ISSN 0717-9103

# ANÁLISIS DEL PROCESO DE ELECTRO-OBTENCIÓN DE CÁTODOS DE COBRE A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE TÉCNICAS DE DISEÑO EXPERIMENTAL.

*CARLOS TORRES NAVARRO* [1]
*ANGËN REINIKE LUENGO* [2]
*MANUEL CHÁVEZ CONTRERAS* [2]
*SAMUEL RASMUSSEN* [2]

1 Universidad del Bío-Bío, Concepción – Chile
2 Minera El Abra, Calama - Chile

## RESUMEN

Este estudio fue desarrollado en una empresa minera ubicada en el norte de Chile con el propósito de identificar las variables que tienen mayor incidencia en la producción de cátodos de cobre de alta calidad, específicamente se hizo hincapié en los porcentajes de plomo y azufre que son las impurezas relevantes en la discriminación de cátodos de alta calidad, considerando la Norma L.M.E (London Metal Exchange), que rige el mercado del cobre.

El experimento fue desarrollado utilizando un segmento de datos representativos de las condiciones actuales de operación bajo un enfoque de diseño experimental con dos niveles y con cuatro factores para el análisis del plomo y de seis factores para el caso del azufre.

Los resultados obtenidos ofrecen un importante referente para orientar futuras acciones de mejoramiento de la calidad y productividad así como poder identificar factores metalúrgicos que poseen un fundamento estadístico objetivo y, además, contar con ecuaciones preliminares para estimar porcentajes de impurezas ante eventuales cambios en las condiciones de operación.

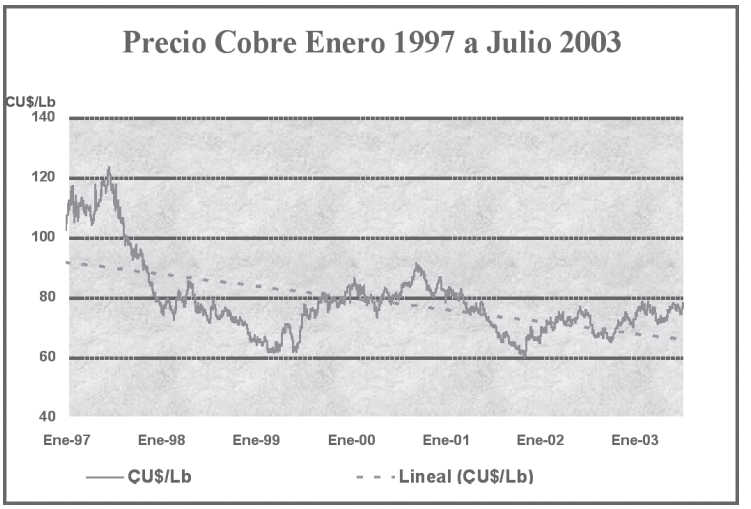
## 1.- INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la producción de cobre a nivel mundial ha aumentado significativamente con relación a períodos anteriores, lo que ha influido en la caída sostenida del precio del mineral. Esta sobre oferta ha inducido a que las grandes compañías cupríferas adopten diversas estrategias de comercialización para enfrentar reducciones de precio o nuevas estrategias de manufactura para mejorar su productividad y eficiencia.

En el gráfico N° 1 se observa la tendencia en general decreciente que ha venido experimentando el precio del cobre durante los últimos 6 años, por lo que el desafío es ofrecer al mercado productos(cátodos) High Grade a fin de obtener premios por sobre el valor del mercado.

[1] Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad del Bío-Bío, Chile
email: ctorres@ubiobio.cl
[2] Minera El Abra, Calama - Chile
email: {areinike, mchavez, srasmussen } @phelpsd.cl

**Figura 1:** Evolución precio del cobre




En atención al comportamiento que han venido experimentando estas variables económicas a lo largo de los últimos seis años esta situación induce a la empresa bajo estudio a abordar esta situación adversa, particularmente a través del estudio de sus variables y prácticas operacionales de modo de diseñar futuras estrategias que permitan ofrecer un mejor margen de comercialización para los cátodos de cobre.

En este sentido, este estudio, que forma parte de un Multi Proyecto en la empresa minera, enfrenta esta situación al utilizar un enfoque estadístico para descubrir y dimensionar oportunidades de mejoramiento de la calidad de sus productos así como también proporcionar evidencia objetiva para respaldar prácticas operacionales como producto del trabajo y conocimiento adquirido a través del desarrollo del estudio.

## 2.- OBJETIVO PRINCIPAL Y METODOLOGÍA

El objetivo principal del estudio fue identificar las principales variables que inciden en la calidad de los cátodos de cobre producidos en la nave de electro-obtención e identificar acciones para el mejoramiento continuo de la calidad.

Para el desarrollo del estudio se tuvo en cuenta la siguiente metodología:

- Resultados de reuniones de Equipos de Mejoramiento de Negocios “Business Improvement Teams” que trabajan bajo el programa de optimización corporativo de la empresa “Quest for Zero”, quienes precisaron el escenario en estudio.
- Análisis estadístico de las cuatro variables de calidad utilizadas en la empresa: Plan de Producción, Calidad de Electrodos, Prácticas Operacionales y Variables Metalúrgicas.
- Utilización de la metodología de mapeo reverso “lean pull” para precisar estándares técnicos y verificar trazabilidad respecto de los valores máximos y mínimos de los factores bajo estudio
- Utilización de la Norma L.M.E (London Metals Exchange) como referente para identificar las variables de respuesta para la aplicación del diseño de experimentos.
- Utilización de técnicas estadísticas, entre ellas: Cartas de control y análisis de Capacidad de procesos.
- Utilización de técnicas de diseño de experimentos tales como diseños factoriales y superficies de respuesta para identificar factores relevantes y presencia de interacciones importantes.
- Utilización de software statgraphics para facilitar la obtención de resultados tanto en el ámbito del análisis estadístico como de control de calidad y diseño experimental a través de su opción de diseño definido por el usuario.
- Utilización de la metodología de Gage R & R para verificar la efectividad y confiabilidad de los sistemas de medición.

# 3.- DESARROLLO Y RESULTADOS

## 3.1.- Introducción de cómo se abordó el diseño

Para identificar las variables relevantes que inciden en la calidad del cobre, se consideraron las opiniones vertidas por el equipo de mejoramiento de negocios de la empresa permitiéndose identificar los factores que inciden directamente en los niveles de plomo y azufre presentes en los cátodos de cobre. Los factores considerados en un principio fueron los siguientes: Concentración de Cobre, Concentración de Cobalto, Temperatura del electrolito alimentación celda, Densidad de Corriente, Peso Cátodos, Dosificación de Guar y Flujo Alimentación Celda.

Dada la experiencia operacional previa existente sobre la materia se optó por realizar dos diseños experimentales utilizando la información histórica ya existente y previamente depurada. El carácter de los diseños fue el siguiente: un diseño $2^4$ con el plomo como su variable de respuesta y un segundo diseño $2^6$ con el azufre como su variable de respuesta.

## 3.2.- Resultados y conclusiones para el Plomo y Azufre

La Tabla 1 identifica los factores de cada diseño y sus correspondientes rangos de parámetros. Los gráficos siguientes indican los resultados obtenidos en ambas aplicaciones.

**Tabla 1:** Características de los diseño analizados

| **Factores en diseño $2^4$** | **Nivel bajo** | **Nivel alto** |
|---|---|---|
| A:Concenración de cobalto (ppm) | 142 | 169.5 |
| B: Temperatura electrolito (°C) | 44.6 | 50.5 |
| C: Densidad de corriente (A/m$^2$) | 269.6 | 326.6 |
| D: Peso cátodos (Kg) | 76.5 | 103.3 |
| | | |
| **Factores en diseño $2^6$** | **Nivel bajo** | **Nivel alto** |
| A: Concentración de Cu (gpl) | 39.7 | 44.3 |
| B: Temperatura electrolito (°C) | 44.6 | 50.5 |
| C: Densidad de corriente (A/m$^2$) | 269.6 | 326.6 |
| D: Peso cátodos (Kg) | 76.5 | 103.3 |
| E: Dosificación de Guar (gr/ton) | 90 | 240 |
| F: Flujo a celdas (m$^3$/hra) | 4.576 | 5119.4 |

**Figura 2:** Pareto estandarizado para el Plomo

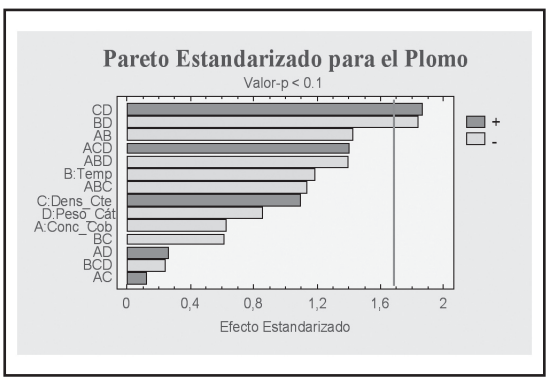



**Figura 3:** Interacciones entre Peso Cátodos y Densidad de Corriente

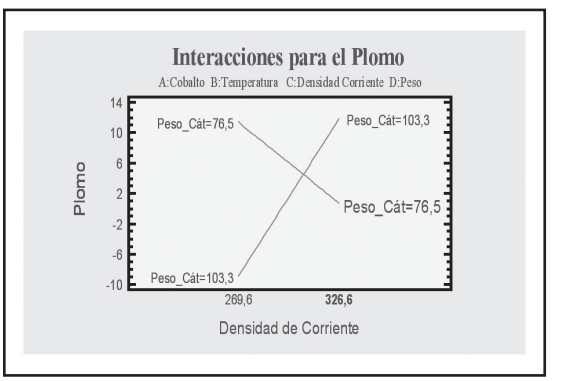
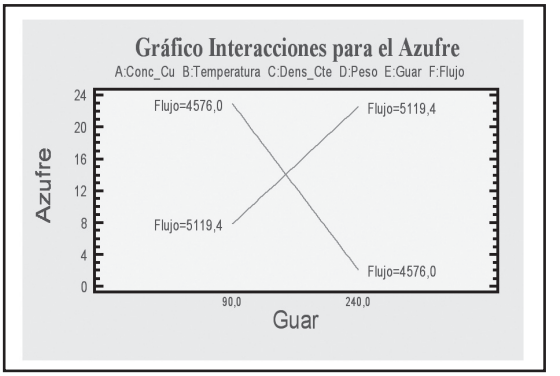


**Figura 4:** Pareto estandarizado para el Azufre

**Figura 5:** Interacciones entre Flujo y Guar




Los análisis de varianza identifican dos interacciones que tienen un p-value menor que 0.1, indicando que tales interacciones son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 90%. La individualización de tales interacciones, ordenadas en forma descendente respecto de sus p-value, son las siguientes:

CD: Densidad de corriente v/s - Peso cátodos P-value = 0.0701
BD: Temperatura electrolito v/s Peso cátodos P-value = 0.0743

**Tabla 2:** Análisis de varianza y P-value para el Plomo

Análisis de Varianza para el Plomo

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| A:Conc_Cob | 3.42701 | 1 | 3.42701 | 0.39 | 0.5351 |
| B:Temp | 12.2184 | 1 | 12.2184 | 1.40 | 0.2444 |
| C:Dens_Cte | 10.4439 | 1 | 10.4439 | 1.19 | 0.2812 |
| D:Peso_Cát | 6.33623 | 1 | 6.33623 | 0.72 | 0.3999 |
| AB | 17.7735 | 1 | 17.7735 | 2.03 | 0.1619 |
| AC | 0.130293 | 1 | 0.130293 | 0.01 | 0.9035 |
| AD | 0.57913 | 1 | 0.57913 | 0.07 | 0.7983 |
| BC | 3.25324 | 1 | 3.25324 | 0.37 | 0.5456 |
| BD | 29.3996 | 1 | 29.3996 | 3.36 | 0.0743 |
| CD | 30.3192 | 1 | 30.3192 | 3.46 | 0.0701 |
| ABC | 11.2441 | 1 | 11.2441 | 1.28 | 0.2638 |
| ABD | 16.9501 | 1 | 16.9501 | 1.94 | 0.1718 |
| ACD | 17.037 | 1 | 17.037 | 1.95 | 0.1707 |
| BCD | 0.494876 | 1 | 0.494876 | 0.06 | 0.8133 |
| Total error | 350.138 | 40 | 8.75344 | | |

Para el análisis del Azufre se detectó que existen seis efectos que tienen un p-value menor que 0.1, indicando que ellos son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 90%. Sin embargo, a diferencia de lo observado con el plomo, en esta situación se observan tres interacciones y tres efectos principales significativos. La individualización de tales efectos ordenados en forma descendente respecto de sus P-value, son los siguientes:

EF: Dosificación de Guar v/s Flujo a celdas P-value = 0.0092
DF: Peso cátodos v/s Flujo a celdas P-value = 0.0355
D : Peso cátodos P-value = 0.0367
A : Concentración de Cu P-value = 0.0442
CF: Densidad de corriente v/s Flujo a celdas P-value = 0.0580
C : Densidad de corriente P-value = 0.0622

Tabla 3: Análisis de varianza y P-value para el Azufre

**Análsis de Varianza para Asufre**

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---|---|---|---|---|---|
| A:Conc_Cu | 26.4882 | 1 | 26.4882 | 4.38 | 0.0442 |
| B:Temp | 1.7881 | 1 | 1.7881 | 0.30 | 0.5904 |
| C:Dens_Cte | 22.5409 | 1 | 22.5409 | 3.73 | 0.0622 |
| D:Peso_Cát | 28.6801 | 1 | 28.6801 | 4.74 | 0.0367 |
| E:Guar | 1.86404 | 1 | 1.86404 | 0.31 | 0.5826 |
| F:Flujo | 2.15445 | 1 | 2.15445 | 0.36 | 0.5548 |
| AB | 0.960882 | 1 | 0.960882 | 0.16 | 0.6928 |
| AC | 6.5861 | 1 | 6.5861 | 1.09 | 0.3044 |
| AD | 2.18508 | 1 | 2.18508 | 0.36 | 0.5520 |
| AE | 2.43014 | 1 | 2.43014 | 0.40 | 0.5306 |
| AF | 0.773413 | 1 | 0.773413 | 0.13 | 0.7230 |
| BC | 12.2707 | 1 | 12.2707 | 2.03 | 0.1638 |
| BD | 0.510845 | 1 | 0.510845 | 0.08 | 0.7732 |
| BE | 13.0008 | 1 | 13.0008 | 2.15 | 0.1522 |
| BF | 1.31307 | 1 | 1.31307 | 0.22 | 0.6444 |
| CD | 12.8468 | 1 | 12.8468 | 2.12 | 0.1545 |
| CE | 0.369581 | 1 | 0.369581 | 0.06 | 0.8063 |
| CF | 23.3308 | 1 | 23.3308 | 3.86 | 0.0580 |
| DE | 0.832367 | 1 | 0.832367 | 0.14 | 0.7131 |
| DF | 29.07 | 1 | 29.07 | 4.80 | 0.0355 |
| EF | 46.2697 | 1 | 46.2697 | 7.65 | 0.0092 |
| Total error | 199.666 | 33 | 6.05049 | | |

A continuación se presentan las ecuaciones de regresión múltiple para el plomo ($r^2$ = 30,65%) y para el azufre ($r^2$ = 67,93%) que permitirá estimar los niveles de las variables de respuesta respectivas ante diversos escenarios.

**Plomo** = 16272,4 - 99,7414*Conc_Cob - 568,459*Temp - 9,74535*Dens_Cte -60,85*Peso_Cát + 3,62343*Conc_Cob*Temp + 0,0189335*Conc_Cob*Dens_Cte +0,3108*Conc_Cob*Peso_Cát + 0,973578*Temp*Dens_Cte +3,81184*Temp*Peso_Cát - 0,336726*Dens_Cte*Peso_Cát - 0,00557021*Conc_Cob*Temp*Dens_Cte - 0,0236426*Conc_Cob*Temp*Peso_Cát + 0,00275299*Conc_Cob*Dens_Cte*Peso_Cát - 0,00150459*Temp*Dens_Cte*Peso_Cát

**Azufre** = -2,69706 + 11,9283*Conc_Cu - 0,905159*Temp + 7,13307*Dens_Cte- 32,2032*Peso_Cát - 2,32221*Guar + 0,1213*Flujo +0,134056*Conc_Cu*Temp - 0,0510165*Conc_Cu*Dens_Cte + 0,0824382*Conc_Cu*Peso_Cát + 0,0202066*Conc_Cu*Guar -0,00235109*Conc_Cu*Flujo + 0,0380013*Temp*Dens_Cte -0,0188411*Temp*Peso_Cát - 0,0226336*Temp*Guar - 0,00230136*Temp*Flujo+ 0,00898785*Dens_Cte*Peso_Cát + 0,000626339*Dens_Cte*Guar - 0,00151534*Dens_Cte*Flujo + 0,00257578*Peso_Cát*Guar +0,0052814*Peso_Cát*Flujo + 0,000435141*Guar*Flujo

### 3.3.- Optimización de parámetros

Si bien las ecuaciones de regresión no arrojaron un grado de correlación alto (superior a 75%) sí ofrecen, en una primera etapa, la posibilidad de identificar los niveles de los factores que entregarían un valor óptimo o esperado para plomo y azufre, de modo de poder cotejarlos con los estándares operacionales vigentes en la empresa; por otra parte, consideramos que esta herramienta puede ser muy útil al momento de evaluar cambios operacionales o de estructura dentro de algún área de la planta, que involucren variaciones a los niveles actuales de operación.

Para identificar los valores óptimos de los factores que proporcionarían una calidad de cátodos High Grade, se fijó un valor de impurezas para el plomo de 2 ppm y de 6 ppm para el azufre, obteniéndose los niveles óptimos de los factores como se presentan en la Tabla 3. Además, los gráficos obtenidos a través del software utilizado nos permiten observar las zonas o contornos para diferentes valores esperados de impurezas de plomo y azufre.

**Tabla 4:** Especificación de nivel óptimos para factores de experimento

| Factores | Optimo Plomo | Optimo Azufre | High Grade (Pb < 3 y S< 8 ppm |
|---|---|---|---|
| Concentración Cobre [gpl] | —— | 42 | 42 |
| Temperatura [ºC] | 48 | 48 | 48 |
| Densidad Corriente [A/m$^2$] | 288 | 286 | 287 |
| Peso Cátodos [Kg] | 91 | 93 | 92 |
| Dosificación De Guar [gr/Ton] | —— | 170 | 170 |
| Flujo Alimentación Celdas [m$^3$/hr] | —— | 4.870 | 4.870 |
| Concentración Cobalto [ppm] | 156 | —— | 156 |

**Figura 6:** Contornos estimados para el Plomo

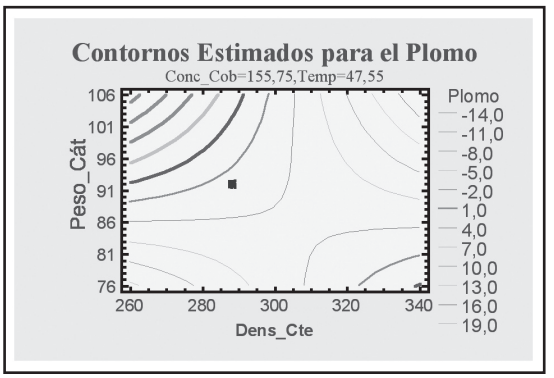
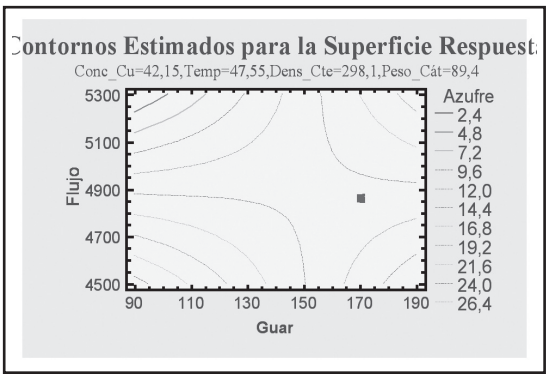



**Figura 7:** Contornos estimados para el Azufre




## 4.- CONCLUSIONES

El análisis de los resultados permitió identificar y confirmar aquellos factores que juegan un rol estadísticamente significativo en la obtención de cátodos de cobre con bajos niveles de impurezas de plomo y azufre, además, permitió determinar que el factor concentración de cobalto no fue estadísticamente significativo como efecto principal y tampoco como efecto importante que interactúa con otro factor de modo que puede ser estudiada su omisión en futuros diseños de esta naturaleza.

La experiencia práctica acumulada y observada en torno al desarrollo de este trabajo permitió confirmar la hipótesis que la obtención de cátodos de alta calidad también está influenciada con la observancia, entre otras, de buenas prácticas operacionales durante su manufactura.

Lo anterior induce a desarrollar y/o mantener vigentes adecuados procedimientos de operación y control, en especial sobre los parámetros y factores abordados en este estudio, en atención a que, por una parte, los análisis preliminares a las respectivas cartas de control e indicadores de capacidad ofrecen una oportunidad de mejoramiento y, por otra parte, este estudio ofrece una evidencia objetiva para orientar esfuerzos de gestión hacia aquellos factores y niveles que fueron individualizados como estadísticamente significativos.

## 5.- AGRADECIMIENTOS

A. Reinike y C. Torres y expresan su agradecimiento a la empresa Minera El Abra, equipos de trabajo y en particular a sus ejecutivos señores M. Chávez y S. Rasmussen por el apoyo y cooperación entregados para el desarrollo de esta investigación.

## 6.- REFERENCIAS

1. GUTIÉRREZ, P (1997), Calidad total y productividad, Mc Graw Hill, México.

2. MANUGISTICS, INC (1995), Experimental Design Statgraphics Manual, USA

3. MEYERS, R AND MONTGOMERY, D (1995), Response surface methodology, John Wiley & Sons, Inc., Usa.

4. MONTGOMERY, D (1991), Diseño y análisis de experimentos, Interaméricana editores, México, D.F.

5. MONTGOMERY, D (1991), Control estadístico de calidad; Interaméricana editores, México, D.F.

6. MONTGOMERY, D and RUNGER, G (1998), Probabilidad y estadística, Mc Graw Hill, México, D.F.

7. REINIKE, A (2003), Uso de cartas de control y diseño de experimentos aplicado en minera El Abra, Tesis Ingeniería Civil Industrial, U. del Bío-Bío.

8. SNIDER, T (2003), La estrategia de Phelps Dodge para mejorar su desempeño, Minería Chilena N° 265, pp 19-24, Chile.

Copyright of Revista Ingeniería Industrial is the property of Departamento de Ingenieria Industrial, Universidad del Bio-Bio and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.