

## ¿DOS LEYES DE GEOLOGIA?

PEDRO CARRASCO C.

Compañía de Acero del Pacífico S.A.

### RESUMEN

En este trabajo se presentan a discusión de los geólogos chilenos dos hipótesis de trabajo:

- a) Las variables que tipifican un evento geológico siguen una función densidad de probabilidad dada. Si existen dos o más funciones densidad para una variable, significa que han existido más de dos eventos geológicos y/o que un mismo proceso dio lugar a dos o más efectos.
- b) Si el coeficiente de correlación entre dos o más variables que tipifican un sistema geológico dado, es alto, significa que dichas variables están ligadas genéticamente.

Con el objeto de clarificar estas hipótesis se presentan dos ejemplos reales: uno es la determinación de las zonas de oxidación-reducción en el yacimiento ferrífero de Cerro Negro Cristales y el otro es el estudio de las relaciones genéticas entre varias variables aleatorias y determinísticas que tipifican el yacimiento ferrífero de Algarrobo.

Se concluye que el uso de estas hipótesis y su comprobación futura puede ser de gran utilidad, tanto en el campo académico como en el pragmático.

### ABSTRACT

In this paper are presented two working hypothesis for discussion:

- a) The variables that represent a geological event fit a certain density probability function. If more than one density function occurs, for a variable, it means that more than two processes had been accounted and/or that the same process conduce to two or more effects.
- b) If the correlation coefficient between two or more variables that represent certain geological system, is high, it means that these variables are genetically bounded.

Two examples, related to iron deposits, of these hypothesis, are given: one is the determination of redox zones at Cerro Negro Cristales deposit and the other is the study of relationships between several typical genetic factors at Algarrobo mine.

It is concluded that the future use of both hypothesis and its comprobation, could be of great utility in both fields, academic and pragmatic.

### INTRODUCCION

En el devenir del tiempo y después del análisis metódico de las funciones densidad de probabilidad de algunas variables aleatorias que tipifican sistemas geológicos chilenos en los cuales existen yacimientos de fierro, se puede concluir que dichas

variables se ajustan a leyes de probabilidad típicas.

En efecto, la ley de fierro total, la ley de fierro magnético, la razón entre la ley de fierro magnético versus fierro total y la sílice, siguen funciones densidad de probabilidad normal. El fósforo

y el azufre se distribuyen de manera log-normal. Además el análisis de las funciones densidad ha permitido establecer que cuando existen superimposiciones de eventos geológicos o, en forma más general, eventos geológicos heterocronos, existe más de una función densidad de probabilidad para las variables que tipifican el sistema geológico en cuestión.

Estas evidencias permiten sugerir la siguiente hipótesis:

“Las variables que tipifican un evento geológico siguen una función densidad de probabilidad dada. Si existen dos o más funciones densidad para una variable, significa que han existido más de dos eventos geológicos y/o que un mismo evento dio lugar a dos o más efectos”.

Los procesos de cristalización de magmas, precipitación de sedimentos químicos, depositación de componentes de soluciones hidrotermales, están regidos por las leyes de la físico-química. Estas leyes permiten predecir la cinética del proceso, la dirección de las acciones y la cantidad de cada componente que puede participar en el equilibrio.

#### DOS APLICACIONES REALES

Con el objeto de clarificar las hipótesis enunciadas se presentarán dos ejemplos: el primero es la determinación de las zonas de oxidación-reducción en el yacimiento ferrífero de Cerro Negro Cristales; el otro es el estudio de relaciones genéticas entre varias variables aleatorias y determinísticas que tipifican el yacimiento ferrífero El Algarrobo:

##### a) Determinación de las zonas de Ox-Red, Cerro Negro Cristales.

La determinación de los procesos de oxidación-reducción y su realidad espacial, tiene relevante importancia en yacimientos ferríferos y de todo orden, debido a que los procesos de beneficio de las menas dependerán de la distribución de oxidación dentro del depósito. Debido a que las diferentes zonas de oxidación-reducción tienen variaciones en profundidad y controlan el tipo de mena y su calidad, su forma y distribución espacial, será de fundamental importancia en el flujo de caja del proyecto. Por ejemplo, en minas de fierro chilenas es difícil obtener productos rentables de menas oxidadas de baja ley. Por lo tanto, en estos casos el espesor de la zona de oxidación es una variable que ha-

Ahora bien, si en un sistema geológico en formación, dos o más elementos químicos tienen afinidad, las cantidades relativas de combinación deben estar relacionadas mediante una función matemática de algún tipo. La forma de dicha función dependerá del proceso en cuestión. Lo expresado anteriormente tiene dos implicancias fundamentales. La primera es que si se investigan las funciones densidad de probabilidad conjunta de las variables químicas que tipifican cierto sistema geológico, éstas deben seguir una ley de probabilidad conjunta dada, lo que no es más que una reafirmación de la primera hipótesis planteada en este trabajo. La segunda implicancia es que si las cantidades relativas de combinación están regidas por algún tipo de relación matemática y además dichas variables siguen una ley de probabilidades conjuntas, su covarianza debe ser alta. Esto lleva a sugerir la segunda hipótesis:

“Si el coeficiente de correlación entre dos o más variables que tipifican un sistema geológico dado es alto, significa que dichas variables están ligadas genéticamente”.

ce muy sensible los parámetros de evaluación económica (beneficio neto actualizado, tasa interna de retorno, tasa de crecimiento del capital, etc.).

Con el objeto de determinar los procesos de oxidación-reducción acaecidos en Cerro Negro Cristales y su distribución espacial, se estudió la función distribución de la variable aleatoria recuperación metalúrgica de fierro magnético (RM).

$$RM = \frac{\% \text{ Fierro Magnético}}{\% \text{ Fierro Total}}$$

El contenido de fierro magnético se analizó mediante la balanza de saturación magnética y el fierro total en base a análisis químico tradicional. El número de muestras fue de 300.

La figura 1 muestra los resultados obtenidos. Se observa en esta figura que existen tres funciones distribución de probabilidad normal para la recuperación metalúrgica de fierro magnético. La primera corresponde a valores comprendidos entre 0 y 32% RM y tipifica la zona de transición. Esta zona compromete al 20% del yacimiento. La tercera función de distribu-

ción de probabilidades tipifica la zona primaria y corresponde a RM mayores de 78%. Compromete al 30% del yacimiento.

Se puede concluir después del estudio de la figura 1, que los procesos de oxidación—reduc-

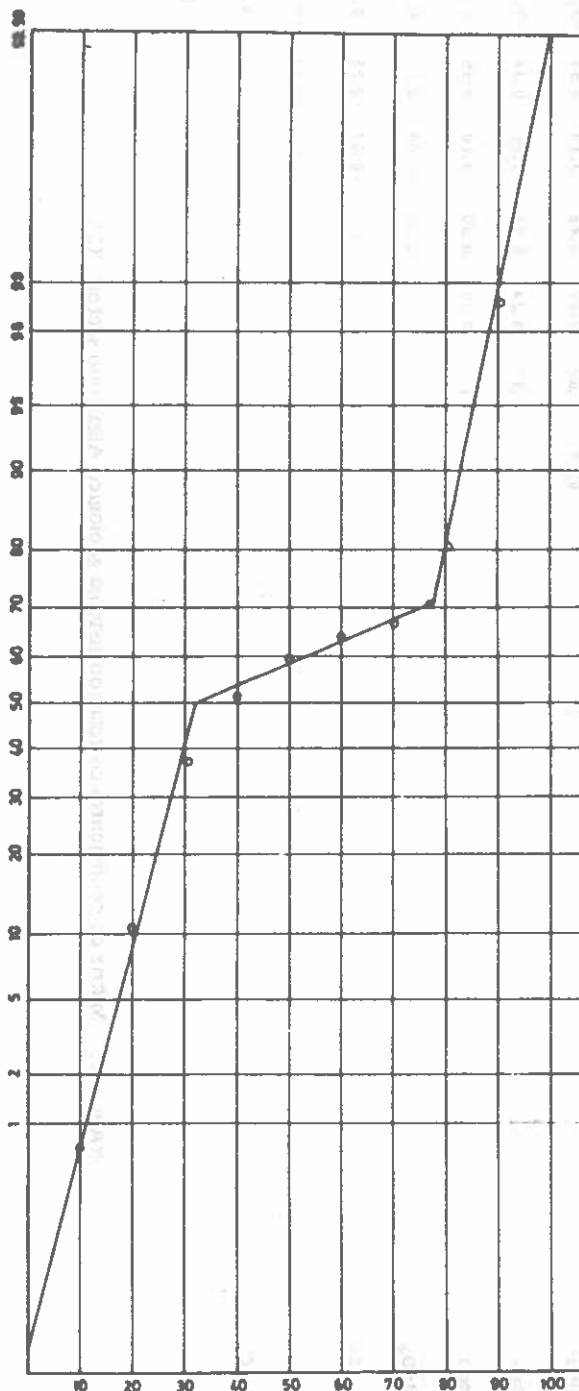


Fig. 1. Función distribución de probabilidad: recuperación metalúrgica de Fe magnético. C° Negro Cristales.

ción han dado origen a tres zonas de diferente comportamiento magnético y que la zona de oxidación representa el 50% del tonelaje del yacimiento.

Es necesario agregar que después de determinados los rangos de RM correspondientes a cada zona, éstos se pueden demarcar en los perfiles y se puede determinar la distribución espacial de cada zona.

b) Estudio de relaciones genéticas entre variables que tipifican el Yacimiento Ferrífero El Algarrobo.

Para cumplir el objetivo presente se extrajeron 900 muestras provenientes de testigos de sondajes diamantina. Las variables estudiadas fueron las siguientes:

- Coordenada Norte
- Coordenada Este
- Cota
- % Fe
- % P
- % S
- % RM
- Distancia de la muestra a la topografía original
- % FeO
- % SiO<sub>2</sub>
- % CaO
- % MgO
- % MnO<sub>2</sub>
- % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>
- % Cu
- % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Distancia horizontal de la muestra al contacto con la franja intrusiva occidental.

La matriz de coeficientes de correlación (Tabla 1) indica que existen varias correlaciones interesantes. Por ejemplo, se observa que el contenido de hierro está relacionado con el magnetismo, con el contenido de sílice, de magnesio, de vanadio y de alúmina. Por otra parte, el contenido de fósforo está relacionado con el contenido de calcio, a su vez el contenido de cobre no tiene relación alguna con las variables presentadas.

Con el objeto de clarificar la naturaleza multivariable del sistema propuesto, se agruparon todas las variables que tenían correlación entre sí, mediante análisis de factores. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

De la matriz de factores se vislumbra que existen cinco grupos de variables asociadas.

El primer grupo está compuesto por las variables contenido de hierro, recuperación meta-

	Norte	Este	Cota	Fe	P	S	M	DTO	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	MnO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cu	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	D.C.
Coord. Norte	1	0.63	-0.13	0.02	-0.33	-0.07	0.13	0.59	0.21	0.03	-0.31	-0.03	0.19	-0.21	-0.03	-0.10	0.35
Coord. Este		1	-0.27	0.16	-0.21	-0.14	0.16	0.60	0.21	-0.13	-0.20	-0.21	0.25	-0.12	-0.10	-0.15	0.94
Cota			1	0.11	-0.12	-0.44	-0.37	-0.78	-0.27	-0.06	-0.21	-0.05	-0.00	-0.01	0.06	-0.17	-0.29
Fe				1	0.11	-0.16	0.42	-0.03	0.73	-0.97	-0.27	-0.64	0.17	0.46	-0.11	-0.56	0.19
P					1	0.18	0.18	-0.12	0.16	-0.20	0.44	-0.02	0.02	0.28	0.09	0.04	-0.10
S						1	0.25	0.27	0.08	0.11	0.27	0.10	0.10	-0.03	0.04	0.21	-0.12
M							1	0.28	0.73	-0.45	0.01	-0.28	0.13	0.33	-0.18	-0.16	0.17
DTO								1	0.28	0.03	-0.05	-0.06	0.14	-0.12	-0.07	0.03	0.47
FeO									1	-0.73	-0.16	-0.45	0.18	0.43	-0.11	-0.40	0.18
SiO <sub>2</sub>										1	0.19	0.62	-0.17	-0.48	0.10	0.53	-0.17
CaO											1	0.37	-0.24	0.07	0.09	0.34	-0.10
MgO												1	-0.29	-0.30	0.10	0.56	0.24
MnO <sub>2</sub>													1	-0.10	-0.04	-0.17	0.23
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>														1	-0.07	-0.25	-0.04
Cu															1	-0.11	-0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>																1	-0.14
D.C.																	1

TABLA 1. Matriz de coeficientes correlación sistema geológico Algarrobo sector "C".

TABLA 2. Matriz de factores. Sistema geológico Algarrobo "C".

	Factor N° 1	Factor N° 2	Factor N° 3	Factor N° 4	Factor N° 5
Coordenada Norte	-0.014	0.544	-0.247	-0.534	0.047
Coordenada Este	0.087	0.957	-0.076	-0.155	-0.049
Cota	0.066	-0.308	0.810	-0.165	0.065
% Fe	0.962	0.08	-0.09	-0.0070	-0.063
% P	0.19	-0.092	-0.109	0.774	0.143
% S	-0.097	-0.246	-0.741	0.105	0.091
R.M.	0.562	0.060	-0.560	0.078	-0.214
Distancias					
Topografía original	-0.038	0.591	-0.690	-0.186	-0.004
% FeO	0.806	0.107	-0.399	-0.02	-0.084
% SiO <sub>2</sub>	-0.926	-0.061	-0.044	-0.080	0.044
% CaO	-0.300	-0.050	-0.162	0.791	0.011
% MgO	-0.74	-0.155	-0.096	0.157	0.068
% MnO <sub>2</sub>	0.23	0.325	0.041	-0.188	0.196
% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.583	-0.150	-0.001	-0.373	0.197
% Cu	-0.08	-0.06	0.003	0.113	0.908
% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.668	-0.099	-0.196	0.211	-0.328
Distancia Intrusivo	0.12	0.927	-0.004	0.054	-0.090
Varianza acumulada aplicada por cada factor	26.9%	45.4	59.52	66.32	72.69

lúrgica de hierro magnético, contenido de óxido ferroso, contenido de sílice, contenido de calcio, contenido de magnesio, contenido de vanadio y contenido de alúmina.

En base a la segunda hipótesis enunciada, este factor indicaría, desde el punto de vista geológico, que la mayoría del hierro existente en el yacimiento no ha sufrido oxidaciones posteriores a su depositación y que está ligado genéticamente a las siguientes variables: % SiO<sub>2</sub>, % CaO, % MgO, % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Esto permite sugerir que el hierro que conforma hoy en día el depósito se derivó de minerales ferromagnesianos.

El vanadio se habría formado en conjunto con la magnetita y es probable que esté formando parte de la molécula de éste. El segundo factor agrupa fundamentalmente variables determinísticas. En efecto, pertenecen a este factor las coordenadas, la cota, la distancia al intrusivo occidental y la distancia a la topografía original. La interpretación de este factor sería la siguiente: debido a que las muestras extraídas están dentro del yacimiento y a que existe correlación lineal entre las coordenadas y la cota, se puede concluir que dichas muestras se ajustarán a una superficie plana. Esto implica que el emplazamiento ha estado con-

trolado por la estructura. La correlación alta con la distancia al intrusivo indica que éste ha tenido un rol fundamental en la depositación del yacimiento.

El tercer factor está compuesto por las variables: cota, % S, RM, distancia a la topografía original y % FeO. Este factor indica que la oxidación está controlada por la morfología y la profundidad, que el azufre cristalizó en forma de piritita y que su contenido está controlado por los mismos factores que controlan la oxidación y por la oxidación misma. Indica además que la metalización de azufre es independiente de la de hierro.

El cuarto grupo de variables está compuesto por: la coordenada Norte, % P, % CaO y % V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Este factor indica que el contenido de fósforo es independiente de aquel de hierro, que el fósforo ha cristalizado en forma de apatita, que parte del vanadio cristalizó en conjunto con el fósforo y que estos elementos presentan variaciones en contenido según la dirección Norte Sur.

El quinto factor está compuesto fundamentalmente por la variable cobre. Esto indica que la metalización de cobre es totalmente independiente de la de hierro.

COMENTARIO FINAL.

La aplicación de las leyes del azar a los procesos geológicos mediante las dos hipótesis de trabajo planteadas en el presente trabajo y aplicadas a dos ejemplos reales, puede ser de gran importancia, tanto académica y práctica en la interpretación de sistemas geológicos. Desde el punto de vista académico, la validez de las hipótesis a comprobar en el futuro mediante su aplicación a sistemas geológicos distintos a los estudiados por el autor, podrá aclarar muchas dudas en el estudio de génesis de sistemas geológicos que contengan o no yacimientos minerales. A su vez servirán también en la separación de eventos superpuestos que hallan

actuado sobre dichos sistemas. Desde el punto de vista aplicado, las dos hipótesis enunciadas tienen gran importancia en la evaluación de recursos minerales, así como en la delimitación física de éstos.

Es importante aclarar que estas hipótesis y las herramientas que deben usarse para aplicarlas no son saturadas, vale decir, por si solas no reemplazan el trabajo que generalmente efectúa el geólogo (mapeo geológico, estudios microscópicos, interpretaciones del subsuelo, etc.), sino que por el contrario, sin el conocimiento geológico tradicional son de muy limitado alcance.

Año	Categoría	Cantidad	Porcentaje	Valor	Observaciones
1957	19-40	51.7	25%	1000	
1958	19-40	51.7	25%	1000	
1959	19-40	51.7	25%	1000	
1960	19-40	51.7	25%	1000	
1961	19-40	51.7	25%	1000	
1962	19-40	51.7	25%	1000	
1963	19-40	51.7	25%	1000	
1964	19-40	51.7	25%	1000	
1965	19-40	51.7	25%	1000	
1966	19-40	51.7	25%	1000	
1967	19-40	51.7	25%	1000	
1968	19-40	51.7	25%	1000	
1969	19-40	51.7	25%	1000	
1970	19-40	51.7	25%	1000	

...de los datos estadísticos...  
 ...los resultados obtenidos...  
 ...la aplicación de las leyes del azar...  
 ...los procesos geológicos...  
 ...la interpretación de sistemas geológicos...  
 ...la validez de las hipótesis...  
 ...el estudio de génesis de sistemas geológicos...  
 ...la separación de eventos superpuestos...  
 ...los yacimientos minerales...  
 ...el conocimiento geológico tradicional...  
 ...de muy limitado alcance...

...de los datos estadísticos...  
 ...los resultados obtenidos...  
 ...la aplicación de las leyes del azar...  
 ...los procesos geológicos...  
 ...la interpretación de sistemas geológicos...  
 ...la validez de las hipótesis...  
 ...el estudio de génesis de sistemas geológicos...  
 ...la separación de eventos superpuestos...  
 ...los yacimientos minerales...  
 ...el conocimiento geológico tradicional...  
 ...de muy limitado alcance...