

Segmentación de portafolio de prospectos de exploración

Presentación Taller
'Resultados de Exploración y Clasificación de Recursos'
Comisión Minera, 2018

Felipe Buguño C.
Geólogo, Universidad de Chile

Agenda

I. MOTIVACIÓN

- i. Contexto y exposición del problema
- ii. Objetivos y alcances
- iii. Modelos de yacimientos

II. CARACTERIZACIÓN DE MODELOS DE YACIMIENTOS

III. PARAMETRIZACIÓN

IV. AGREGACIÓN

V. VALIDACIÓN DE *CLUSTERS*

Objetivo

- Generar una metodología que permita apoyar la toma de decisión en exploración minera temprana, mediante la caracterización y agregación de modelos geológicos de yacimientos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definición parámetros geocientíficos
- Caracterización modelos de yacimientos
- Parametrización
- Segmentación
- Validación

Alcances

Modelos de yacimientos deben...

- Tener ocurrencia probable o probada en Chile
- Representar blancos potenciales de explotación para elementos de interés (Fe, Cu, Au, Ag, REE, Ni, Ti, Zn, Pb, Co)
- Estar validados por la literatura científica

Parámetros geocientíficos deben...

- Ser cuantitativos y cualitativos
- De naturaleza geológica que puedan captarse en exploración temprana

No se pretende desarrollar modelos de yacimientos

Organigrama típico de una *junior* de exploración



Modelo de yacimiento

¿Qué es?

‘Un modelo de yacimiento mineral se define como la información sistemáticamente ordenada que describe los atributos esenciales (propiedades) de una clase de yacimiento mineral’

(Cox & Singer, 1986)

Modelo de yacimiento

¿Cómo describirlo?

Nombre

- i. Identificación de sinónimos
- ii. Productos principales
- iii. Sub-productos
- iv. Ejemplos

Características geológicas

- i. Descripción resumen
- ii. Escenario tectónico
- iii. Ambiente de deposición / Escenario geológico
- iv. Edad de la mineralización
- v. Tipos de rocas encajantes y asociadas
- vi. Forma del yacimiento
- vii. Texturas / Estructuras
- viii. Mineralogía mena
(principal/subordinada)
- ix. Mineralogía ganga
(principal/subordinada)
- x. Mineralogía de alteración

- xi. Intemperismo
- xii. Controles de las menas
- xiii. Modelo genético
- xiv. Tipos de yacimientos asociados
- xv. Comentarios

Guías de exploración

- i. Rasgos geoquímicos
- ii. Rasgos geofísicos
- iii. Otros

Factores económicos

- i. Ley y tonelaje
- ii. Limitantes económicas
- iii. Usos finales
- iv. Importancia

Referencias

Lefebure & Ray, 1995

Modelos de yacimientos

Pórfido cuprífero (Cu, Mo)

Cu, Au, Ag

Pórfido cuprífero (Cu, Au)

Cu, Au

Skarn Fe

Fe

Skarn Cu

Cu

Skarn Zn-Pb

Zn, Pb, Au, Ag

Iron Oxide Copper Gold (IOCG)

Cu, Fe, Au, REE, Co

Iron Oxide Apatite (IOA)

Fe

Estratoligados (Cu-Ag)

Cu, Ag, Zn, Pb

Estratoligados (Cu-Fe-Au)

Cu, Fe, Ag, Ni, Co

Sulfuros masivos volcanogénicos (VMS)

- Tipo *Besshi*
- Tipo *Chipre*
- Tipo *Kuroko*
- Tipo *Noranda*

Cu, Au, Ag

Cu, Zn

Cu, Au, Ag, Zn, Pb

Cu, Au, Ag

Sedimentario exhalativo (SEDEX)

Ag, Zn, pb

Epitermal alta sulfuración

Au, Ag

Epitermal baja sulfuración

Au, Ag

Depósitos de oro tipo Carlin

Au

Placer titanífero

Ti

Placer aurífero

Au

Caracterización de modelos de yacimientos

¿Qué parámetros se utilizaron?

Ubicación

- Según franja metalogénica y región geográfica de Chile

Superficie y volumen de alteración hidrotermal

Volumen yacimiento

Forma de la mena

Signatura geoquímica

Rocas intrusivas

- Composición, textura, geoquímica, oxidación

Roca huésped

- Composición, forma, geoquímica, alteración hidrotermal, mineralización

Mineralogía

- Correlacionada y excluyente

Asociaciones minerales

Ley mineral [% , ppm]

Estilo de mineralización

- Elemento de interés, asociaciones minerales

Alteración hidrotermal

Zonación

- Alteración hidrotermal, mineralización, razón entre elementos

Relación inter-modelos

Relación mena-alteración hidrotermal

Caracterización según nivel de correlación (alta, mediana, baja, nula) con el modelo

Parametrización

Organización y estandarización de la información, mediante la asignación de un valor numérico a los parámetros o variables.

Adicionalmente, se estableció un orden jerárquico sobre los parámetros.

Elemento diferenciador basado en la relevancia del parámetro y en qué tan detallada es su documentación.

Parametrización

Orden 1

- Ubicación
- Roca huésped
- Mineralogía (correlacionada/
excluyente)

Orden 2

- Volumen
- Signatura geoquímica
- Roca intrusiva
- Alteración hidrotermal
- Relación mena/alteración hidrotermal

Orden 3

- Estilo de mineralización
- Forma
- Relación inter-modelos

Parametrización

Ej. Parametrización del mineral actinolita

MODELOS DE YACIMIENTOS

1	Placer titanífero	8	Estratoligados Cu-Fe-Au	15	Sulfuro Masivo Volcanogénico - Besshi
2	Skarn Fe	9	Pórfido Cuprífero Cu-Mo	16	Sulfuro Masivo Volcanogénico - Chipe
3	Skarn Cu	10	Pórfido Cuprífero Cu-Au	17	Sulfuro Masivo Volcanogénico - Kuroko
4	Skarn Zn-Pb	11	Iron Oxide Copper Gold (IOCG)	18	Sulfuro Masivo Volcanogénico - Noranda
5	Epitermal alta sulfuración	12	Iron Oxide Apatite (IOA)	19	Depósitos de oro tipo Carlin
6	Epitermal baja sulfuración	13	Placer aurífero		
7	Estratoligados Cu-Ag	14	Sedimentario Exhalativo (SEDEX)		

Mineralogía correlacionada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Actinolita	0	10	30	30	0	0	20	30	30	20	30	30	0	0	0	0	0	0	0

Parametrización

- Minerales: 218
- Roca huésped: 83
 - Considera forma, afinidad geoquímica
- Roca intrusiva: 48
 - Considera textura, afinidad geoquímica
- Alteración hidrotermal: 21
- Ubicación: 34
 - Considera franjas metalogénicas y regiones geográficas
- Signatura geoquímica: 35
- Tonelaje
 - Considera tres rangos, según orden de magnitud
- Formas de la mena: 11
- Estilos de mineralización: 146
 - Considera elemento de interés, principales asociaciones
- Relación mena-alteración hidrotermal: 38
- Relación inter-modelos: 18
- Datos excluyentes: 10

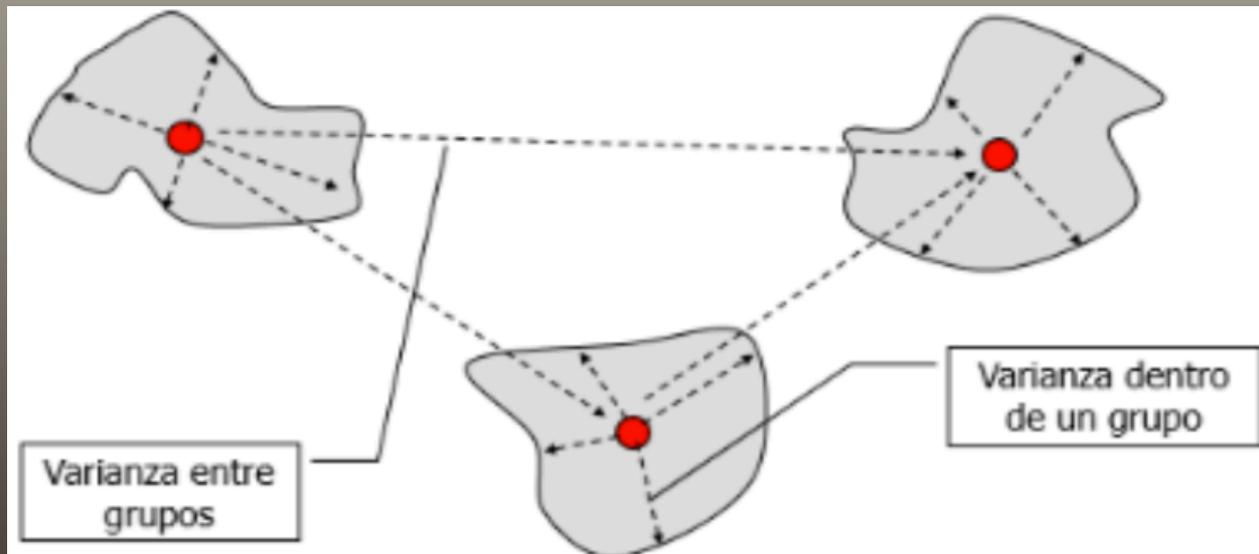
TOTAL VARIABLES: 663

Agregación

- Método *clúster*

Procedimiento estadístico multivariante.

A partir de un conjunto de datos conteniendo información sobre una muestra de entidades, intenta reorganizarlas en grupos relativamente homogéneos o *clústers*.



Agregación

Cómo medir la similitud entre dos modelos

- Medida: distancia
- Promedio Ponderado entre grupos

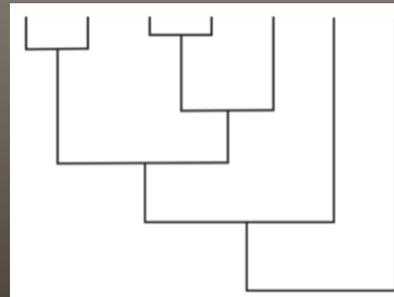
La distancia entre dos clusters viene definida por el promedio ponderado de distancias de los componentes de un clúster respecto a los del otro.

Ventaja: aprovecha la información de todos los modelos.

- Medida de disimilaridad: Distancia euclídea al cuadrado

X e Y representan los dos modelos o clusters, X_i e Y_i la parametrización de la variable i para los modelos X e Y , respectivamente, y n el total de variables.

$$d(X, Y)^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2$$



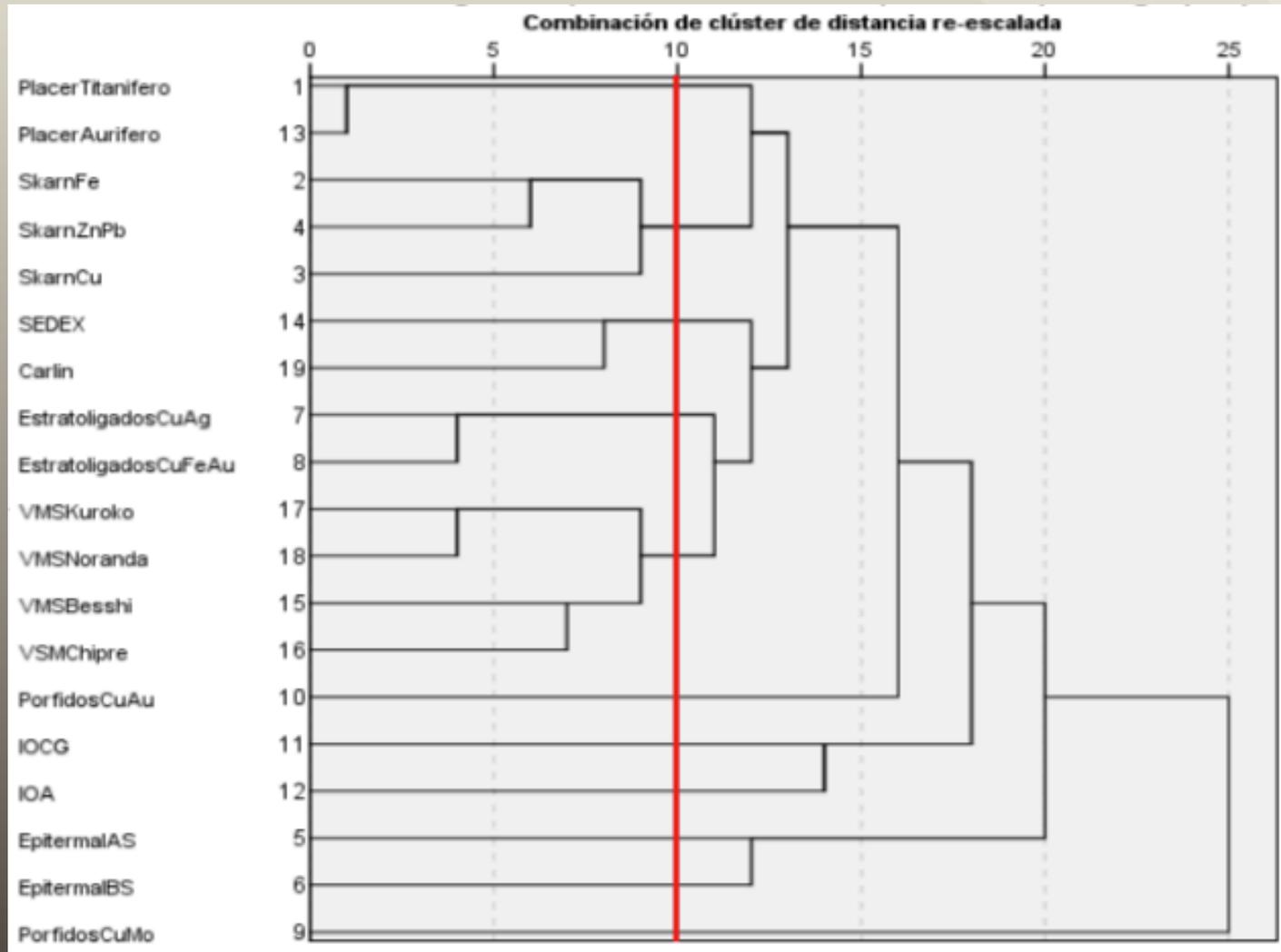
Dendrograma clásico de un método jerárquico aglomerativo

Agregación

Cuándo detener la segmentación

- **Punto de vista geológico**
 - Segmentar hasta el punto donde haga sentido agrupar los modelos para el nivel de resolución buscado.
 - Agrupar estratoligados y sulfuros masivos volcanogénicos carece de sentido.
- **Punto de vista estadístico**
 - Criterio incremental: asociado a la razón entre el coeficiente de una etapa y el de la etapa previa.
 - Criterio basal: asociado a la razón entre el coeficiente de una etapa y el de la primera etapa de aglomeración.

Agregación



Agregación

GRUPOS O CLÚSTERS DE MODELOS DE YACIMIENTOS

GRUPO 1.- YACIMIENTOS DE HIERRO	IRON OXIDE COPPER GOLD (IOCG)
	IRON OXIDE APATITE (IOA)
GRUPO 2.- SKARNS	SKARN FE
	SKARN CU
	SKARN ZN-PB
GRUPO 3.- EPITERMAL ALTA SULFURACIÓN	EPITERMAL ALTA SULFURACIÓN
GRUPO 4.- EPITERMAL BAJA SULFURACIÓN	EPITERMAL BAJA SULFURACIÓN
GRUPO 5.- ESTRATOLIGADOS	ESTRATOLIGADOS CU-AG
	ESTRATOLIGADOS CU-FE-AU
GRUPO 6.- PÓRFIDO CUPRÍFERO CU-MO	PÓRFIDO CUPRÍFERO CU-MO
GRUPO 7.- PÓRFIDO CUPRÍFERO CU-AU	PÓRFIDO CUPRÍFERO CU-AU
GRUPO 8.- PLACERES	PLACER AURIFERO
	PLACER TITANÍFERO
GRUPO 9.- SULFUROS MASIVOS VOLCANOGÉNICOS (VMS)	VMS TIPO BESSHI
	VMS TIPO CHIPRE
	VMS TIPO KUROKO
	VMS TIPO NORANDA
GRUPO 10.- CARLIN - SEDEX	YACIMIENTOS DE ORO TIPO CARLIN
	SEDIMENTARIO EXHALATIVO

Generación de la caracterización y parametrización de los *clústers*

- Ponderación en *clústers*

Cada variable que caracterice a un determinado *clúster* estará parametrizada por un valor equivalente al promedio de valores de tal variable, considerando todos los modelos incluidos en tal *clúster*.

Ejemplo:

Parámetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	<i>Clúster</i>
X	30	20	20	23,3

Validación de *clústers*

Qué datos utilizar para validar los *clústers*

- Base de datos USGS: yacimientos en Chile
(Suministrada por Prospektas)

Parámetros a analizar

- Mineralogía y roca huésped
(Ambos muy bien documentados)

Análisis de frecuencia

- Frecuencia de reporte [%] =
$$\frac{\text{(nº reportes parámetro)}}{\text{(nº reportes modelo)}} \times 100$$

Validación de *clústers*

Criterios de validación

- Se considerarán aquellos parámetros (mineralogía, roca huésped) que se reporten en al menos un 20% de los casos analizados.
- Se analizará la parametrización de estas variables, para cada uno de los *clústers* (excepto Grupo VMS y Grupo Carlin-Sedex).
- A mayor puntaje obtenido, mayor similaridad con tal modelo o *clúster*.

Validación de *clústers*

<i>CLÚSTERS</i>							
Parámetro	IOCG-IOA		SKARNS		PLACERES	ESTRATOLIGADOS	
Mineralogía	X	Preferencia a Pórfido Cu-Mo	X	Preferencia a otros modelos	✓	X	Preferencia a Pórfido Cu-Mo
Roca huésped	X	Preferencia a Epitermal AS	X	Preferencia a IOCG-IOA	✓	X	Sin preferencia
Total	✓		X		✓	✓	

Reportes de yacimientos

IOCG Candelaria, Mantos Verdes

IOA El Romeral, El Algarrobo

SKARN Fe San Antonio, Pintadas, Recompensa, Bandurrias

SKARN Cu San Antonio, San Cristobal, Panulcillo, Mantos Grandes, El Sauce, Los Maquis, Cerro Campana, Potrerillos

SKARN Zn-Pb El Toqui

PLACER AURÍFERO Andacollo Placers, Canelillos, otros

PLACER TITANÍFERO Chiloé Island, Arenillas Negras, otros

ESTRATOLIGADOS Cu-Ag Mantos del Sol, Manto Libertad, otros

ESTRATOLIGADOS Cu-Fe-Au Julia, Montecristo

Conclusiones

Caracterización

- Base de datos sistemáticamente ordenada, considerando parámetros geológicos más relevantes para caracterizar los 19 modelos de yacimientos.

Parametrización

- Asignación numérica a las 663 variables, según nivel de correlación con el modelo y según un orden jerárquico sobre ellas.

Agregación

- 6 *clústers* de modelos de yacimientos, 4 modelos quedaron aislados.

Validación

- Criterios para establecer una similitud entre un prospecto minero y un modelo o *clúster* de modelos.
- Los *clústers* de modelos Estratoligados, Placeres y de hierro (IOCG-IOA) fueron validados, no así el de Skarns.
- Al no haber datos de yacimientos VMS, Sedex ni tipo Carlin, los grupos correspondientes no pudieron ser validados.

Gracias!