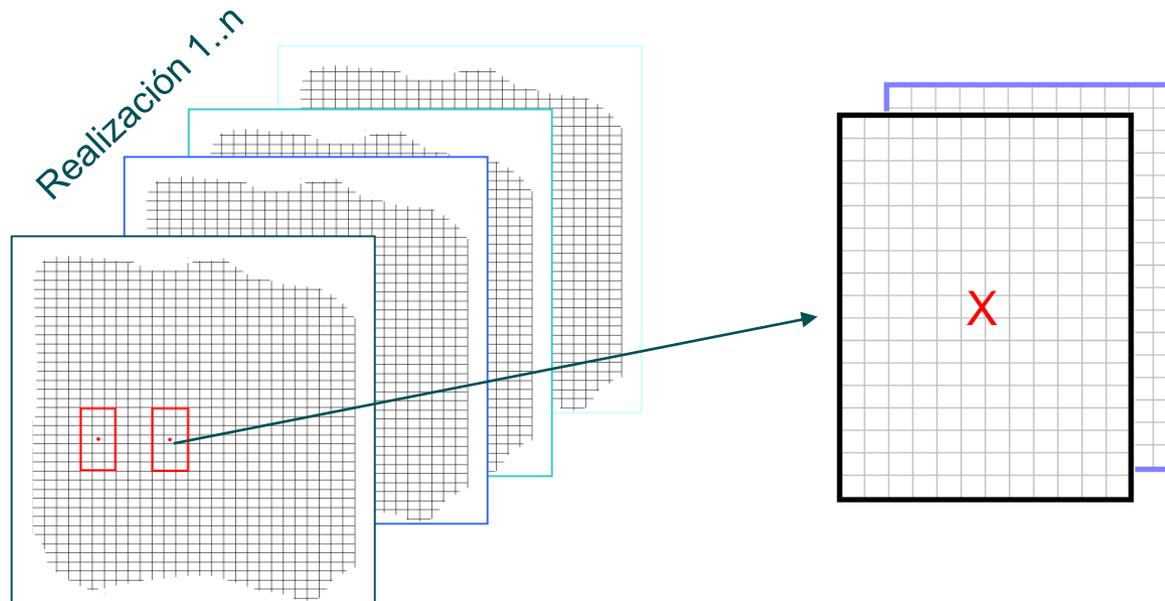
Notar que la incertidumbre es mapeada directamente en el modelo de bloques teniendo un carácter más local

- Corresponden a volúmenes de dimensiones asociables a algún volumen de producción (2 semanas, mes, trimestre) en torno a cada bloque.
- La idea es rescatar métricas del volumen móvil y registrarlas en el el bloque central o SMU
- Luego es posible tomar decisiones sobre un volumen con significancia técnica y económica.

Volúmenes móviles

No enviamos bloques aislados a la planta, necesitamos reflejar confianza en volúmenes mayores al SMU

Panel móvil de
volumen V

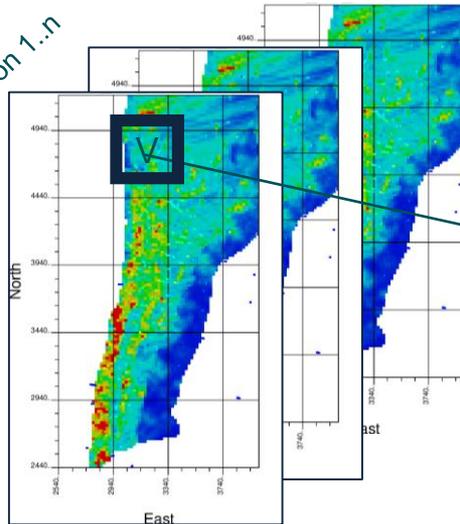


Para cada bloque se pueden calcular métricas de incertidumbre en un vol mayor y registrarlas en el bloque

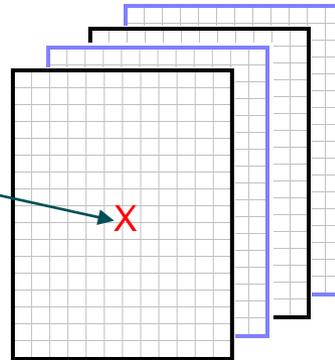
Medidas de incertidumbre local

No enviamos bloques aislados a la planta, necesitamos reflejar confianza en volúmenes mayores al SMU

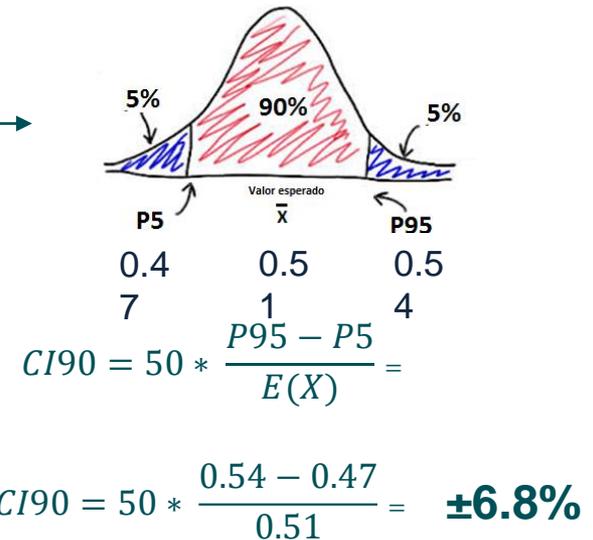
Realización 1..n



Moving Panel centered at each block

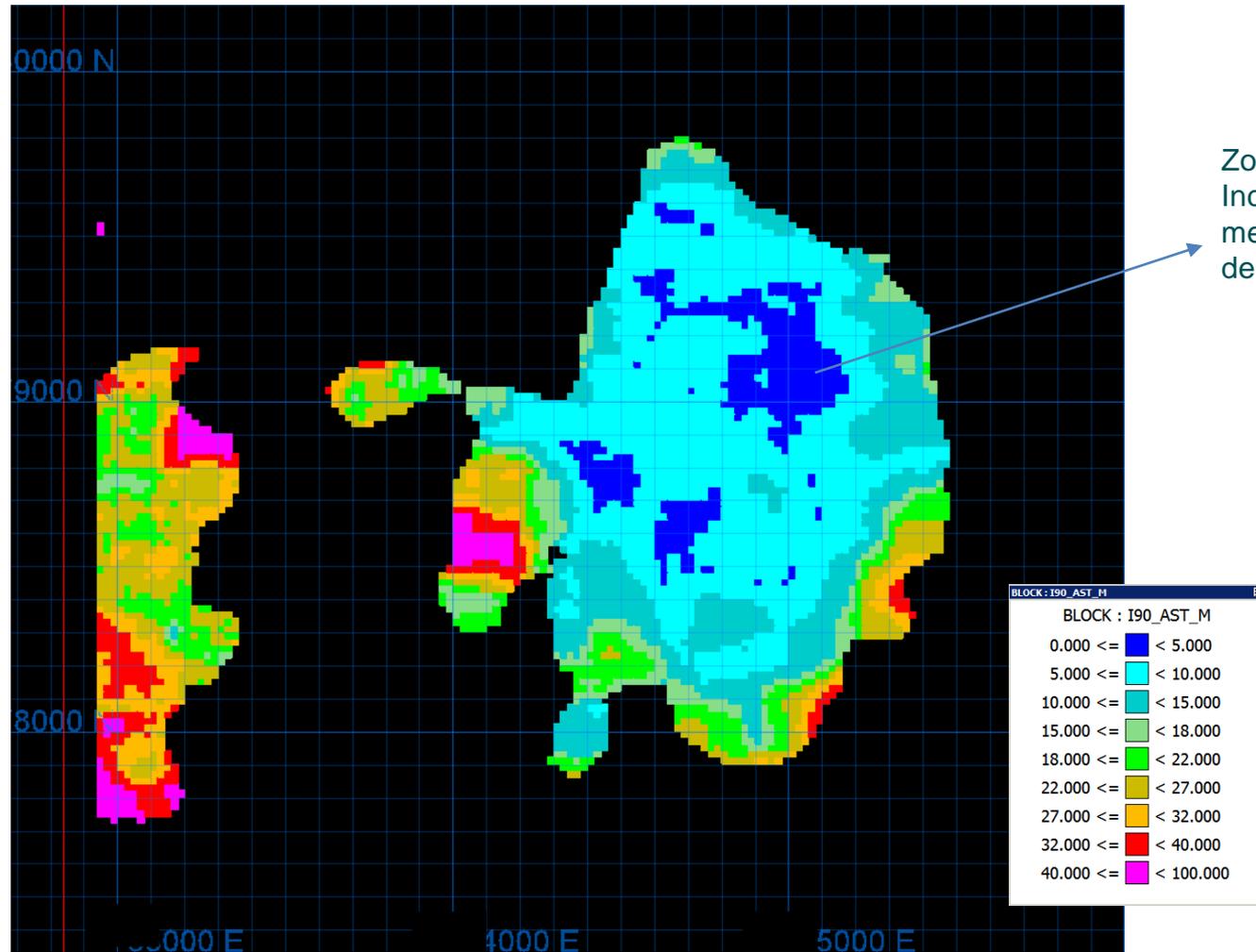


- Grades, Tonnage and metal content above a given cog



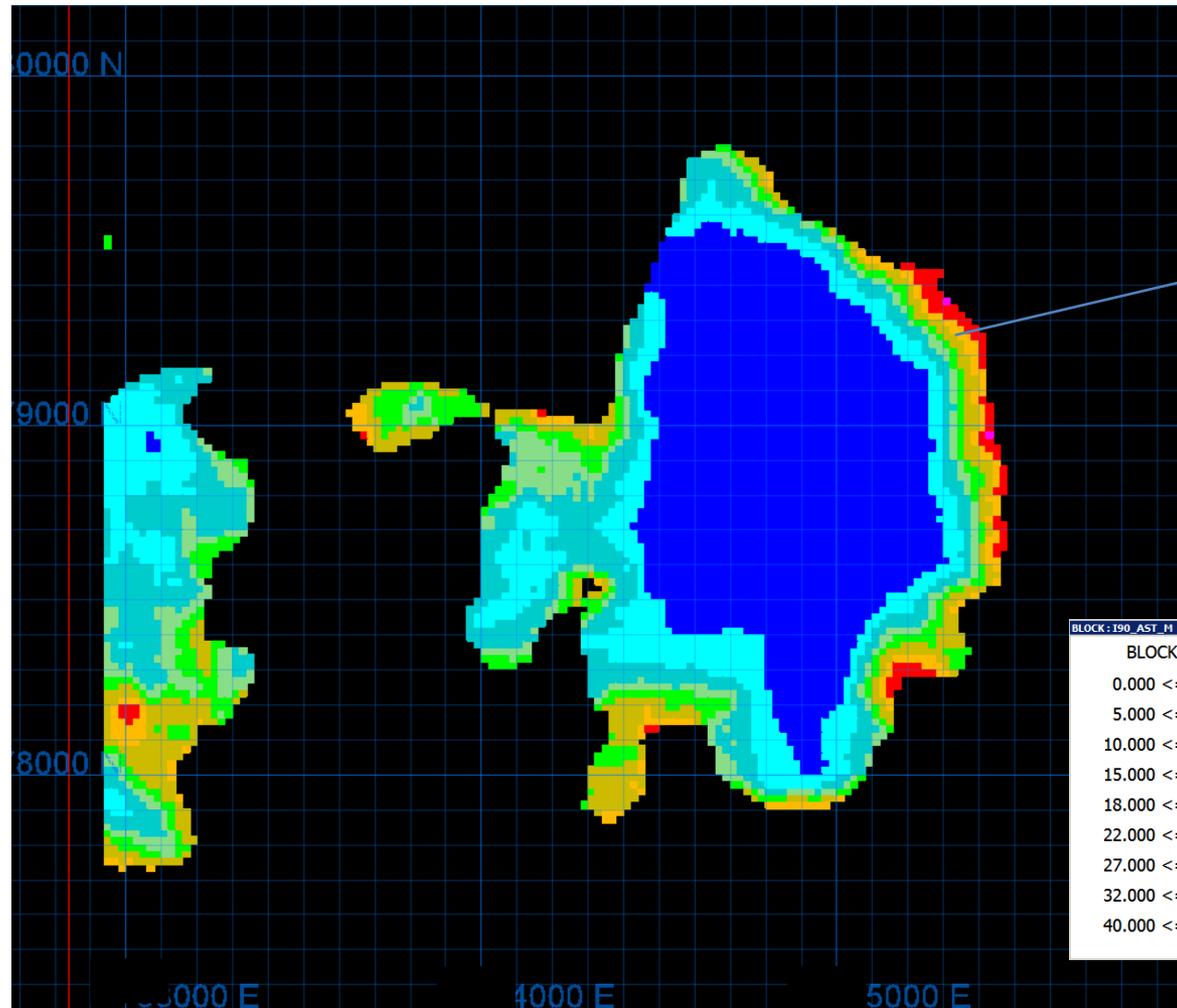
- The uncertainty metrics are registered at block support but reflect a larger volume

Mapas de incertidumbre Ley Cut – Vol mensual



Errores en ley $\geq 0.4\%$ Cut

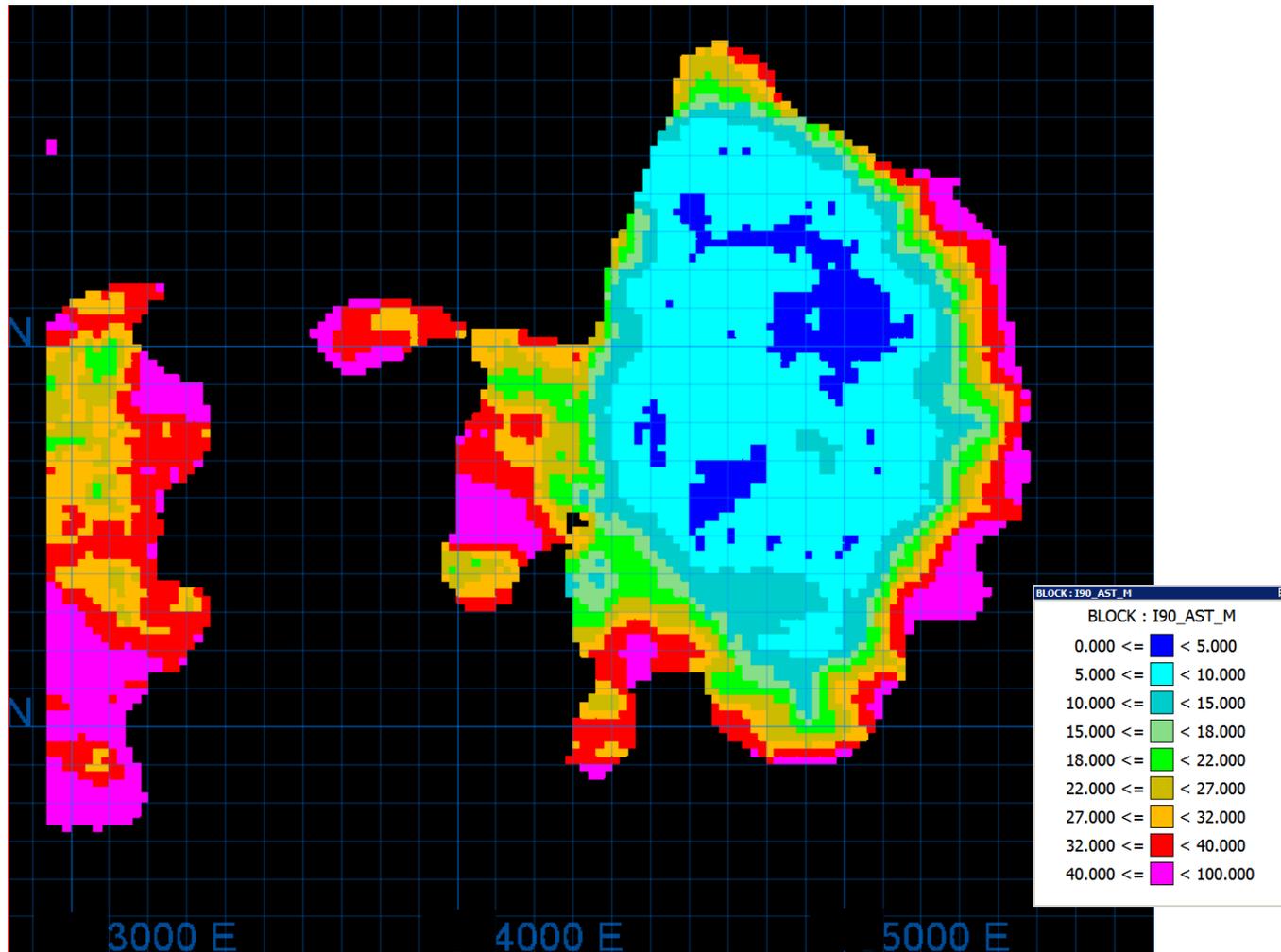
Mapas de incertidumbre en tonelaje Cut – Vol mensual



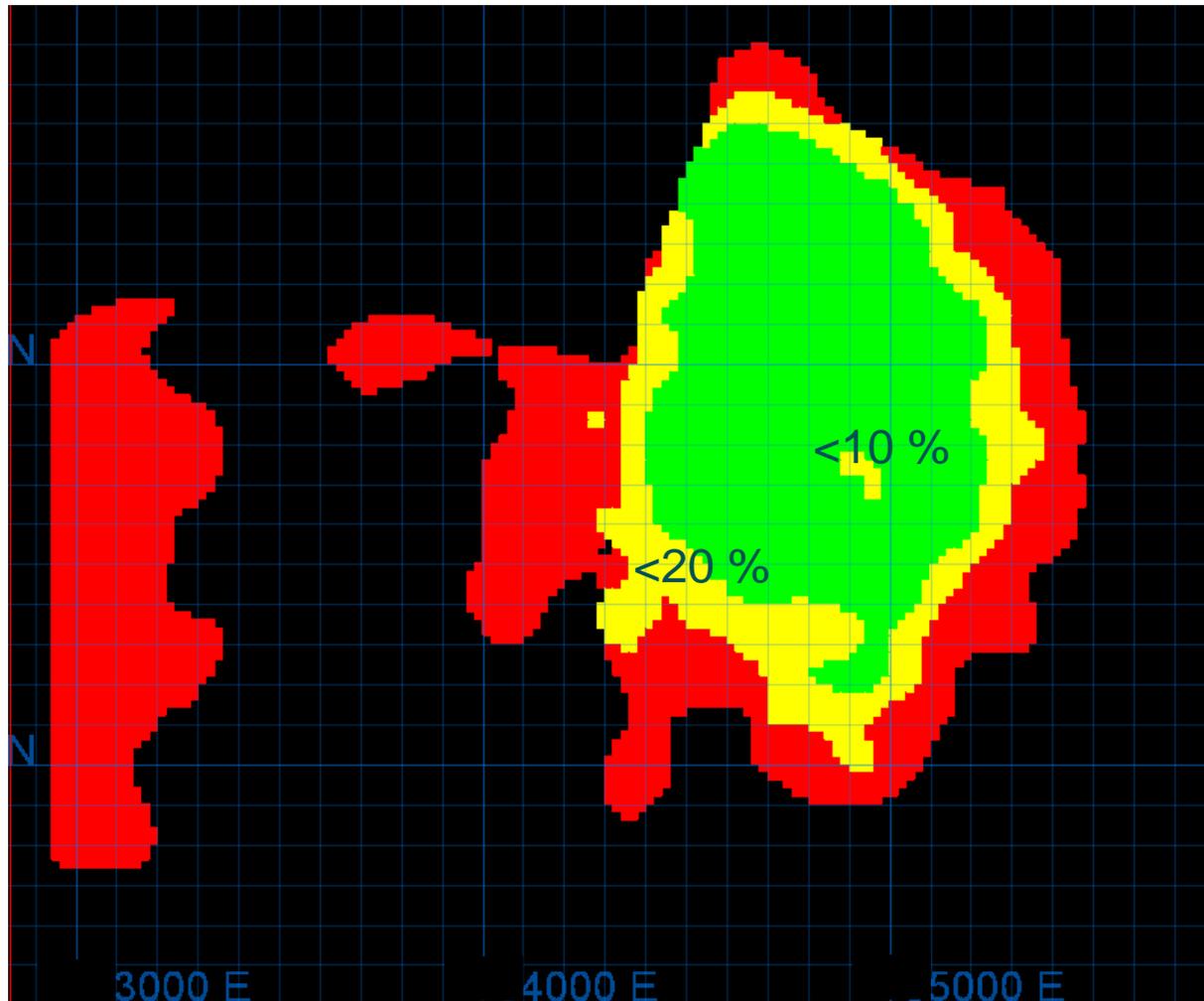
Borde con alta incertidumbre mensual en tonelaje sobre umbral de corte de cut, figura mapea geometria de pórfido

Errores en Tonelaje $\geq 0.4\%$ Cut

Incertidumbre mensual Metal



Zonificación de incertidumbre metal



Clasificación realizada usando un 10% de error en volumen mensual para medidos y 20% para indicados.

Metodologías de mapeo densidad de información



MAPEO DENSIDAD DE INFORMACIÓN: **VARIANZAS DE KRIGING**-MALLA DE SONDAJES

Idea central mapeo por varianzas de kriging

- Idea central es relacionar la varianza de kriging con una **mall**a de **sondajes**, es decir, cual es la **varianza de kriging de corte** de una malla de 50x50 o 100x100m

Para ello:

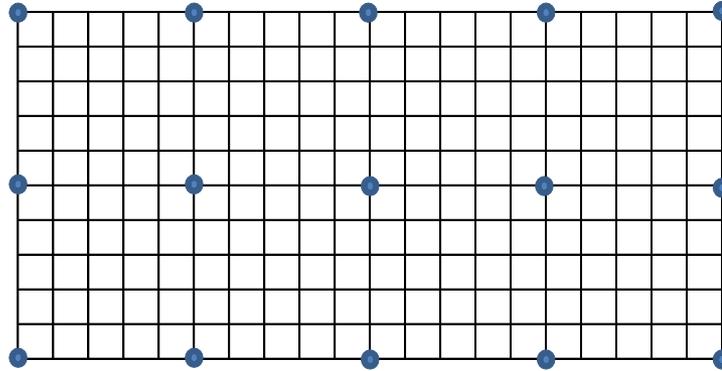
- Con distintas mallas de sondajes ficticios
- Usando el variograma de cada unidad
- Determinar las varianzas de kriging de corte asociadas a cada malla
- Definir Medidos, indicados e inferidos en función de esas **varianzas de corte** las cuales están relacionadas a ciertas mallas de sondajes cuya pertinencia fue previamente establecida por alguna metodología definitoria.

Establecer link malla de sondajes-varianza de kriging

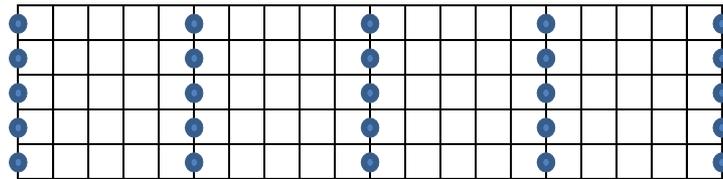
- Se debe estimar usando kriging en bloques del mismo tamaño del modelo, por ejemplo bloques de 10 x 10 x 10 m³
- Generar malla de sondajes ficticios y usar estos “datos” para calcular la **varianza de kriging**, notar que no se necesitan los valores de leyes solo las posiciones de los datos (Ver varianza de kriging).

Malla de sondajes emulada

- Vista en planta, malla de sondajes de 50 x 50 m, bloques de 10 x 10 x 10 m

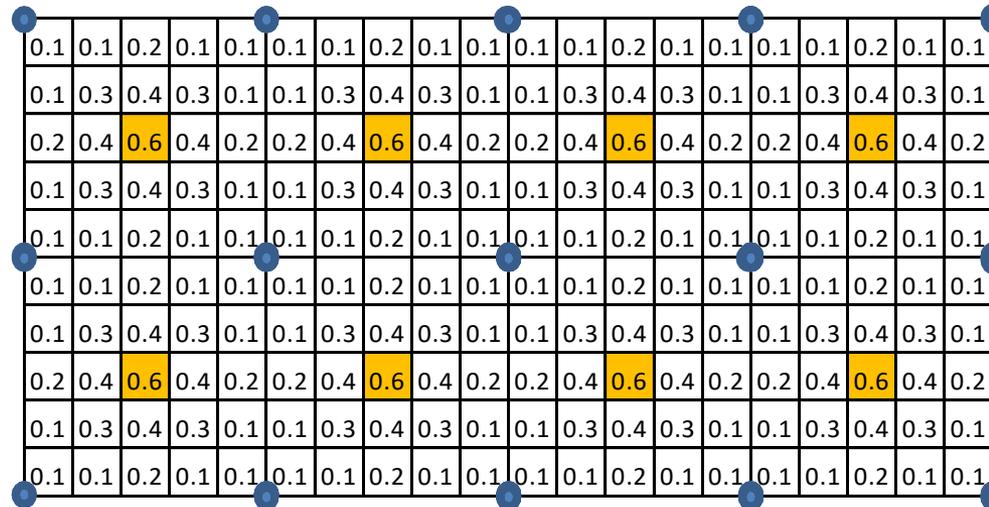


- Sección vertical, “compositos” cada 10 m



Obtener varianza de kriging máxima

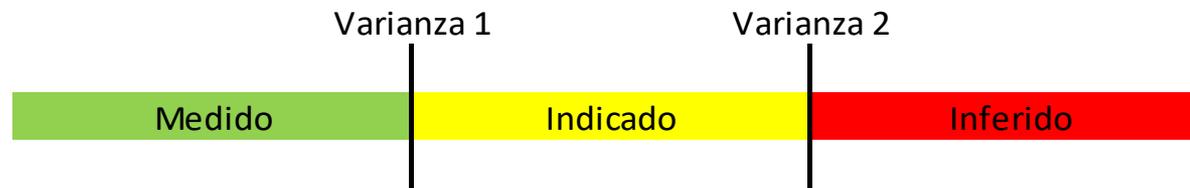
- Determinar para cada **mallado de sondajes**, la **varianza de kriging máxima**.



- El objetivo es definir una varianza de kriging que será el límite para clasificar un bloque como medido, indicado o inferido según corresponda a la mallado de sondajes analizada.

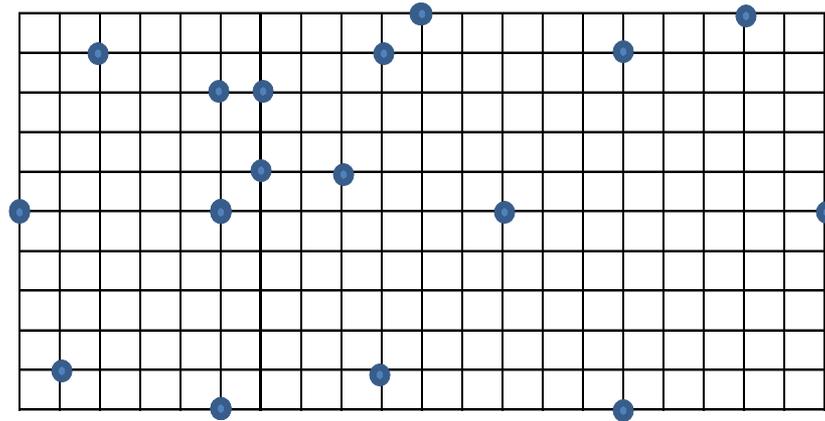
Obtener varianza de kriging máxima

- En el caso anterior si la malla de sondajes de 50 x 50 m es adecuada para clasificar medidos, entonces los bloques con una varianza de kriging menor a 0.6 pueden ser definidos como medidos.
- El proceso anterior debe ser realizado también para la malla de sondajes que define los bloques indicados. De esta manera se obtienen 2 varianzas de corte que definen la categoría de un bloque.



Kriging con los datos reales

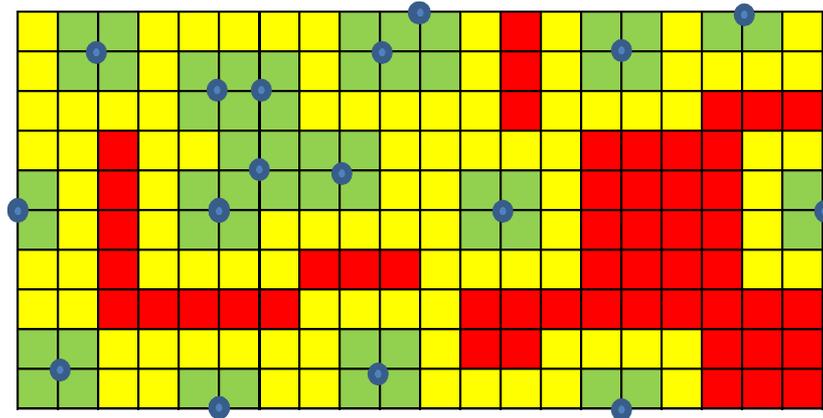
- El paso siguiente es estimar por kriging pero esta vez usando los datos reales.



- Como en el caso anterior no importan los valores de los datos sino solo la posición de estos.
- Como resultado de la estimación cada bloque tendrá asociada una varianza, a partir de esta varianza el bloque será clasificado.

Clasificación

- Con las varianzas por bloque es posible realizar una primera clasificación



- La limitación del método es que genera “tubos” de recursos medidos en las proximidades de los sondajes.
- Es necesario suavizar la clasificación.



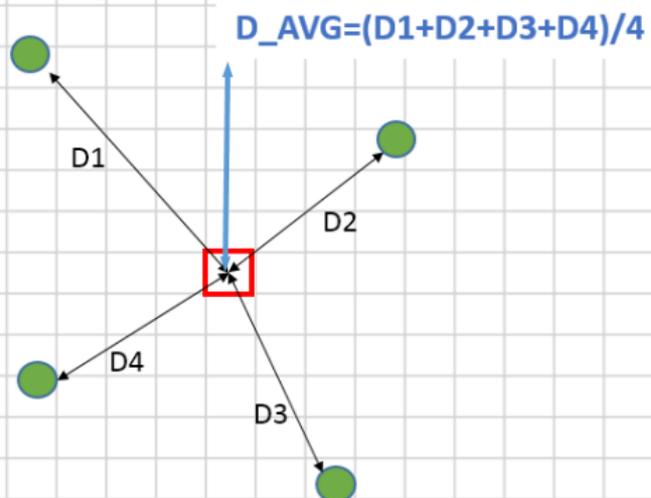
MAPEO DENSIDAD DE INFORMACIÓN: **MALLA EQUIVALENTE** - MALLA DE SONDAJES

Proceso de mapeo de malla equivalente

- Idea central es establecer la malla cuadrada a nivel local asociada a la información actual que tiene agrupamiento y no es regular.
- En la implementación, se usa una distancia a 3 o 4 sondajes, usando una búsqueda en general subhorizontal y restricciones de sondajes y/o octantes
- Se guarda la distancia promedio y se procede con el cálculo de la malla cuadrada equivalente.
- Definir Medidos, indicados e inferidos en función de esas **mallas equivalente** las cuales están relacionadas a ciertas mallas de sondajes cuya pertinencia fue previamente establecida por alguna metodología definitoria.

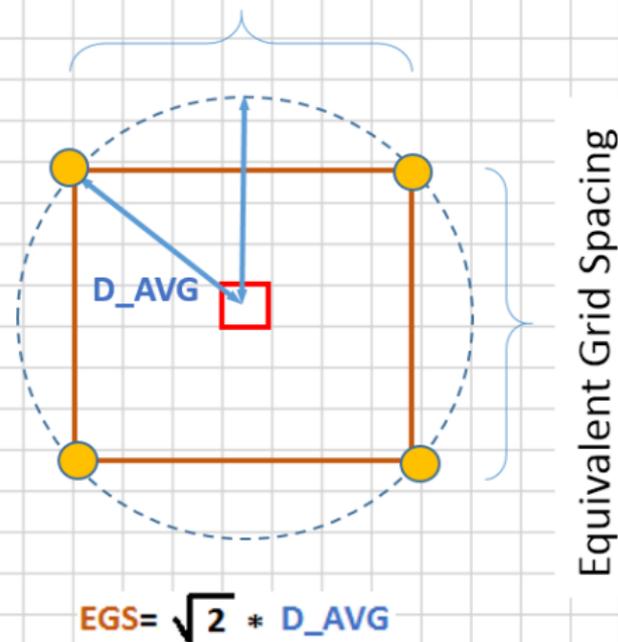
Calculo de distancia a sondajes y malla equivalente cuadrada

Real samples configuration



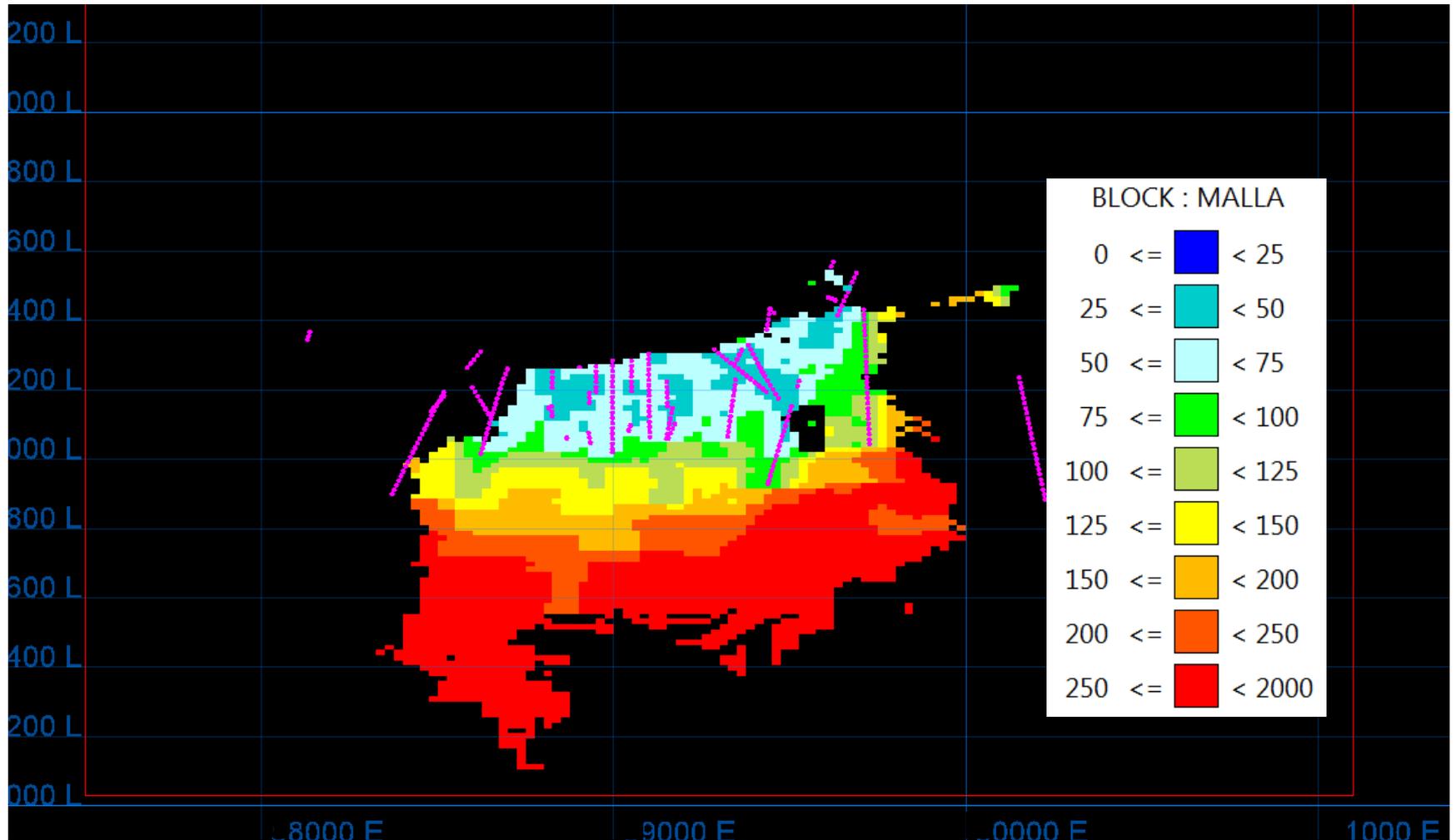
- Real samples
- Target Block

Equivalent Grid Spacing



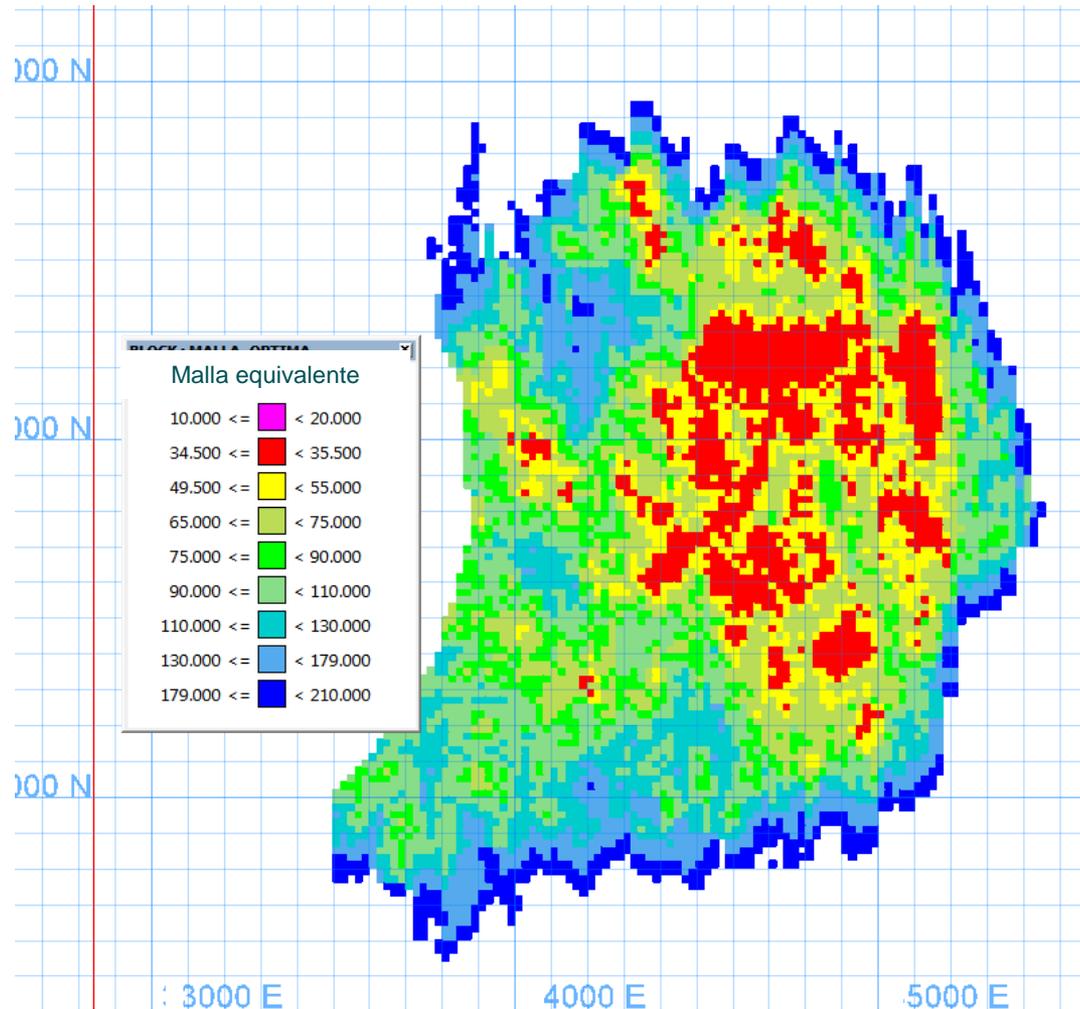
- Equivalent samples
- Target Block

Malla equivalente



Zona con sondajes tiene una malla equivalente entre 50x50 a 75x75 m

Malla equivalente actual

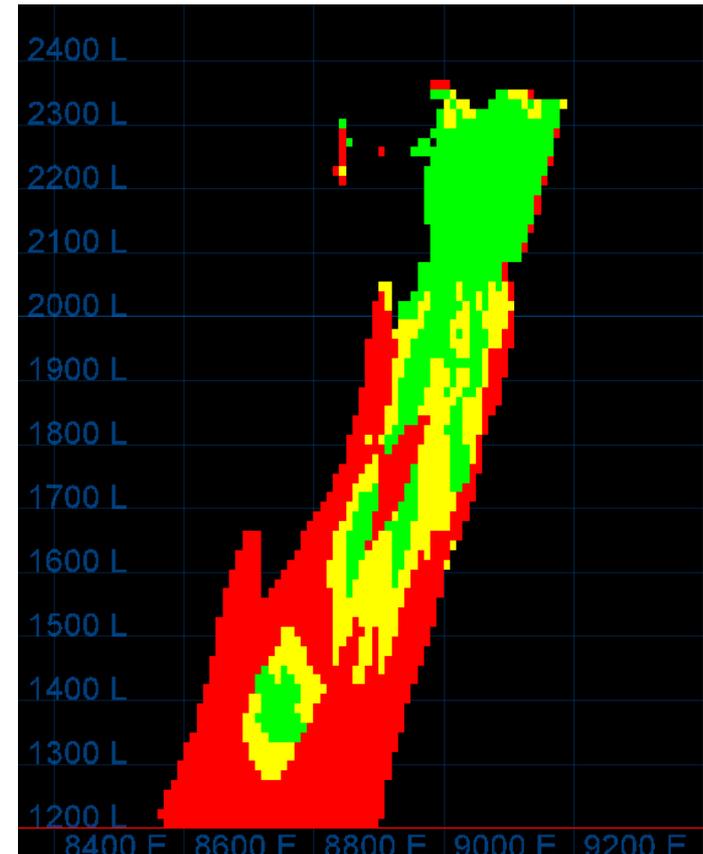


Zona roja indica una malla equivalente menor a 35x35 m con el nivel actual de información

Proceso de mapeo de configuración de muestras (PASADAS)

- Configuración de búsquedas
- Separación por Norte y Sur.

Sector	Mena	CAT	Distancia de búsqueda por eje			Restricciones	
			Mayor	Semi	Menor	Min Muestras	Max Muestras
Norte	MY, MYN	MED	10	30	50	5	20
		IND	20	70	70		
	BXCS, BXC, BXCW	MED	10	30	50		
		IND	20	70	70		
	C1	MED	10	50	50		
		IND	25	70	70		
C5, PMM	MED	10	50	50			
	IND	25	70	70			
Sur fuera de envolvente	BXCS	MED	10	30	50		
		IND	20	60	60		
	C1	MED	10	40	40		
		IND	20	60	60		
	C5, PMM	MED	10	40	40		
		IND	20	60	60		
Sur dentro de envolvente	C1	MED	20	65	50		
		IND	25	110	90		
	C5, PMM	MED	10	65	50		
		IND	25	110	90		

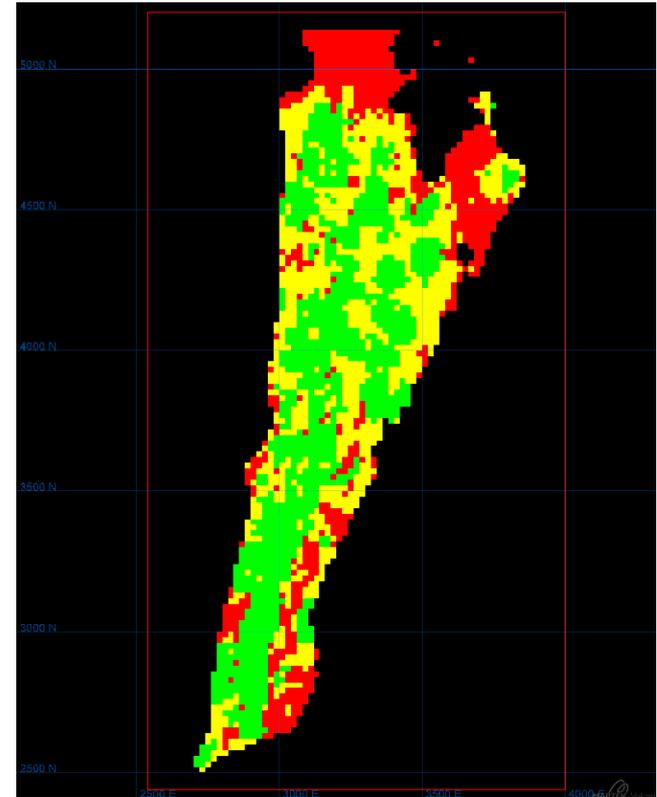


Proceso de mapeo de configuración de muestras + Geostats

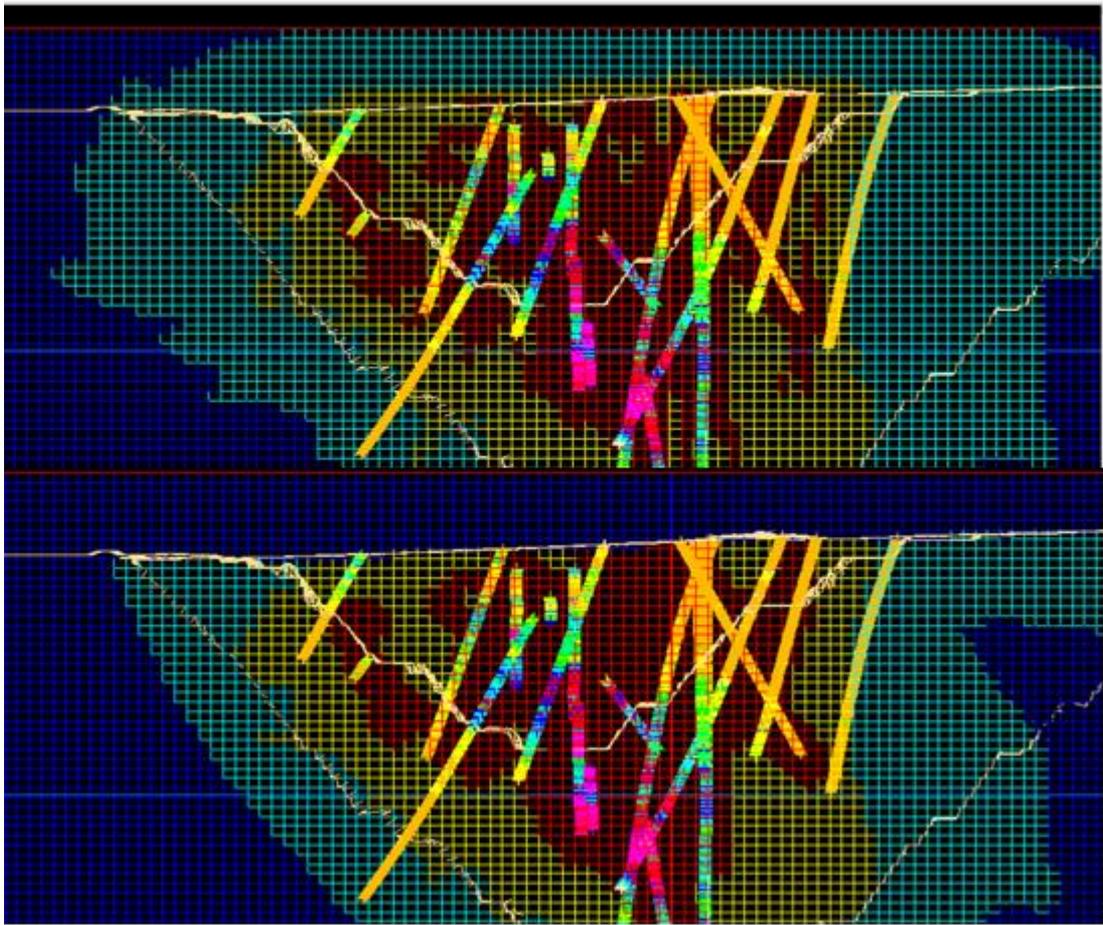
- Search samples configuration (passes)
- Relative kriging variance (rkv)
- Distance to the closest samples (distn)
- Number of samples used to estimate
- Extrapolation flag

		pass			extrap_flag		
		1	2	5	1		
rkv	>=0 y <0.35	1		3	1	distn	<=50
		1			<=70		
		2			>70		
	>=0.45	3			3		>50
		2			2		>70
		2			2		<=50
>=0.35 y <0.45	2		2	<=70			
		<7	>=7				
		n_dat					

srind		cate1		ind2	
		>=0.95	>=0.8 y <0.95	<=0.4	>=0.85
	>=0.95	1	->	2	
	>=0.8 y <0.95	2	->		3
	<0.8	3			



Suavizamiento de categorías



		Suavizada				Tot. bruta
		MED	IND	INF	POT	
BRUTA	MED	90.51%	5.13%	0.00%	0.01%	0.88%
	IND	9.49%	92.44%	0.92%	0.35%	3.33%
	INF	0.00%	2.42%	98.28%	5.21%	13.14%
	POT	0.00%	0.01%	0.79%	94.43%	82.64%
	Tot. Suav	0.78%	3.11%	8.66%	87.45%	

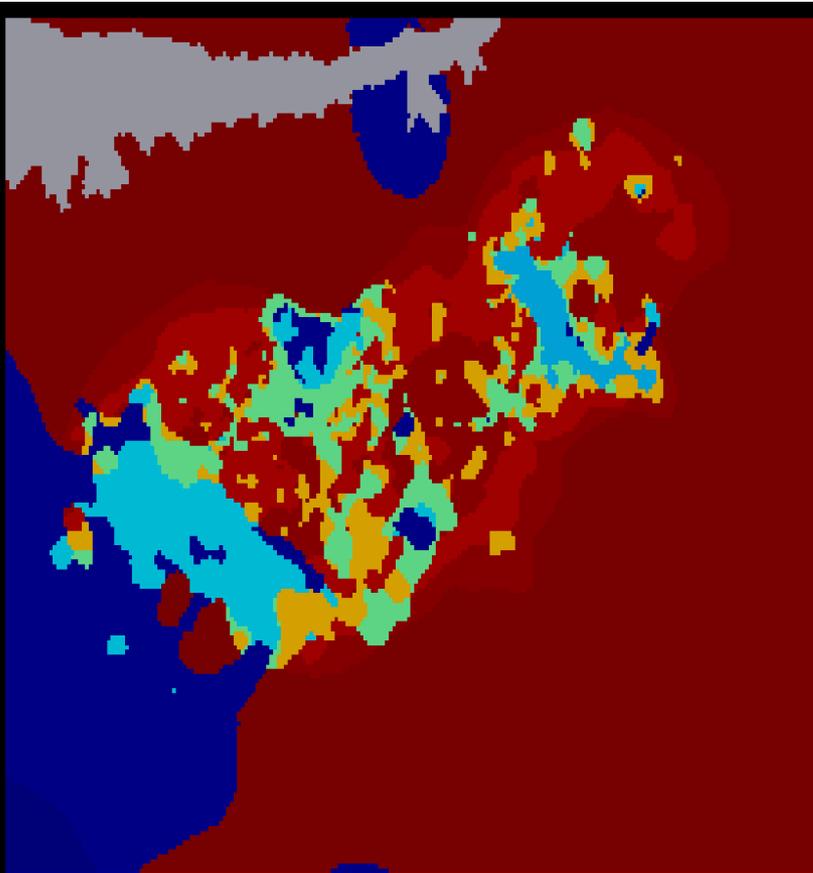
Idea central, disminuir el efecto sal y pimienta, generar relaciones de contacto: medido, indicado, inferido.

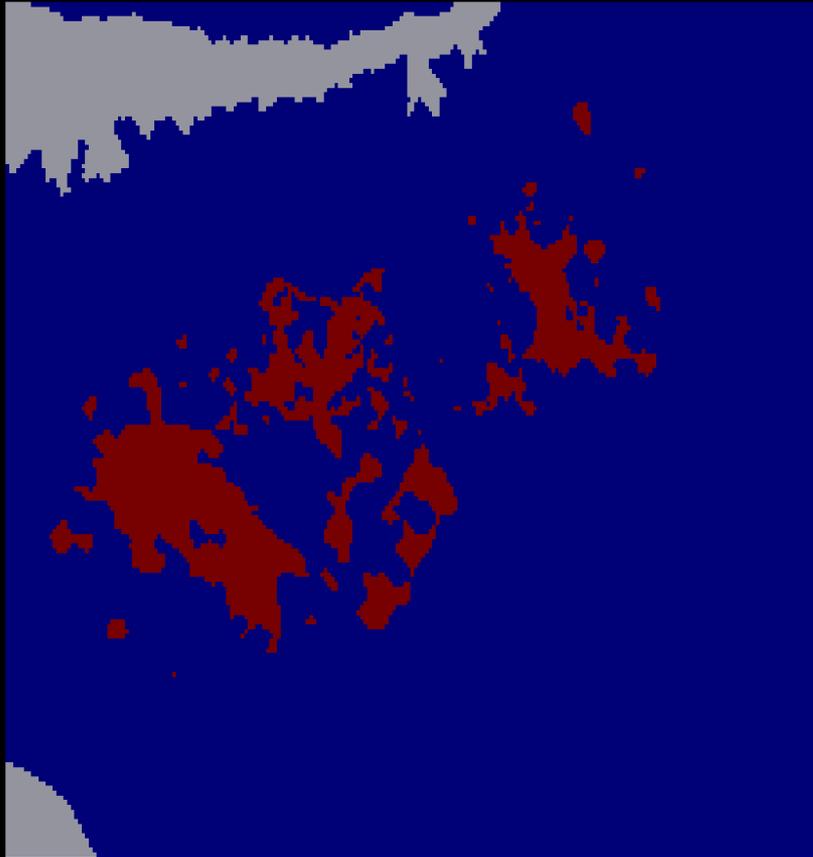
Siempre es importante verificar el número de bloques que pasan de una a otra categoría antes y después del suavizamiento.

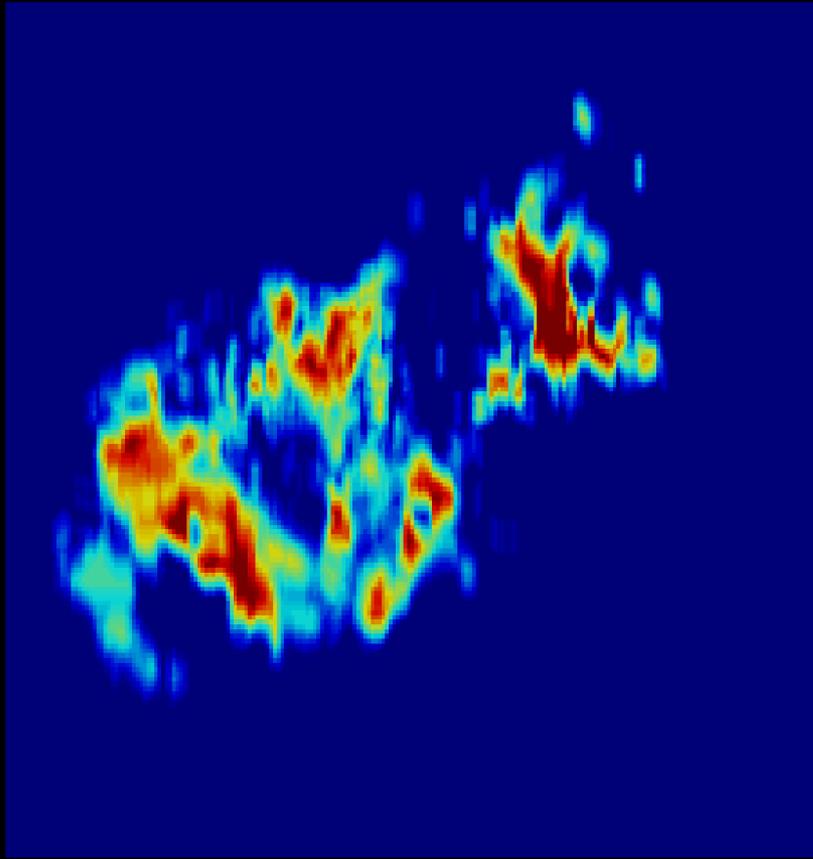


INCORPORACIÓN DE INCERTIDUMBRE GEOLOGICA

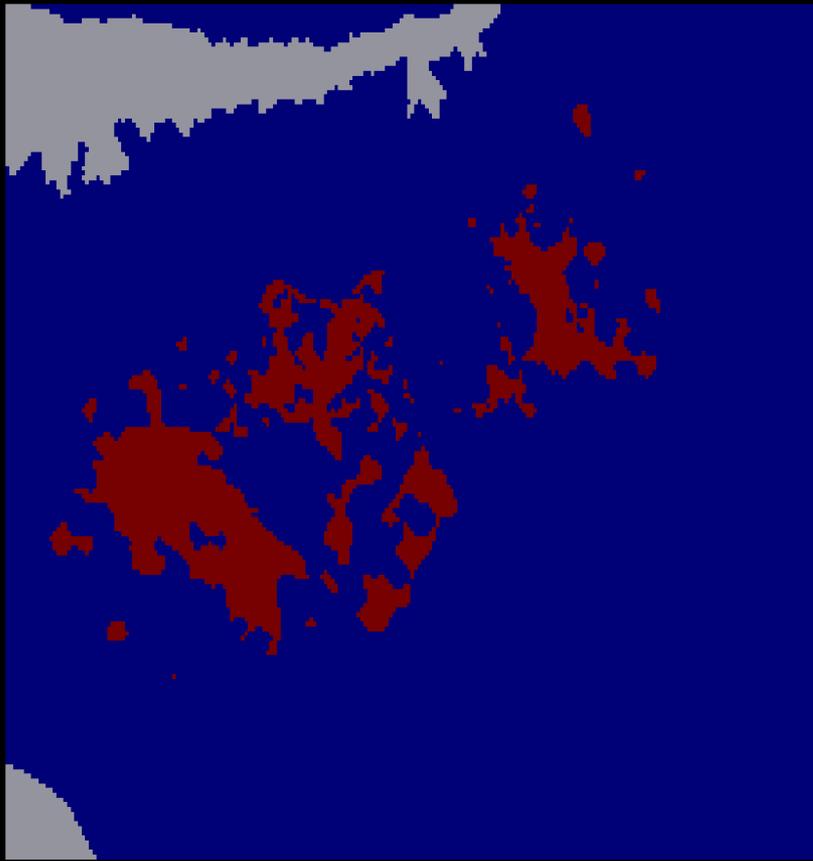
Zona mineral

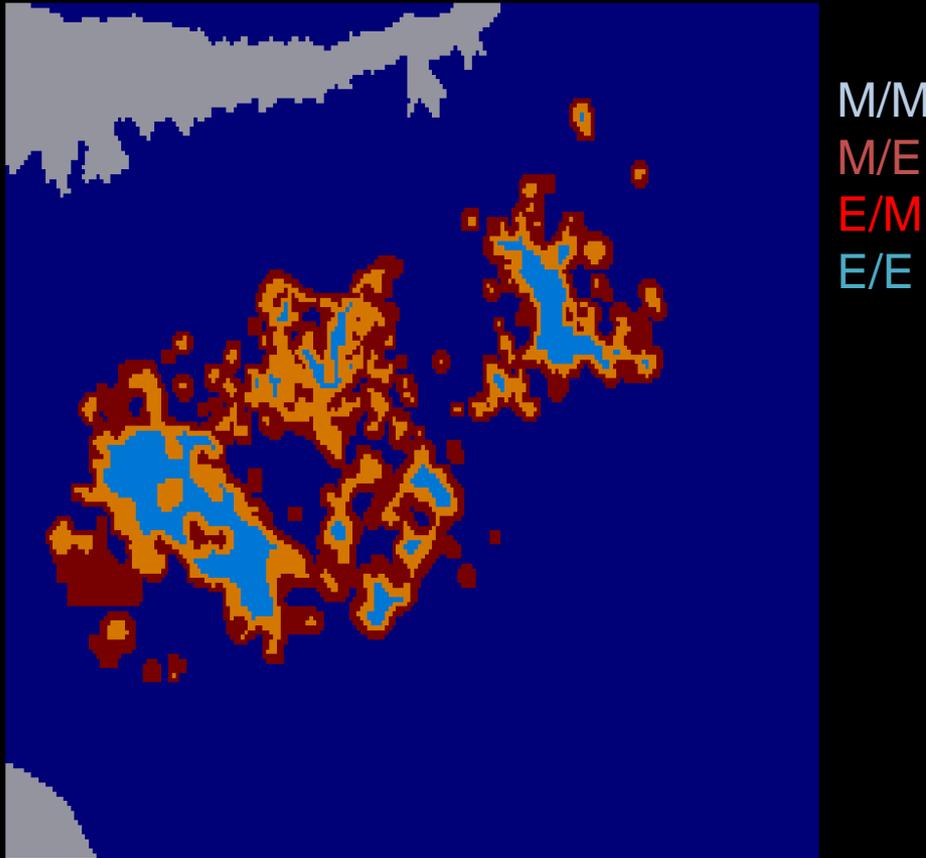




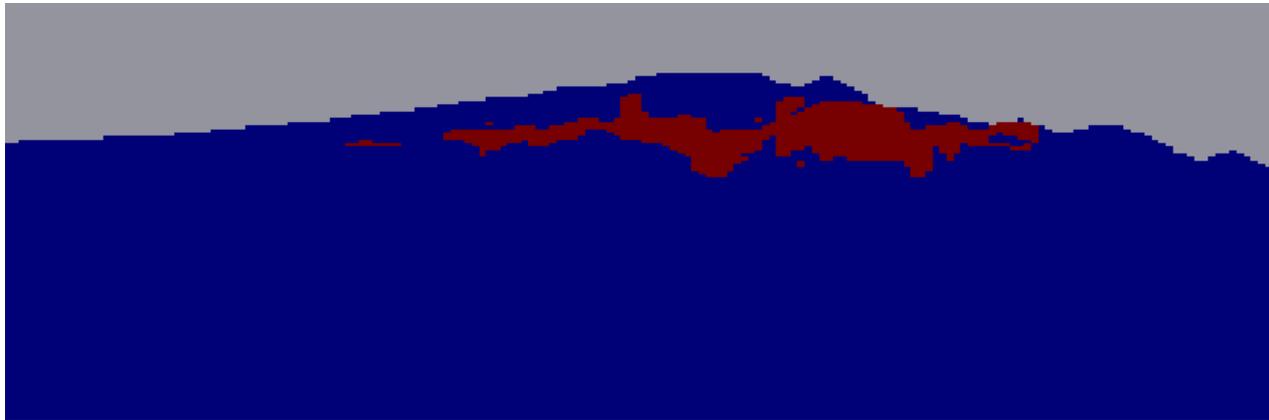


- Cada bloque registra la proporción de la zona de interés (mineral), en una ventana

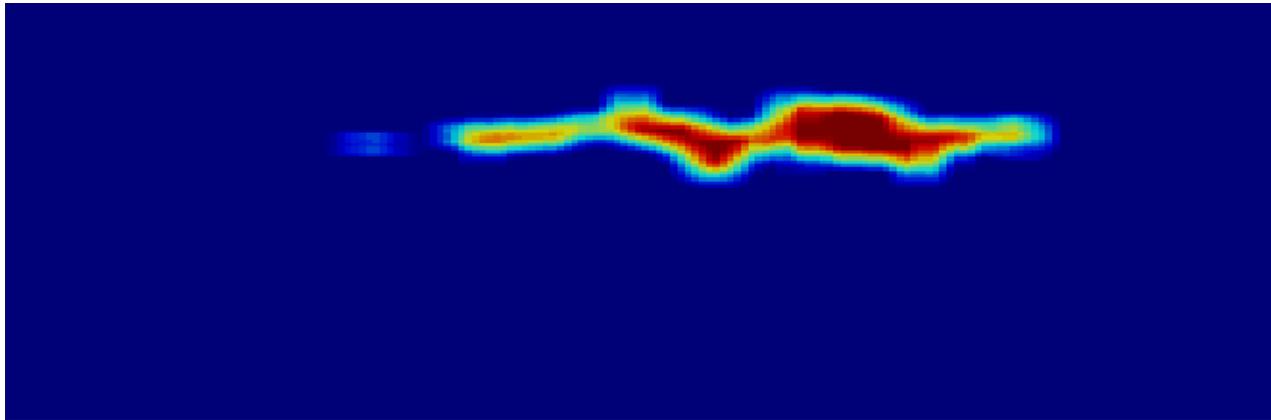


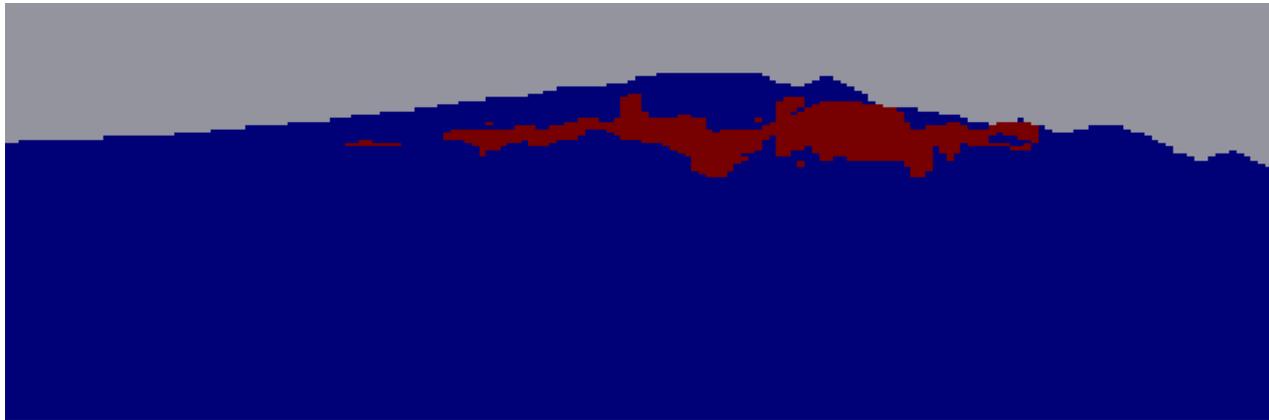


- Zona de contacto si para un bloque mineral tiene un estéril a su alrededor (26 vecinos)
 - Ahora considerando esquineros y diagonales
 - Se puede dejar a solo caras de bloques

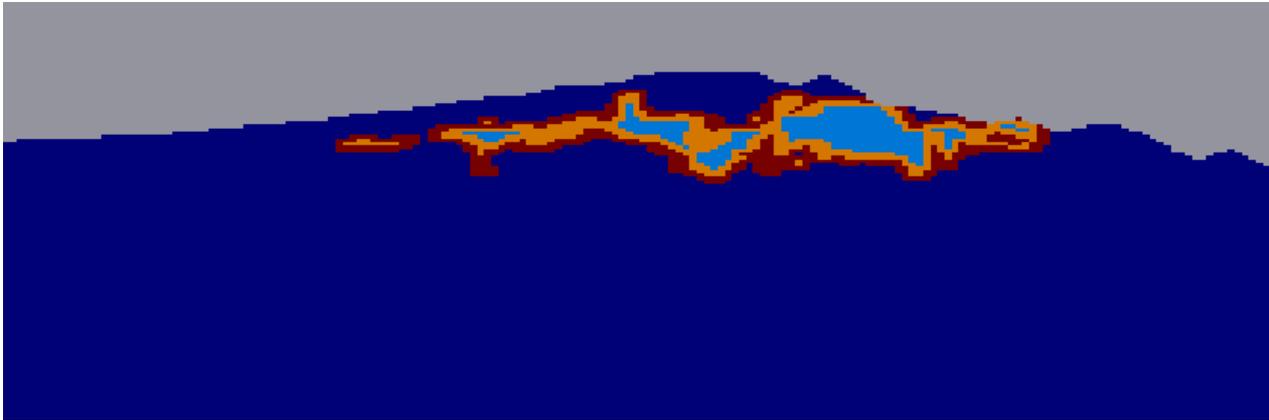


Proporción zona interés en ventana móvil

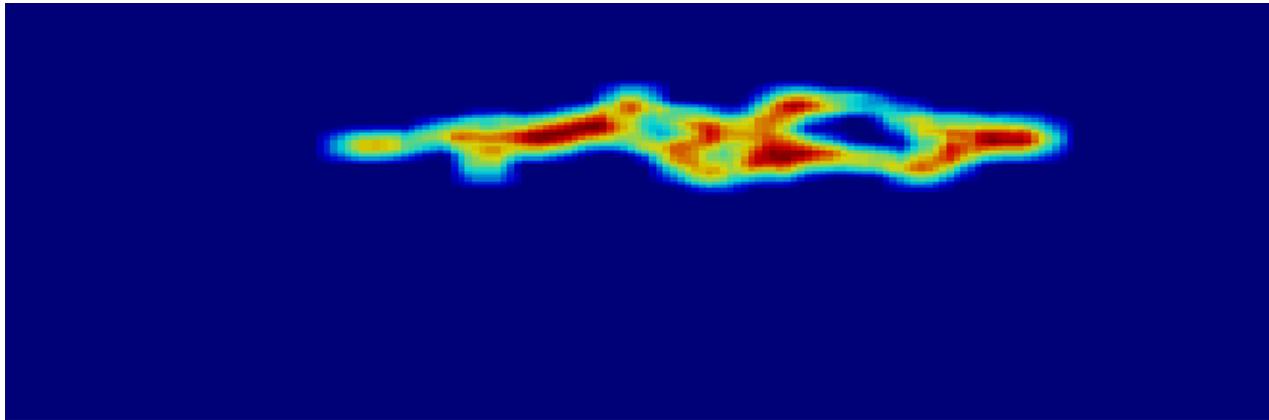




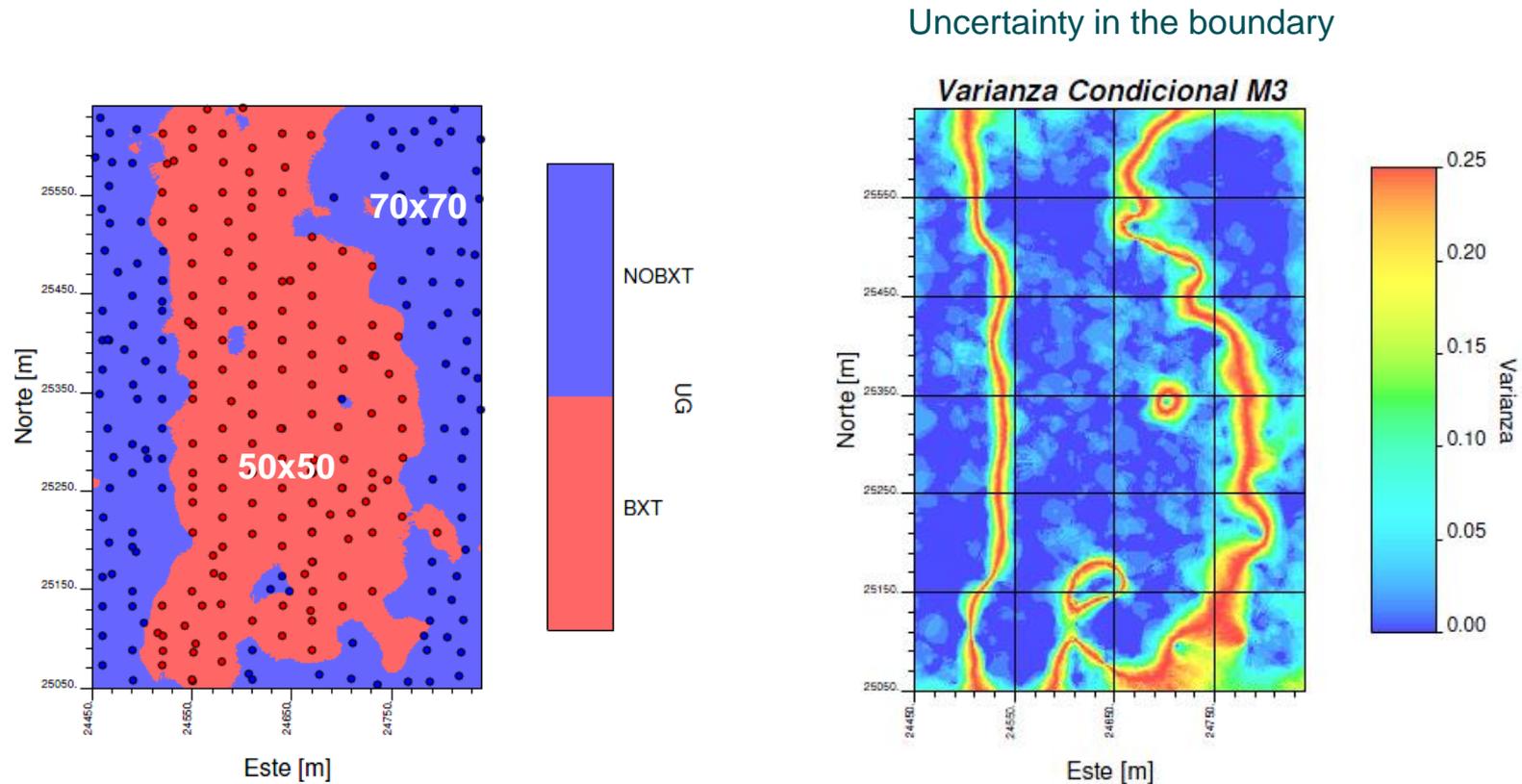
Zonas de contacto



Proporción de zonas de contacto en ventana móvil



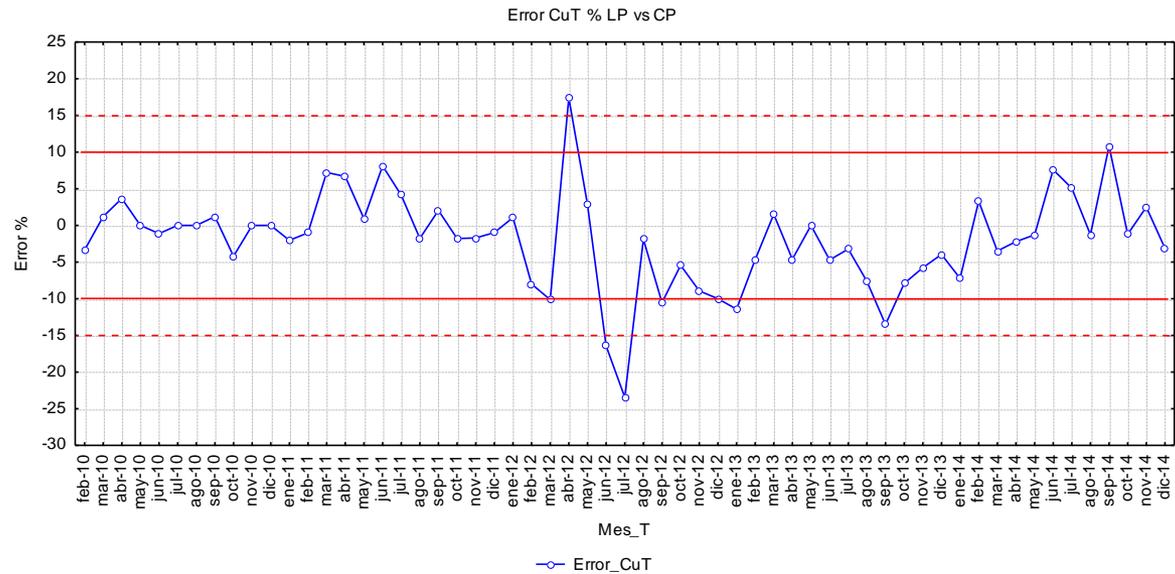
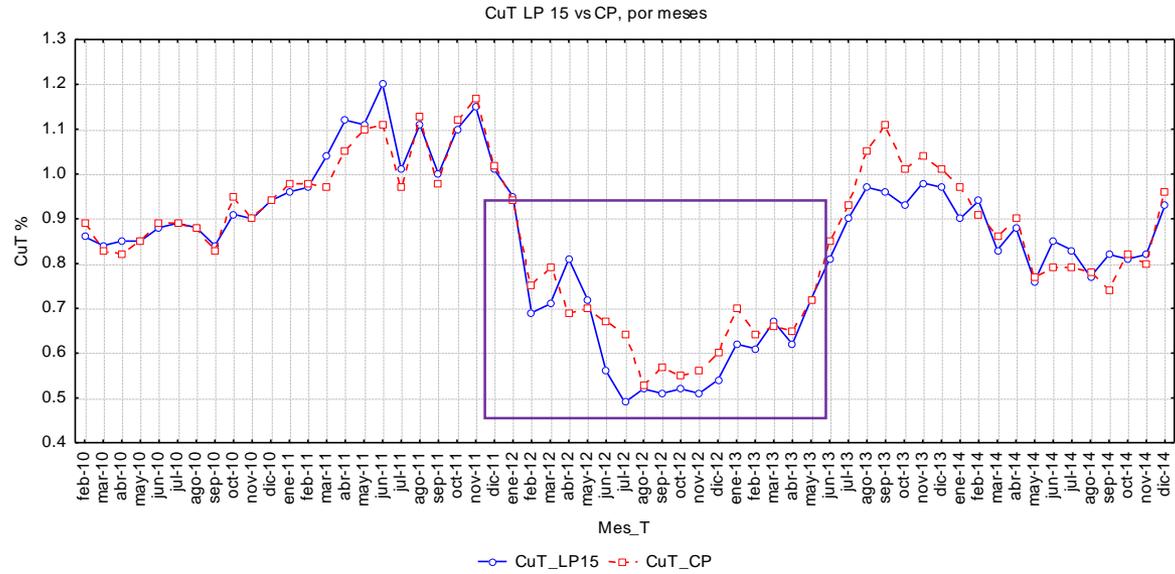
Malla por ug no refleja incertidumbre en zonas de borde



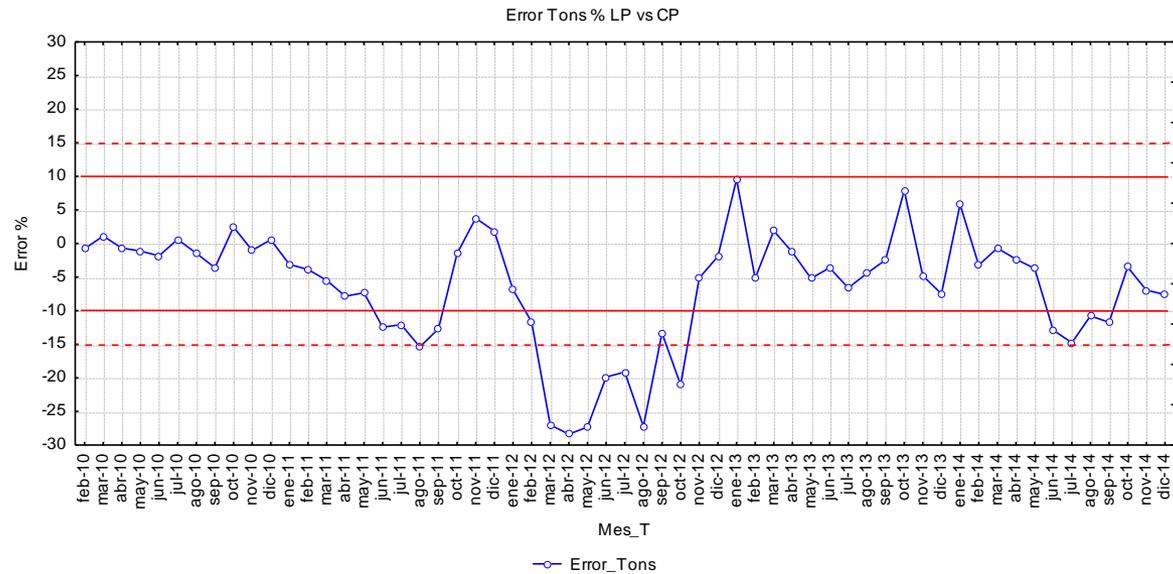
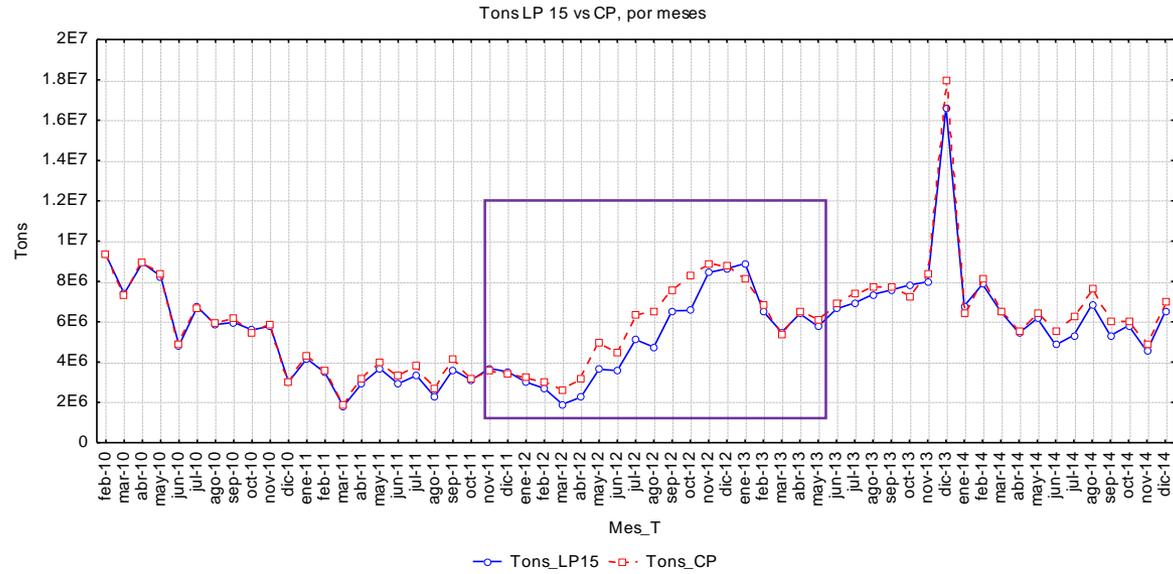
The uncertainty in geology and its boundaries is not incorporated.

RELACION CATEGORIA-CONCILIACION

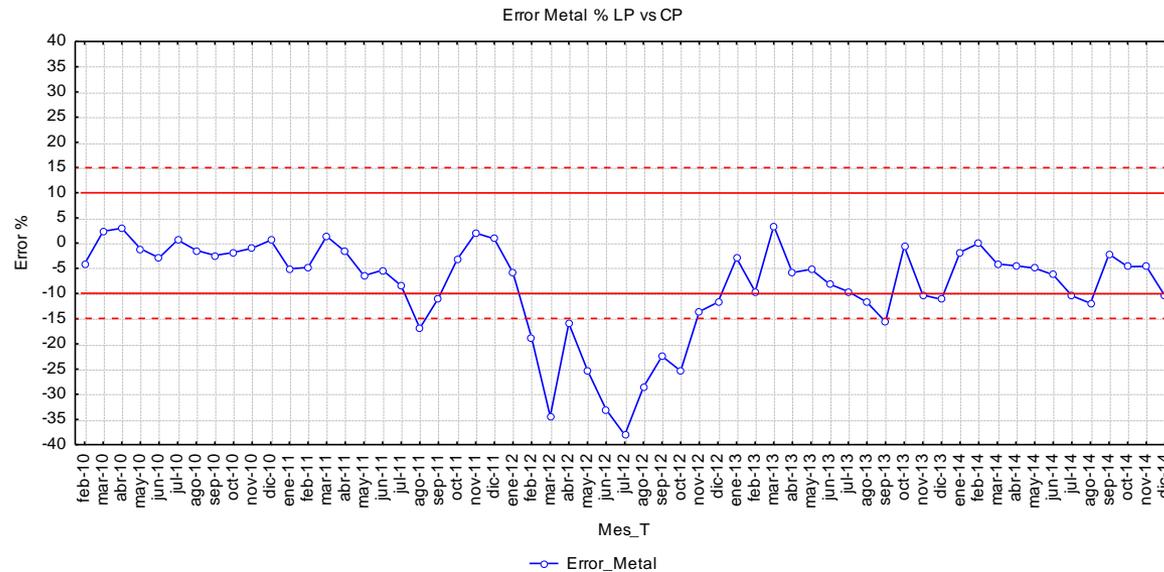
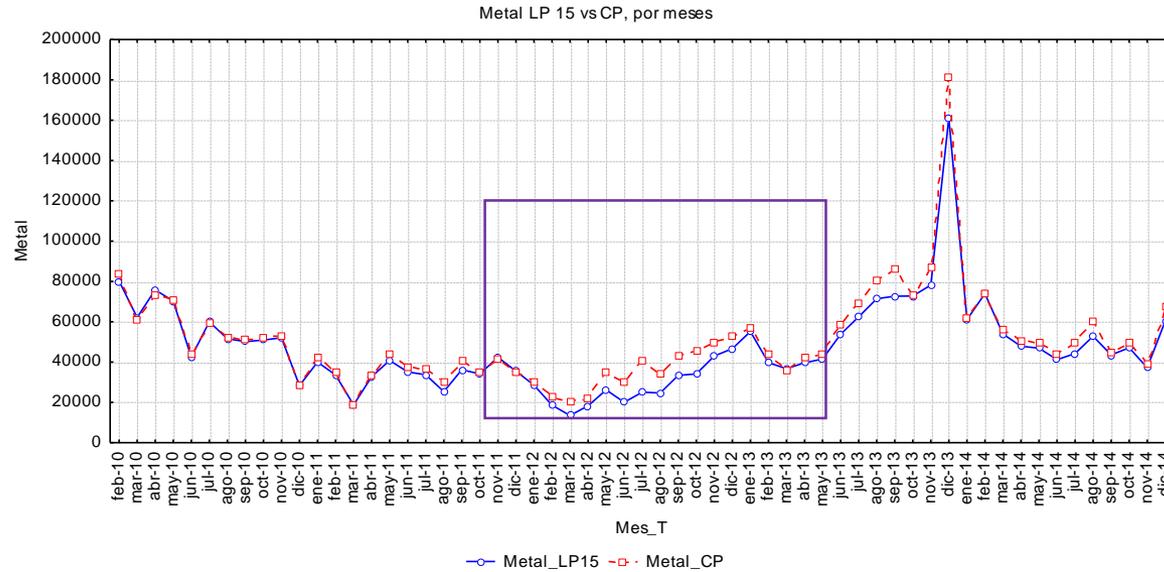
Cut LP vs CP



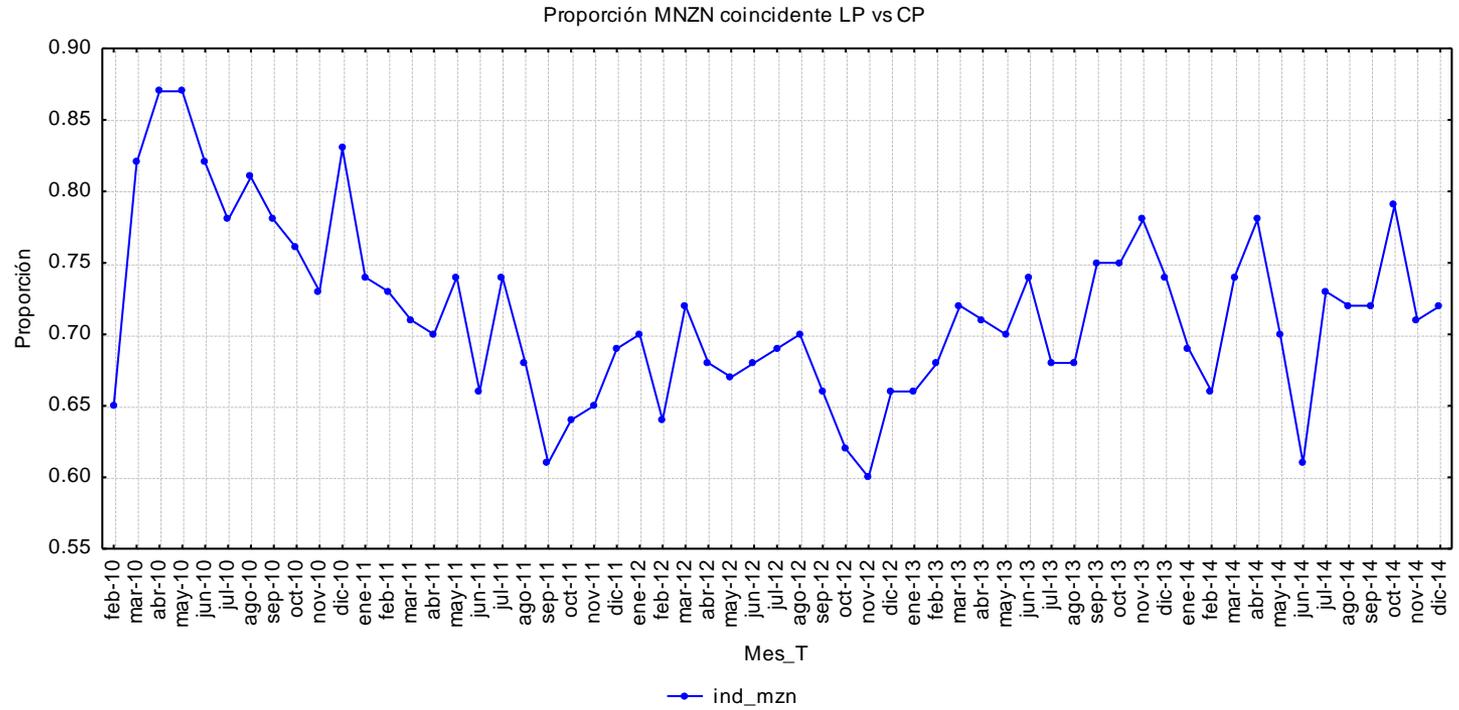
Tons LP vs CP



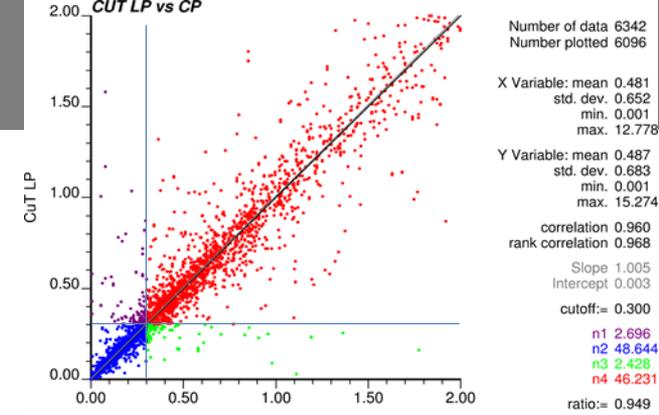
Metal LP vs CP



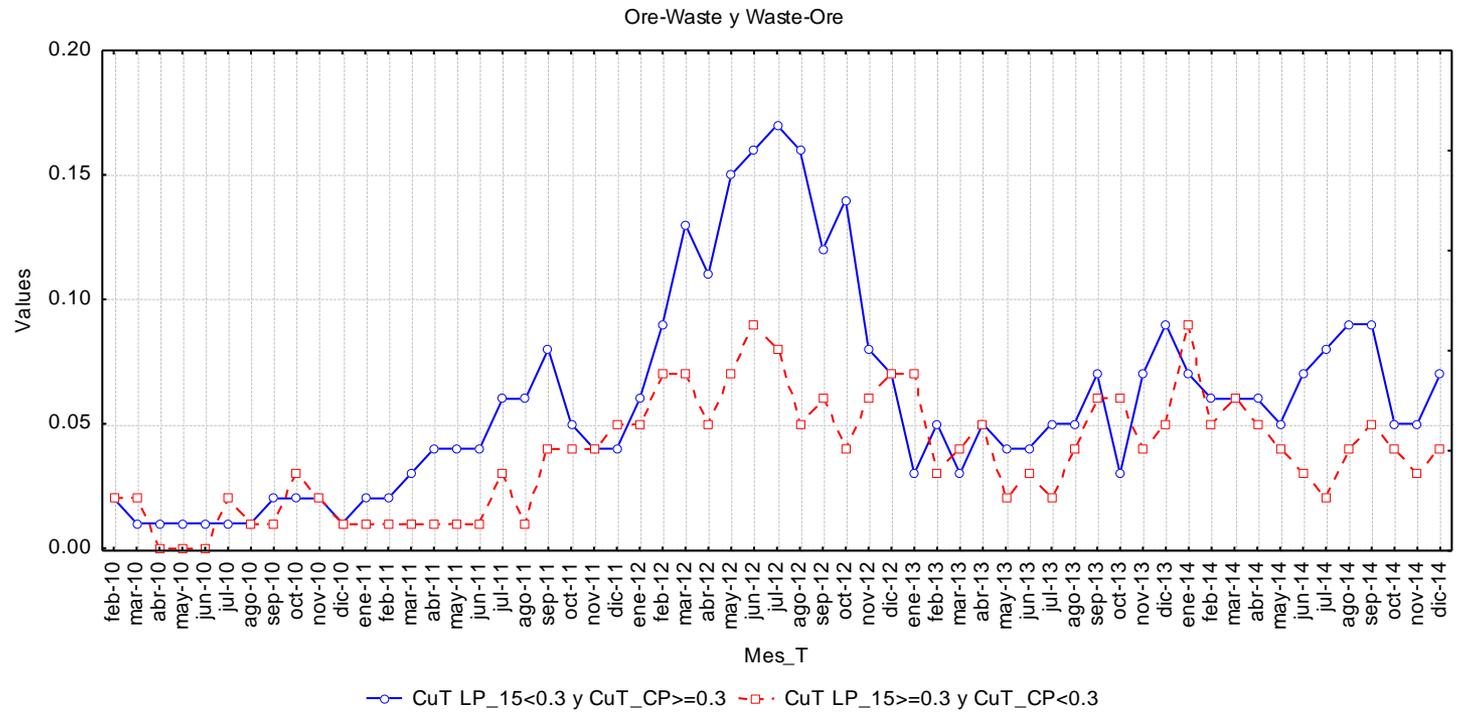
Proporción MNZN coincidente LP15 vs CP



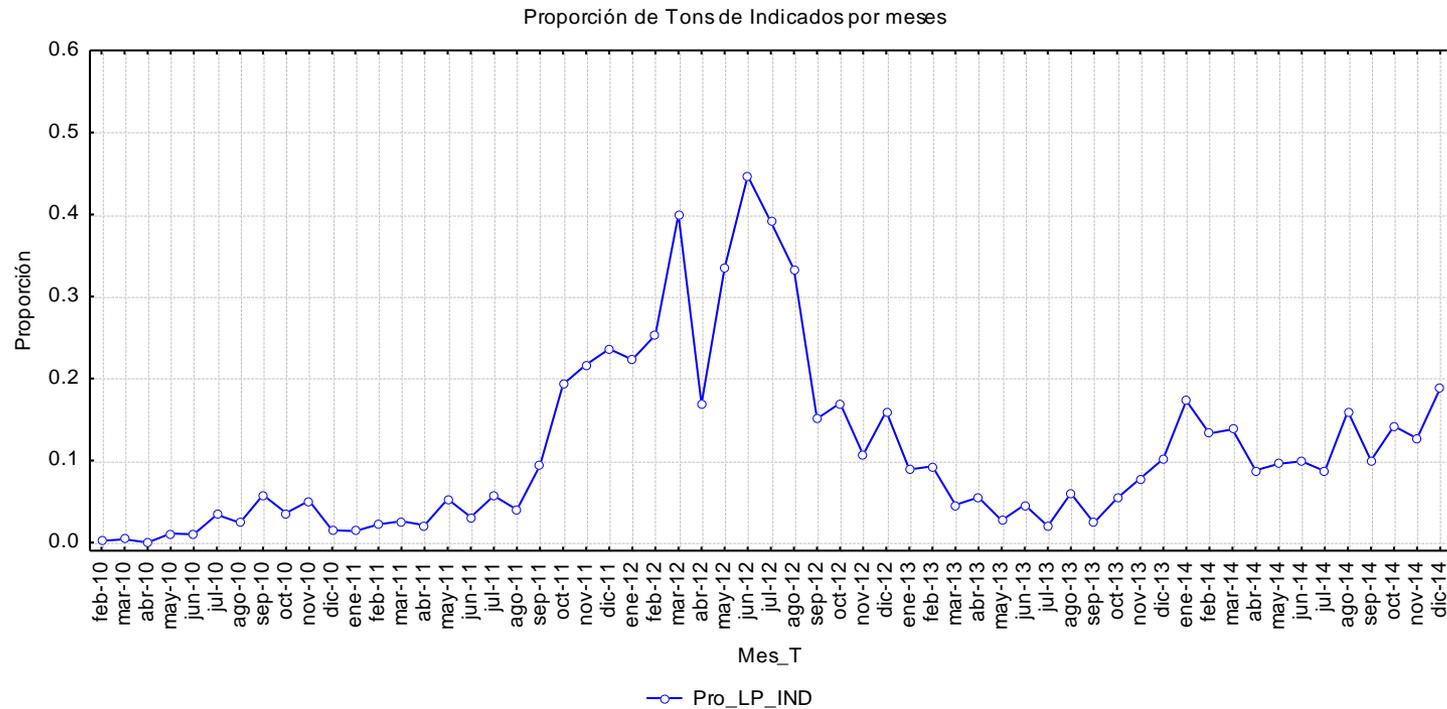
Acierto Ore-Ore y Waste-Waste



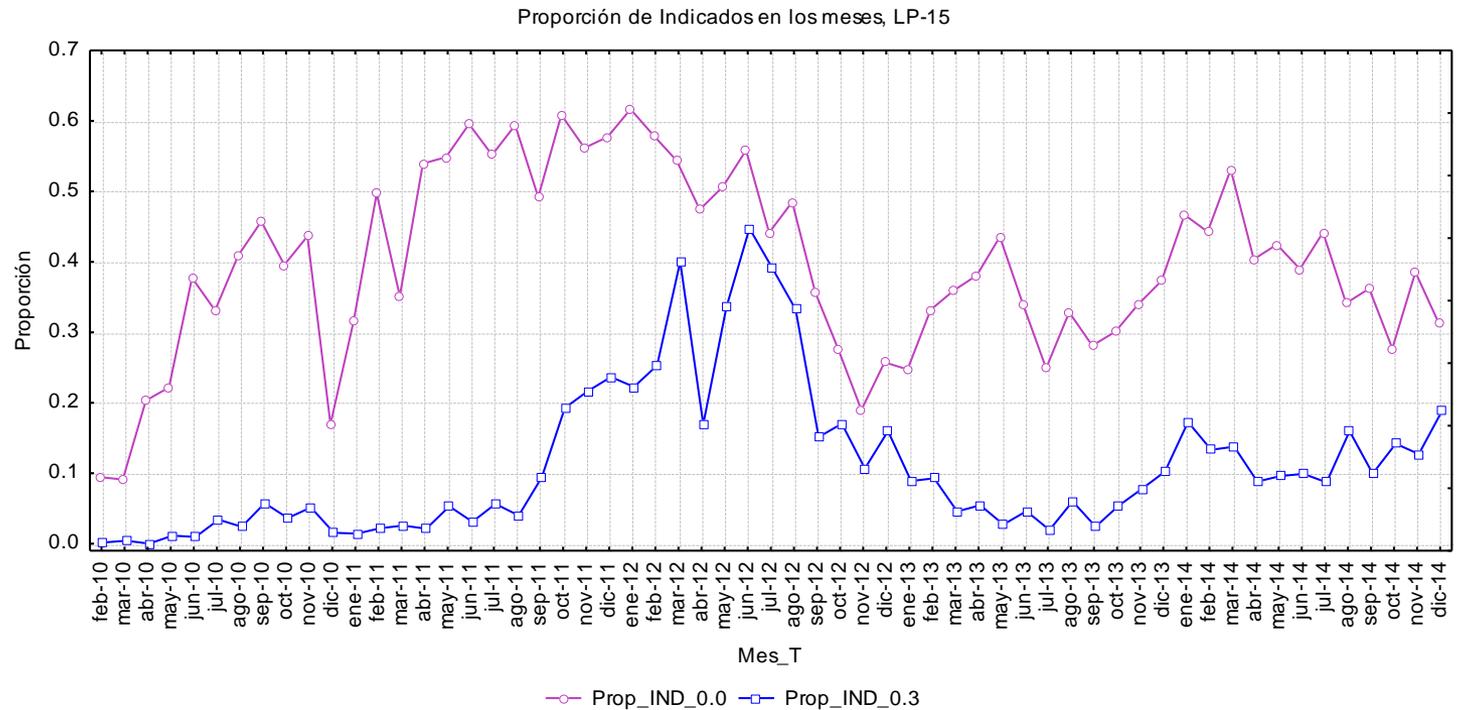
Ore-Waste y Waste-Ore



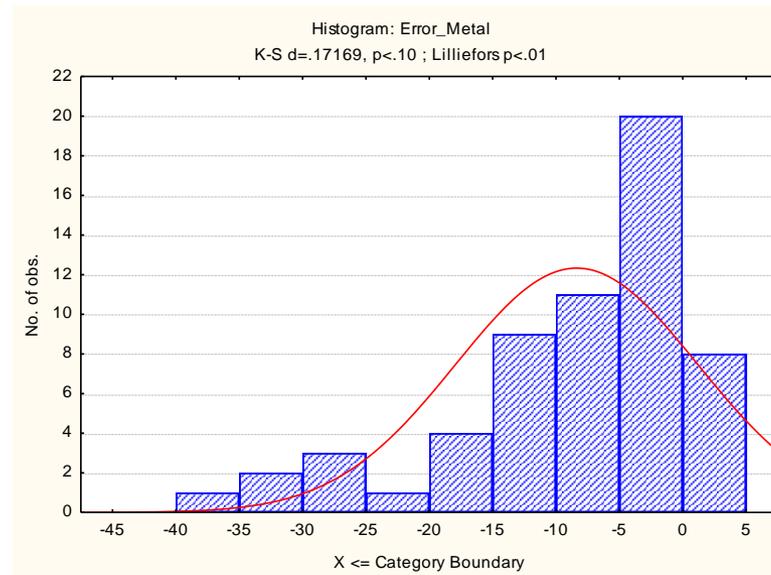
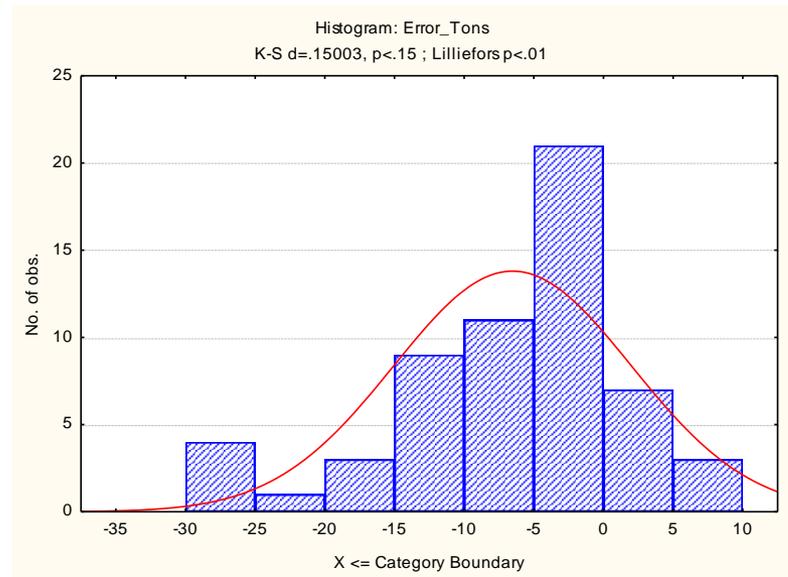
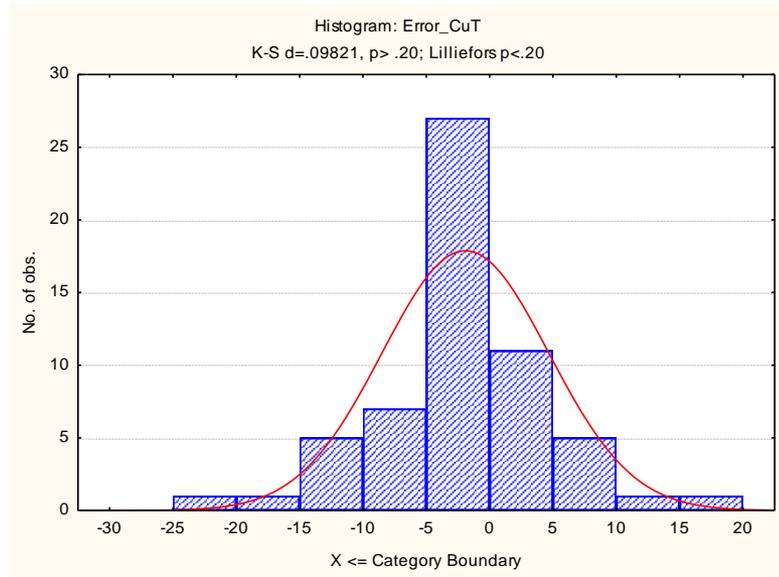
Porcentaje de indicadores en producción



Porcentaje de indicadores en producción



Histograma de los errores CuT, Tons y Metal



Resumen metodologías: Qué se usa hoy en día?

Table 1

Analysis of classification methods used in NI 43-101 technical reports published in Canada in 2012 (120 reports were considered)

Type	% of reports	Regular drilling (%)	Irregular drilling (%)
SN	50	3	97
DHS	30	75	25
SN + DHS	3	42	58
SN + KV	3	0	100
KV	3	0	100
Other	10	8	92

90%

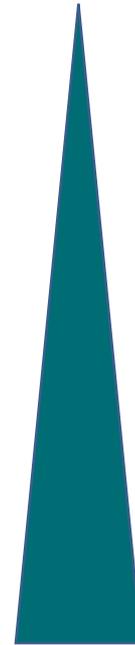
SN: Vecindad de búsqueda
DHS: Densidad de sondajes
KV: Varianza de kriging

● En General clasificación bloque a bloque

Resumen de metodologías

- 
- Geometrical approaches (AVG. Distance, SN, DD, EGS, “Passes”)
 - KV, SR, usually Block-Block
 - Uncertainty studies to support decisions for MRC
 - Drill hole grid spacing studies GKV, NCS, CS
 - Uncertainty directly incorporated in MRC by conditional simulation

uncertainty
quantification



Practice



Resumen metodologías y procesos de mapeo

- Las metodologías generalmente aplicadas correspondientes a la 1, 2 y 3 presentadas consideran una etapa de cálculo de errores de estimación derivados de:
 - Varianzas de kriging
 - Simulación no condicional
 - Simulación Condicional
- En general utilizan mallas ficticias sintéticas asociados a mallas nominales regulares para establecer el link error-nivel de información y decisión de clasificación.
- Finalmente se efectúa la clasificación usando un mapeo de densidad de información obtenido usando:
 - Varianzas de kriging de corte
 - Malla equivalente
 - Condiciones de plan de kriging (pasadas)
- En ciertas ocasiones se recurre a un proceso de suavizamiento para evitar relaciones de contactos complejas como medidos en contacto con indicados o eliminar artefactos como tubos o volúmenes menores de indicado dentro de medido o similar.

RESUMEN Y DISCUSIÓN

- Entender que errores las compañías están dispuestas aceptar
- La densidad de información no lo es todo
- Necesidad de cuantificar efecto de calidad de información
- Necesidad de monitorear categoría con conciliación
 - Entender causa de errores para mejorar
- Necesidad de incorporar factores geológicos de modo explícito, más allá de la orientación general y dividir por UG
- Es el Borde el que muchas veces es más complicado e incierto.

Discusión y conclusiones

- Subjetividad de metodologías de clasificación es un problema
- JORC ha impuesto la **necesidad de cuantificar la incertidumbre** en la estimación
- Técnicas geoestadísticas pueden usarse, pero debe cuidarse que la metodología no perjudique o favorezca el proyecto
- Varianza de kriging y varianza relativa de simulación son criterios similares, pero otras métricas más ricas pueden ser obtenidas desde las simulaciones condicionales.
- Continuidad geológica es crítica, geometría y ocurrencia de la mineralización.
- Estandarización de la categorización es difícil producto de la diversidad en la geología y configuraciones de muestreo
- Resulta importante definir estándares y facilitar la transición de los criterios actualmente utilizados a otros reconocidos por los códigos
- En Chile se ha avanzado bastante en esta línea gracias a la comisión minera y profesionales que participan activamente en ella.
<http://www.comisionminera.cl/>