

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE  
FACULTAD DE ECONOMÍA Y ADMINISTRACIÓN  
MAGISTER EN GESTION MINERA**



**DETERMINACIÓN DE UN MODELO DE  
RECUPERACION A TRAVÉS DE LA TECNICA DE  
ANALISIS SECUENCIAL**

*Proyecto de Titulación presentado para optar al grado de  
Magíster en Gestión Minera.*

*Profesor Guía: Victor Conejeros.*

**Mauricio Vásquez Pacheco.**

**Gabriel Ocaranza Henríquez.**

*Antofagasta, Noviembre de 2011.*



Universidad Católica del Norte  
ver más allá



Facultad de Economía y Administración

Dirección de Postgrado

# “DETERMINACIÓN DE UN MODELO DE RECUPERACION A TRAVÉS DE LA TECNICA DE ANALISIS SECUENCIAL”

*Proyecto de Titulación presentado para optar al grado de  
Magíster en Gestión Minera.*

*Profesor Guía: Victor Conejeros.*

**Mauricio Vásquez Pacheco.**

**Gabriel Ocaranza Henríquez.**

*Antofagasta, Noviembre de 2011.*

# Indice

---

1. Resumen .....	5
2. Introducción.....	6
3. Objetivos.....	7
3.1 Objetivo General .....	7
3.2 Objetivo Específicos .....	7
4. Estudio del Estado del Arte .....	8
4.1 Métodos de Análisis e interpretación de Resultados.....	13
4.1.1 Método del Análisis Parcial.....	13
4.1.2 Método Análisis Secuencial.....	17
4.1.3 Procedimiento analítico usado en el método de análisis secuencial de cobre 20	
4.2 Aplicación de la Metodología a Nivel Industrial .....	21
4.2.1 BHP Billiton: Minera Escondida Limitada.....	22
4.2.2 Codelco Norte: RADOMIRO TOMIC .....	22
4.2.3 Antofagasta Minerals : Los Pelambres.....	23
4.2.4 Codelco Norte: Chuquicamata .....	23
4.2.5 Southern Perú: La Granja .....	24
5. Generación de un Modelo de Recuperación.....	25
5.1 Distribución de Cobre Total en las Leyes de Cabeza .....	26

5.2 Distribución de Cobre Soluble en Ácido en las Leyes de Cabeza .....	26
5.3 Distribución de Cobre Soluble en Cianuro de Sodio en las Leyes de Cabeza.....	27
5.4 Distribución de Cobre Total en Ripios de Lixiviación .....	28
5.5 Distribución de Cobre Soluble en Ácido en Ripios de Lixiviación.....	28
5.6 Distribución de Cobre Soluble en NaCN en Ripios de Lixiviación.....	29
5.7 Distribución de Recuperación de Cobre Total.....	30
5.8 Distribución de Recuperación de Cobre Soluble en Acido.....	30
5.9 Distribución de Cobre Soluble en NaCN.....	31
6. Análisis Económico.....	35
6.1 Impacto de la Recuperación en el EBITDA.....	36
6.2 Impacto Económico de la Caracterización Geometalúrgica .....	38
6.3 Variables que Impactan en el EBITDA .....	40
7. Conclusiones.....	42
8. Bibliografía.....	44
9. Anexos.....	45
10. Nomenclatura.....	50

# 1. Resumen

---

El presente trabajo muestra la generación de un modelo geometalúrgico de recuperación para un proceso de lixiviación, empleando el análisis secuencial de cobre. A través de un análisis estadístico se logra determinar las recuperaciones de los minerales oxidados y sulfurados presentes en el mineral, finalmente se realiza un análisis económico donde es posible comprobar el bajo impacto de la realización de pruebas en los costos operacionales y el alto nivel de información que es posible obtener, esto último realza el valor de contar con un modelo geometalúrgico que permite alinear de mejor forma los objetivos estratégicos de una compañía minera.

## 2. Introducción

---

La geometalurgia es una disciplina que integra básicamente a la geología y la metalurgia extractiva. Es así que, la geometalurgia se ocupa de clasificar los minerales dentro de un yacimiento según deba ser su comportamiento frente a un tratamiento metalúrgico.

Ésta es una disciplina transversal dentro de las actividades mineras, que tiene el objetivo de sistematizar varias de las complejidades asociadas a la determinación del valor del recurso y consecuentemente su explotación económicamente favorable. Al integrar la geología, operaciones mineras, procesamiento de minerales y metalurgia, la geometalurgia pretende mejorar el proceso de evaluación de los recursos económicos y hacerla mucho más efectiva en términos técnicos y económicos. La geometalurgia es totalmente aplicable, tanto en los estudios de factibilidad como en las etapas de operación y la premisa fundamental de esta ciencia radica en que las características geológicas de un depósito mineral condicionan enormemente la respuesta metalúrgica, lo cual a su vez permite definir la cantidad de reservas aprovechables.

Actualmente existe un avance importante en el uso de metodologías que permiten determinar las reservas y valoración de los bloques geometalúrgicos, no obstante la determinación del parámetro de recuperación y los criterios empleados para caracterizar este valor son poco abordados en la bibliografía, el presente trabajo muestra el uso de modelos estadísticos sencillos que permiten determinar la recuperación característica para un cuerpo mineralógico dado y su impacto en las utilidades de la empresa cuando este valor es sobrestimado.

## 3. Objetivos

---

Los objetivos generales y específico de este trabajo son los siguientes:

### 3.1 Objetivo General

Generar una herramienta de análisis que permita determinar la recuperación de cobre para un rango de leyes a través del análisis parcial de cobre.

### 3.2 Objetivo Específicos

- Conocer y aplicar la metodología de análisis secuencial y parcial de cobre.
- Emplear métodos estadísticos de análisis de datos.
- Analizar económicamente el impacto que produce el uso de valores erróneos de recuperación.

## 4. Estudio del Estado del Arte

---

En las empresas mineras se presentan con frecuencia discordancias o conflictos de operación cuando los responsables de las labores geológicas, mineras y metalúrgicas discrepan en cuanto a las características de los minerales que se planifican para extracción y luego se envían a la planta metalúrgica. Resulta muchas veces que la planta Metalúrgica, que recibe el mineral, se encuentra con un material que puede diferir de modo importante al que estuvo procesando en periodos previos. Esto da origen a que las condiciones del tratamiento habitual no respondan de modo eficaz al nuevo mineral en proceso. Consecuencia de ello, puede resultar en una operación ineficiente, p. ej. disminución en la recuperación del metal de interés, incremento de impurezas en el producto, reducción de capacidad de tratamiento de mineral, etc. Este tipo de situaciones, que claramente corresponden a dificultades en la planificación integral de la actividad minera, pueden ser superadas en gran medida al incorporar el concepto de un modelo metalúrgico que logre prever las características de un determinado cuerpo mineralógico.

La geometalurgia es una disciplina emergente que tiene el propósito de incorporar los aspectos de planificación integral de la actividad minera, desde la fase de exploración mineral, incluyendo los planes de minado e identificando los niveles de producción que dependen de la dureza, moliendabilidad, la recuperación (función de la liberación, forma y textura mineral, etc.) y la calidad del concentrado, etc. Metodológicamente, se debe obtener información a nivel micro y macroscópico. Las variables geometalúrgicas son elementos importantísimos en el momento de determinar costos y utilidades del proyecto minero.

Es importante tener en cuenta que aspectos claves en un proyecto minero, son la evaluación del potencial de valor económico; y el desarrollo de un diseño de operación eficiente. Los aspectos de diseño incluyen en la metodología de minado, metodología de tratamiento del mineral y en establecer los volúmenes de producción. Todas estas

características tienen a su vez gran influencia en la economía del proyecto y en la determinación de su valor integral.

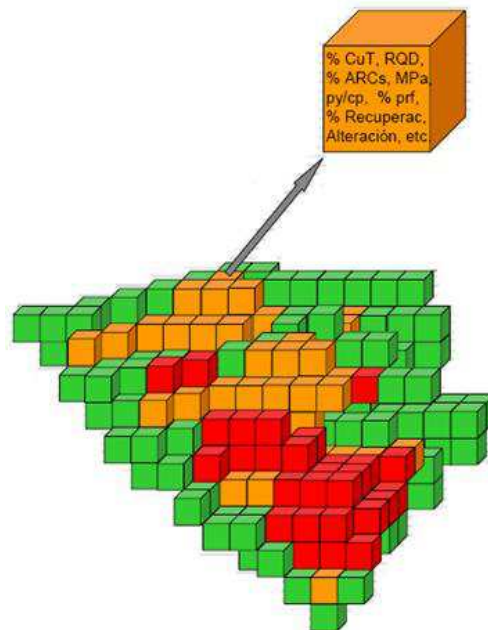
La evaluación integral de un proyecto minero consiste en determinar las toneladas de mineral que están por encima del valor del “cut-off”, valores de leyes por encima del valor del “*cut-off*”, la distribución espacial de la relación toneladas/ley por encima del valor del “*cut-off*”, para una o más variables. La dilución, pérdidas de mineral y la recuperación metalúrgica son factores que pueden variar y que deben ser considerados en la etapa de evaluación de las reservas mineras y en la determinación de la rentabilidad del proyecto. Adicionalmente, es muy importante considerar la concentración de elementos perjudiciales, costos de minado y procesamiento y rendimiento metalúrgico.

En la etapa de los estudios de factibilidad, la adecuada caracterización de minerales combinado con el modelamiento espacial de características físicas críticas del mineral en el yacimiento, proporcionan elementos mucho más valiosos para establecer el diseño de planta. Esto reduce los riesgos asociados al desarrollo de operaciones nuevas o el diseño de ampliaciones. Identificar plenamente el cuerpo mineral permite identificar deficiencias en los productos y encontrar oportunidades de bajo costo y/o alto valor.

En las etapas de operación de planta, la Geometalurgia permite mejorar la comunicación entre geólogos, planificadores mineros y metalurgistas. Todas las disciplinas trabajando juntas para comprender el valor del depósito y efectuar mejor programación de la extracción de los diversos tipos de materiales. Con ello se reduce el riesgo e incertidumbre del control de ley, minado y procesamiento.

El conocimiento completo del yacimiento que permite definir el valor real del mineral, en términos del producto a obtener y su costo de producción, define por completo el plan de minado. Al identificar los tipos de material, sus asociaciones espaciales y sus variables de proceso, se mejora la planificación de las operaciones y la producción. Un mejor conocimiento origina menor incertidumbre y menos necesidades de modificación de planes ante eventos inesperados.

La evaluación geometalúrgica implica cambios en los procedimientos tradicionales de “*core logging*”. En estas se debe introducir técnicas de evaluaciones mineralógicas asociadas a los procesos metalúrgicos, respuestas de las diversas variables metalúrgicas e introducción de esas respuestas en la definición de bloques geometalúrgicos.



**Ilustración 1: Representación visual de bloques Geometalúrgicos**

Un bloque geometalúrgico es una porción tridimensional de mineral de yacimiento el cual ha sido caracterizado en cuanto sus diversas propiedades, tanto geológicas como metalúrgicas. Ello permite tener el registro completo del yacimiento de modo que el rendimiento metalúrgico y su valor económico quedan determinados mucho antes de que el mineral ingrese a la planta metalúrgica a través de un modelo que permite conocer de antemano su comportamiento.

Es una premisa fundamental de la Geometalurgia que las características geológicas de un depósito mineral condicionan enormemente la respuesta metalúrgica, lo cual a su vez permite definir la cantidad de reservas aprovechables. El conocimiento geológico sobre la formación de depósito mineral (temperatura, presión, alteraciones, fluidos, ácidos, condiciones de emplazamientos, relaciones espaciales, etc.), resulta información útil para liberar más eficientemente un mineral valioso.

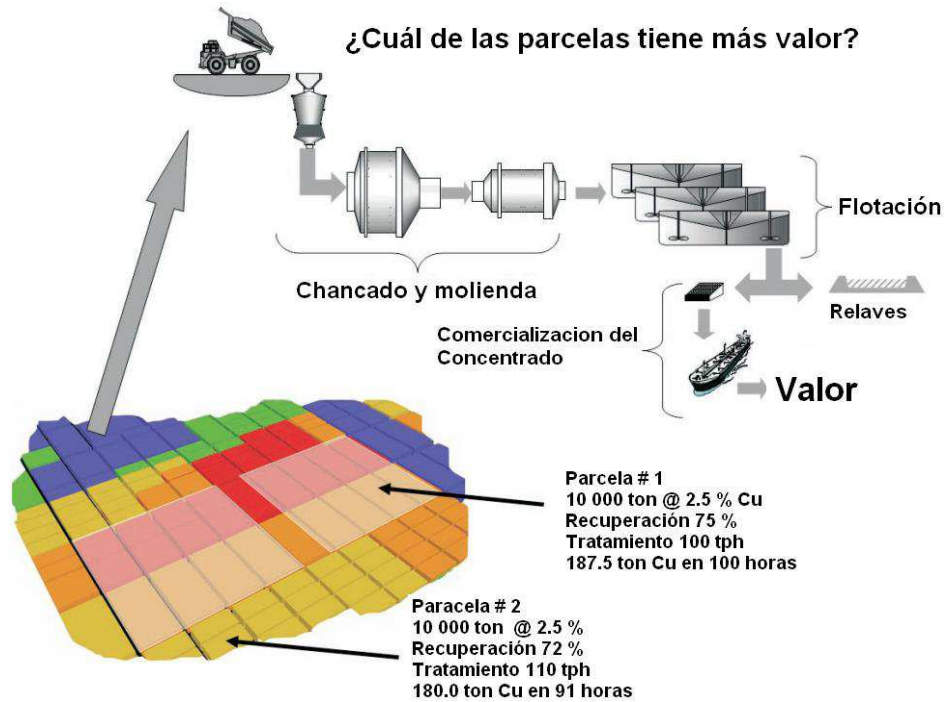
Por intermedio de la geología se realizan las evaluaciones sobre las relaciones espaciales del mineral, propiedades tales como la re-cristalización y alteraciones, distribución mineral, fracturas, etc., de lo que resulta información fundamental para evaluar económicamente un yacimiento. Esa información geológica debe ser re - evaluada y complementada con atributos de proceso metalúrgico.

Para el metalurgista es importante conocer la distribución de materiales en el yacimiento, su variabilidad, las asociaciones mineral valioso-ganga, intensidad de alteraciones del mineral con una perspectiva espacial de tres dimensiones, situaciones que son bien conocidas por el geólogo.

El trabajo Geometalúrgico se realiza mejor cuando el geólogo examina sus muestras de perforación, identifica las características minerales y con ello determina las variables de potencial significancia en el procesamiento del mineral.

Las características metalúrgicas se deben asociar con el mineral y sus características litológicas, e incorporar todo ello en los modelos Geometalúrgicos tridimensionales. En última instancia, un modelo Geometalúrgico debe conducir a la creación de una matriz que incluya la geología, mineralogía, condiciones de extracción de mina y parámetros metalúrgicos que se utilizarán en el planeamiento minero y diseño de procesos. Esta última situación, conduce a su vez a definir un plan de minado con la perspectiva de remover hacia la Planta Metalúrgica los minerales susceptibles de un tratamiento rentable. Por ejemplo considérese dos parcelas de mineral, ambas con la misma cantidad de mineral (Ilustración 2). De la primera parcela se puede procesar 100 t/h con una recuperación metalúrgica del 75 %. De la segunda parcela se puede procesar 110 t/h con

una recuperación metalúrgica del 72 %. Ambas parcelas son rentables; es decir, cubren todo el costo de procesamiento mineral, administración y comercialización. Desde una perspectiva de tiempo-valor, la segunda parcela proporciona mayor valor en tanto que consigue mayor cantidad de tratamiento aunque la recuperación sea menor.



**Ilustración 2: Destino de un bloque de mineral**

Esta estrategia, que considera fundamentalmente la maximización de la recuperación del metal valioso por unidad de tiempo, es la base de los esquemas de optimización y que hace uso del concepto Geometalúrgico.

El éxito de un modelo geometalúrgico implica la creación de una matriz que incluya las variaciones geológicas, mineralógicas y pruebas de rendimiento, información que será utilizada en el planeamiento de minado y el diseño general.

En términos generales, la caracterización del mineral es la cuantificación de la información física obtenida de muestras que representan un cuerpo mineralizado. La información recopilada como parte de un programa de caracterización de mineral proporciona la base objetiva para el abordaje del mapeo geometalúrgico. Tal como se muestra en la tabla 1 la planificación exitosa de una mina requiere información

proveniente de varias disciplinas diferentes (geología, química, mineralogía) o de parámetros (propiedades físicas, respuesta metalúrgica y mediciones geotécnicas),

Disciplina	Parámetro	Pruebas
Geología	Relaciones de Campo	Mapeo, Alteración, Litología
Química	Leyes de Mineral	Análisis Secuencial
Metalurgia	Recuperación	Análisis en Botella, Gaviones, Consumo de Ácido.
Geotecnia	Preparación del sitio.	Densidad de Suelo, estabilidad de taludes.

Tabla 1: Disciplinas que intervienen en los planes Geometalúrgicos

## 4.1 Métodos de Análisis e interpretación de Resultados

En la actualidad existen dos técnicas ampliamente usadas para determinar las características de un yacimiento, el primero de ellos es el método secuencial de Cobre y el segundo corresponde al método del Análisis Parcial, ambos se basan en la misma filosofía referente al nivel de solubilidad de las distintas especies mineralógicas frente a distintos ataques químicos.

### 4.1.1 Método del Análisis Parcial

Este método permite distinguir entre distintos tipos de minerales sulfurados basado en la distinta disolución que presentan bajo diferentes agentes oxidantes, este método establece los siguientes análisis:

Análisis	Método
Cobre Total (CuT)	HCl-HClO <sub>4</sub> -HNO <sub>3</sub> calentar a sequedad, disolver en HCl.
Cobre soluble en Sulfato Férrico (CuFS)	5 g/l Fe <sup>3+</sup> y 50 g/l H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> lixiviación por 1 hora a temperatura ambiente.
Cobre soluble en Cianuro de Sodio (CuCN)	10% NaCN lixiviación por 30 minutos a temperatura ambiente.

Tabla 2: Método de extracción Parcial

En función de los análisis realizados se pueden establecer las siguientes relaciones:

- 1 unidad de Calcopirita (Cpy) entrega todo (100%) su Cu contenido al ataque de CuT (“Cobre Total”)
- 1 unidad de Calcosina (Cct) entrega todo (100%) su Cu contenido al ataque de CuT (“Cobre Total”)
- 1 unidad de Calcosina(Cct) entrega 99,2% su Cu contenido al ataque de CNCu.
- 1 unidad de Covelina(Cov) entrega 53,6% su Cu contenido al ataque de CuCN.
- 1 unidad de Covelina entrega 3.5% su Cu contenido al ataque de FSCu

Estas “extracciones limitantes” son una consecuencia de la composición de cada mineral y agresividad a la digestión química. A partir de lo anterior se establecen las tablas 3 y 4 con las extracciones limitantes.

	<b>Cpy</b>	<b>Cct</b>	<b>Cov</b>
TCu (Total)	1.000	1.000	1.000
NaCN (CNCu)	0.094	0.990	0.960
Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (FSCu)	0.046	0.510	0.035

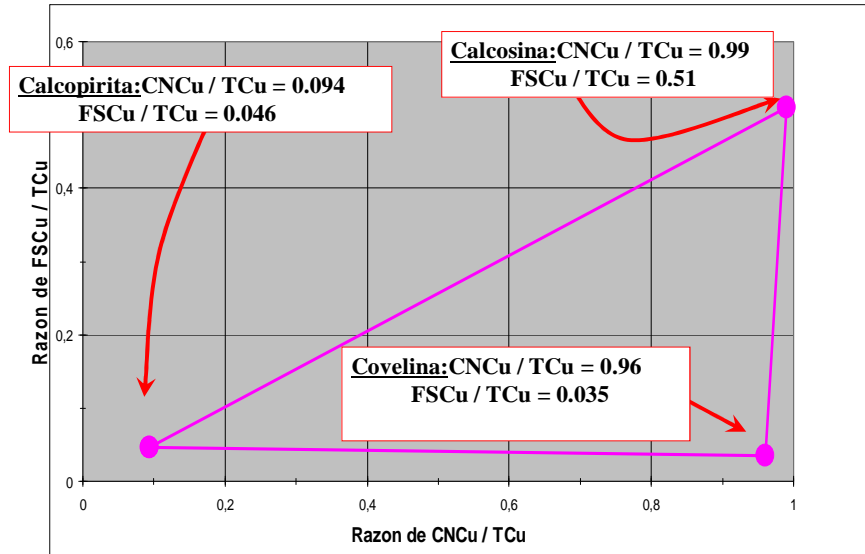
**Tabla 3: EXtracciones limitantes**

Lo anterior también puede ser expresado en porcentajes:

	<b>Cpy</b>	<b>Cct</b>	<b>Cov</b>
TCu (Total)	100%	100%	100%
NaCN (CNCu)	9.4%	99%	96%
Fe <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (FSCu)	4.6%	51%	3.5%

**Tabla 4: Extarcciones limitantes**

En función de los análisis mostrados en las tablas 3 y 4 es posible establecer el siguiente sistema ternario que representa gráficamente al sistema Calcopirita, Calcosina, Covelina:



**Ilustración 3: Sistema ternario Calcopirita, Calcosina, Covelina(Partial Extraction Workshop, R.K.Preece, November 2009).**

Esta información representa la base para el análisis parcial de cobre, para una muestra dada es necesario realizar los análisis químicos para CuT, CuFS y CuCN, y resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$(1.000 * cpy) + (1.000 * cov) + (1.000 * cct) = CuT / CuT$$

$$(0.094 * cpy) + (0.960 * cov) + (0.990 * cct) = CNCu / CuT$$

$$(0.046 * cpy) + (0.035 * cov) + (0.510 * cct) = FSCu / CuT$$

Donde los términos CuT/CuT, CNCu/CuT, FS/CuT se obtendrán de los análisis y resultarán particulares para cada una de las muestras que se analicen y serán función directa de la mineralogía. Con esta información es posible catalogar o clasificar las



Las investigaciones metalúrgicas se orientaron en este sentido y se dirigieron a realizar pruebas sobre el procesamiento de varios minerales de cobre.

Mediante pruebas de lixiviación en pilas, en el nivel de laboratorio simulando las condiciones industriales, se demostró que el uso de la solución de ácido sulfúrico es bastante exitoso para lixiviar óxidos en un tiempo menor a cien días; pero sólo se lixivian cantidades muy pequeñas de sulfuros secundarios y primarios aun en períodos de tiempo mayores. También las investigaciones demostraron que los sulfuros secundarios son solubles en un medio sulfúrico férrico; en tanto los sulfuros primarios, principalmente la calcopirita, requieren períodos de tiempo mayores y una acción bacteriana para ser lixiviados.

Para definir el proceso minero metalúrgico de los minerales de cobre, se emplea como herramienta el método de análisis de cobre secuencial, el cual se basa sobre lo siguiente.

Tal como se aprecia en la tabla siguiente, los distintos minerales de cobre muestran distinto grado de solubilidad en soluciones de ácido sulfúrico y de cianuro. Sobre la base de este comportamiento, se tienen los argumentos que permiten su identificación.

El método consiste en tratar primero una muestra mediante una digestión con ácido sulfúrico, con lo que se disuelve y se obtiene el contenido de cobre como óxido soluble en ácido. Luego, en el remanente de la misma muestra, mediante una digestión con una solución de cianuro de sodio o potasio, se obtiene el cobre contenido en los sulfuros secundarios y la bornita –sulfuro primario-. Finalmente, se efectúa el ensaye del residuo analítico anterior por cobre, que es llamado cobre residual, el cual es mayormente el cobre presente en la calcopirita (sulfuro primario).

Una verificación de que todo el cobre presente en la muestra ha sido detectado y cuantificado mediante este método secuencial es la comparación de la sumatoria del cobre soluble en ácido, el cobre soluble en cianuro y el cobre residual. Esta sumatoria debe ser igual o casi igual al contenido de cobre total de la muestra, determinado mediante el método tradicional.

Zona Mineralógica	Especie Mineral	Composición	H2SO4 Diss %	NaCN Diss %
Oxidos	Atacamita	<b>Cu<sub>2</sub>Cl(OH)<sub>3</sub></b>	100	100
	Azurita	<b>Cu<sub>3</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub></b>	100	100
	Cuprita	<b>Cu<sub>2</sub>O</b>	70	100
	Crisocola	<b>CuO SiO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)</b>	100	45
	Malaquita	<b>Cu<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(OH)<sub>2</sub></b>	100	100
	Cobre Nativo	<b>Cu</b>	5	100
	Tenorita	<b>CuO</b>	100	100
Sulfuros Secundarios	Calcosina	<b>Cu<sub>2</sub>S</b>	3	100
	Covelina	<b>CuS</b>	5	100
Sulfuros Primarios	Bornita	<b>Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub></b>	2	100
	Calcopirita	<b>CuFeS<sub>2</sub></b>	2	7
	Enargita	<b>Cu<sub>3</sub>SbS<sub>4</sub></b>	1	70
	Tetrahedrita	<b>Cu<sub>12</sub>Sb<sub>4</sub>S<sub>13</sub></b>	?	25

Tabla 5: Disolución de las especies Mineralógicas.

La metodología del análisis secuencial se puede establecer de la siguiente forma:

### 4.1.3 Procedimiento analítico usado en el método de análisis secuencial de cobre

Paso	Método
Cobre Total	0.500 g muestra,  Digestión con ácido clorhídrico (HCl), nítrico (HNO <sub>3</sub> ) y perclórico (HCl(p)) , en caliente. La disolución toma 1,5 a 2 horas  Realizar lectura de cobre en la solución.
Cobre soluble en ácido Sulfúrico	0.500 g muestra,  Digestión con ácido sulfúrico usando agitador y temperatura a 25° C por 60 minutos.  Lavar los sólidos y realizar lectura de cobre en la solución.
Cobre soluble en Cianuro de Sodio	Los residuos del paso anterior son  Digeridos con una solución de cianuro de sodio (NaCN) usando agitador y a temperatura de 25° C por 30 minutos.  Lavar los sólidos y realizar lectura e cobre en solución.
Residuo	El residuo sólido obtenido es tratado al igual que en el paso de Cobre total

Tabla 6: Pasos analíticos del método de extracción parcial.

A partir de este tipo de análisis es posible establecer una clasificación, mineralógica, metalúrgica y geológica de alguna zona de estudio en particular, de esta forma se puede establecer lo siguiente:

Paso del Análisis Secuencial	Clasificación Mineralógica	Clasificación Metalúrgica	Clasificación Geológica	
Cobre soluble en Ácido Sulfúrico	Oxidos de Cobre	Lixiviación Ácida	Zona Oxido Acid- Sol/Total >50%	Zona Mixto Soluble Acido, Soluble en Cianuro, o Residuo Total todos iguales a 50%
Cobre soluble en cianuro de sodio	Sulfuros Secundarios	Lixiviación Férrica	Zona Secundaria Cyanide Sol/Total >50%	
Residuo Total	Sulfuros Primarios	Flotación	Zona Prmaria Residuo/Total >50%	

Tabla 7: Paso del análisis y clasificación

Esta clasificación permite evaluar económicamente cual alternativa de procesamiento es rentable dependiendo de las características del cuerpo mineral, o bien establecer la estrategia por parte de la compañía en materia de inversiones.

## 4.2 Aplicación de la Metodología a Nivel Industrial

La técnica de análisis secuencial se ha convertido en una herramienta altamente usada en las operaciones industriales, tanto en la etapa de formulación del proyecto como también en la operación misma, dado que el avance en la explotación de la mina permite obtener información mucho más clara de las características de los futuros y actuales cuerpos mineralizados a procesar. En este sentido es habitual que las operaciones industriales formulen anualmente proyecciones de producción con horizontes de tiempo de dos a cinco años con el objeto de generar el plan de negocios.

Tal como se mencionó anteriormente es posible clasificar geológicamente un cuerpo mineralizado de cobre en función de los resultados del análisis secuencial, en este sentido se muestra la siguiente figura donde se clasifica geológicamente los distintos minerales de cobre a distintos niveles de profundidad de la mina.

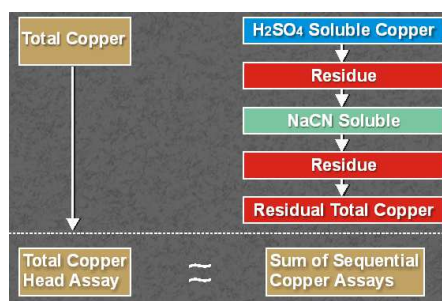


Ilustración 5: Análisis Secuencial de Cobre

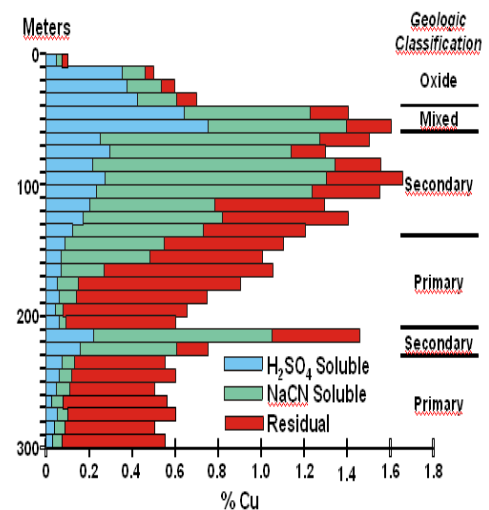


Ilustración 6: Clasificación Geológica

A continuación se presenta esquemáticamente la aplicación del método de análisis secuencial usado para caracterizar algunas operaciones industriales.

#### 4.2.1 BHP Billiton: Minera Escondida Limitada

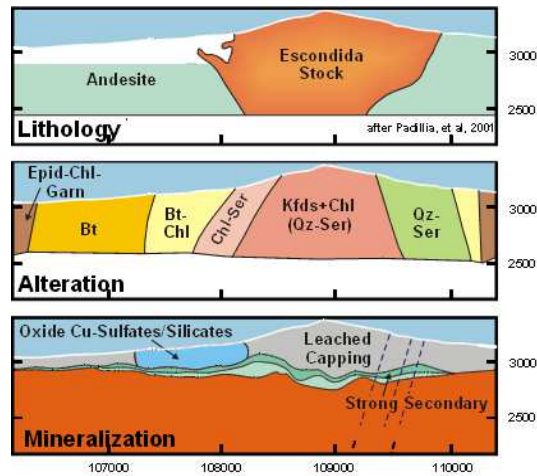


Ilustración 7: Clasificación Minera Escondida Limitada.

#### 4.2.2 Codelco Norte: RADOMIRO TOMIC

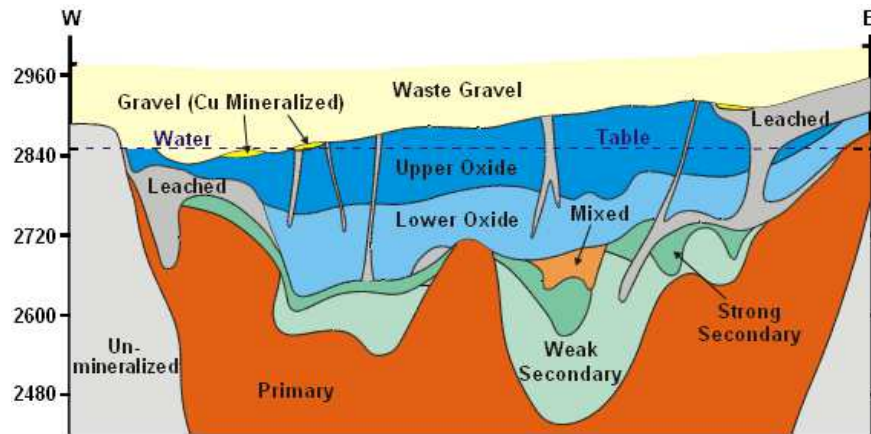


Ilustración 8: Clasificación Mineralógica Radomiro Tomic.

### 4.2.3 Antofagasta Minerals : Los Pelambres

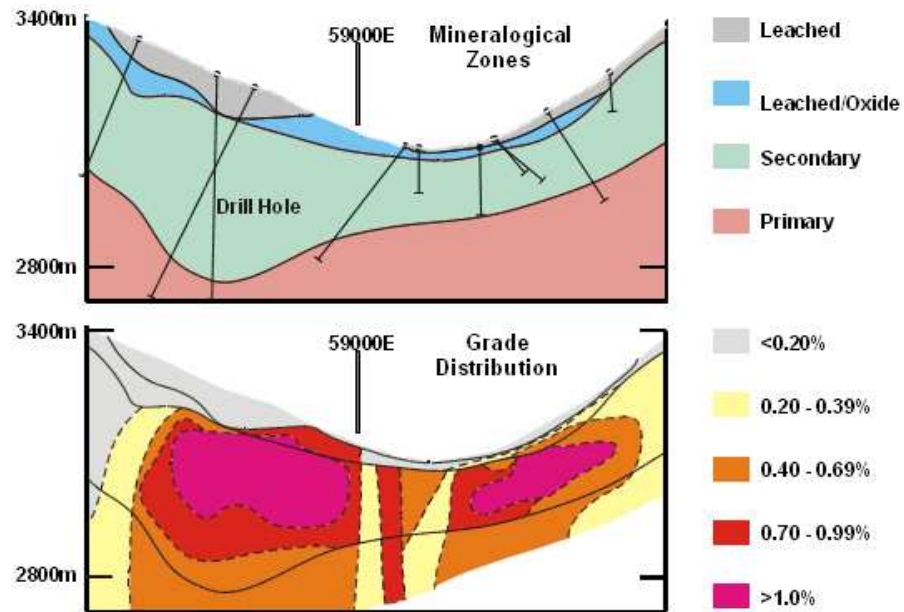


Ilustración 9: Clasificación Mineralógica Los Pelambres.

### 4.2.4 Codelco Norte: Chuquicamata

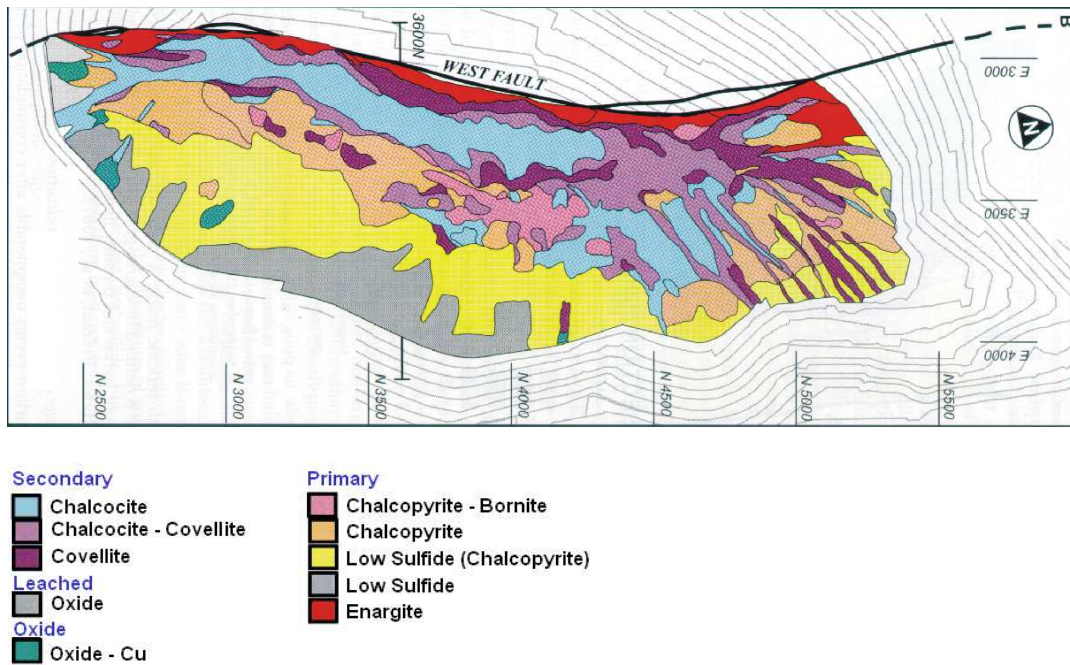


Ilustración 10: Clasificación Mineralógica Chuquicamata.

#### 4.2.5 Southern Perú: La Granja

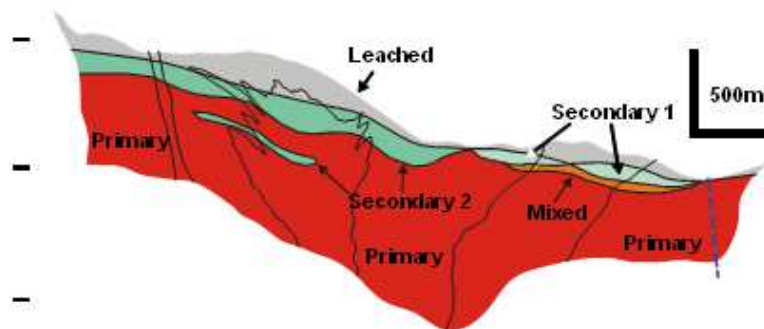


Ilustración 11: Clasificación Mineralógica La Granja.

En síntesis se puede establecer que la metodología de análisis secuencial puede definir la zonificación geológica y metalúrgica en depósitos complejos de cobre y adicionalmente estos pueden ser integrados en el modelo de bloques y usados para definir un apropiado programa de pruebas metalúrgicas.

## 5. Generación de un Modelo de Recuperación

---

La generación de un modelo de recuperación para el proceso de lixiviación requiere de un programa de pruebas donde se caracterice aspectos como:

- Mineralogía.
- Litología.
- Permeabilidad
- Consumo de Ácido.
- Recuperación.

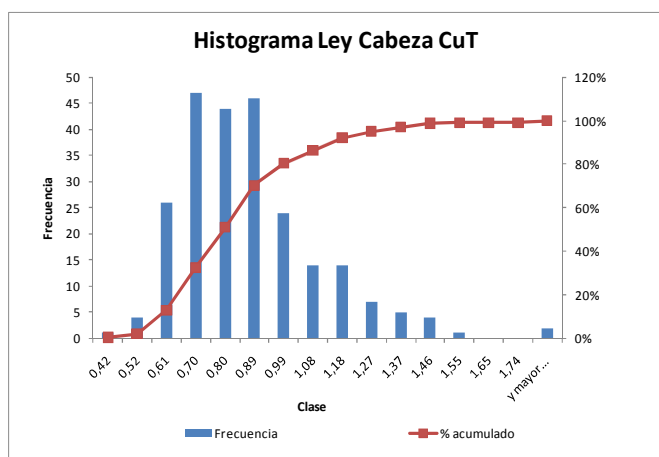
El objetivo de este trabajo es mostrar una técnica simple que permita determinar un modelo de recuperación a través de los resultados obtenidos de las pruebas de lixiviación en columnas a través del método de análisis del cobre secuencial y no se abordarán temas como permeabilidad y consumo de ácido, para demostrar esta técnica se emplearán los datos de 239 pruebas en columna, cuyas características mineralógicas son similares y que fueron testeados de acuerdo a las siguientes condiciones:

Item	Unidad	
Mineralogía		Oxidos Verdes, Sulfuros Secundarios
Tasa de Curado	kg/t	13 – 16
Tasa Riego	l/h/m <sup>2</sup>	8 – 10
Altura Lecho	M	10
Acidez Solución Riego	g/l	15 – 20
Razón de Riego	m <sup>3</sup> /t	1.6
Granulometría P80	mm	17 – 20

Ilustración 12: Características de los minerales testeados

Dado que no es objeto de este estudio demostrar las técnicas de ajuste de las pruebas en columna se emplearan los valores ajustados de recuperación, las leyes de cabeza empleadas en las pruebas son las siguientes:

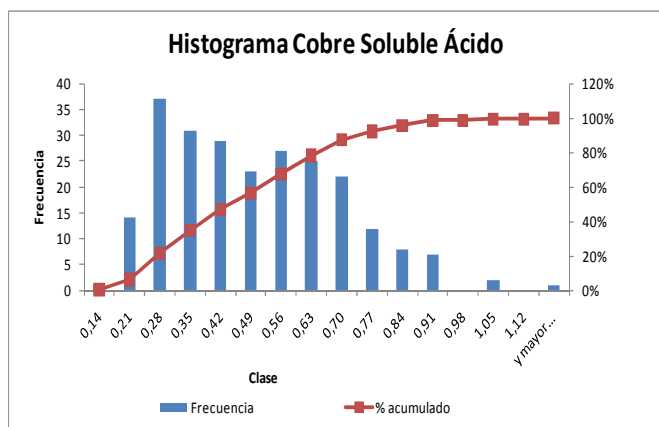
## 5.1 Distribución de Cobre Total en las Leyes de Cabeza



%CuT	
Media	0,833
Error típico	0,015
Mediana	0,797
Moda	0,890
Desviación estándar	0,228
Varianza de la muestra	0,052
Curtosis	2,169
Coefficiente de asimetría	1,214
Rango	1,416
Mínimo	0,422
Máximo	1,837
Suma	199
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,029

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.83%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 3,6.

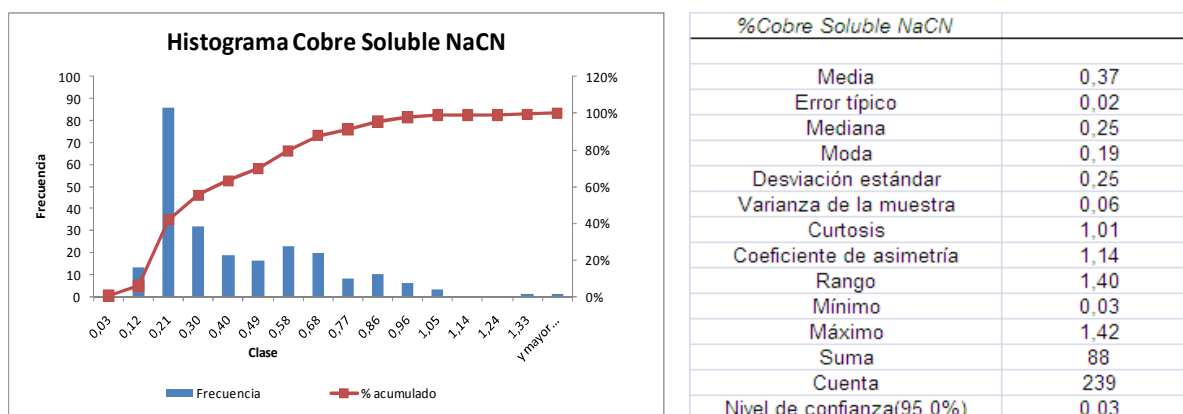
## 5.2 Distribución de Cobre Soluble en Ácido en las Leyes de Cabeza



%Cobre Soluble Ácido	
Media	0.47
Error típico	0.01
Mediana	0.44
Moda	0.26
Desviación estándar	0.20
Varianza de la muestra	0.04
Curtosis	-0.09
Coefficiente de asimetría	0.58
Rango	1.04
Mínimo	0.14
Máximo	1.19
Suma	111
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0.03

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma platicúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.47%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 2,3.

### 5.3 Distribución de Cobre Soluble en Cianuro de Sodio en las Leyes de Cabeza



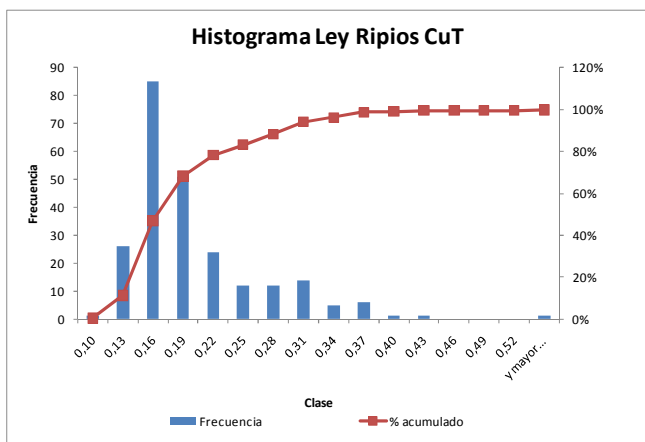
Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.37%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 1,5.

Se puede observar que el rango de ley (CuT) de alimentación se mueve entre valores que van desde 0,42% a 1,84%. Para el caso del cobre soluble los valores de ley van entre 0,14% y 1,19%. En el caso del cobre soluble en cianuro la ley de mineral se encuentra en un rango entre 0,03% y 1,42%.

Para el rango de leyes analizadas se observa que los datos se distribuyen normalmente.

De igual forma el contenido de cobre remanente en las muestras posterior a la realización de las pruebas de lixiviación, fueron los siguientes:

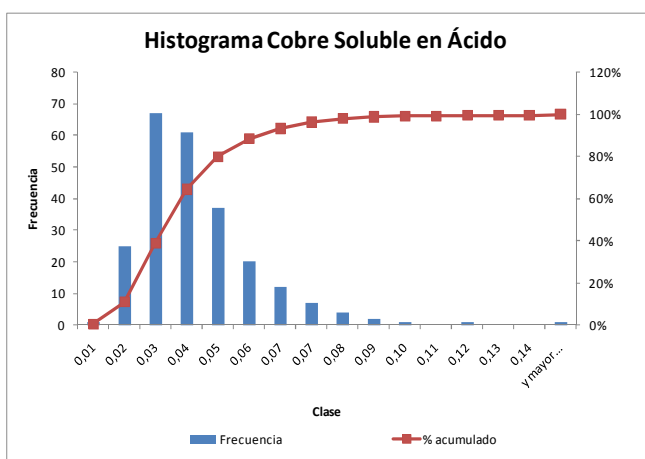
## 5.4 Distribución de Cobre Total en Ripios de Lixiviación



%CuT	
Media	0,187
Error típico	0,004
Mediana	0,166
Moda	0,136
Desviación estándar	0,064
Varianza de la muestra	0,004
Curtosis	4,288
Coefficiente de asimetría	1,784
Rango	0,442
Mínimo	0,103
Máximo	0,545
Suma	45
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,008

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.187%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 2,9.

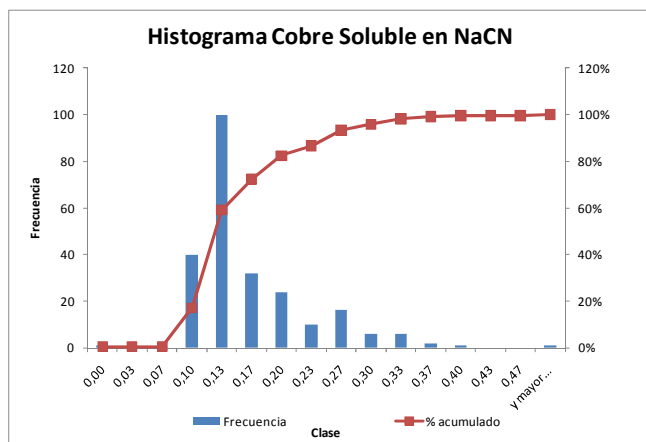
## 5.5 Distribución de Cobre Soluble en Ácido en Ripios de Lixiviación



%Cobre Soluble Ácido	
Media	0,04
Error típico	0,00
Mediana	0,03
Moda	0,04
Desviación estándar	0,02
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	7,29
Coefficiente de asimetría	2,03
Rango	0,13
Mínimo	0,01
Máximo	0,14
Suma	9
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,00

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.04%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 2,0.

## 5.6 Distribución de Cobre Soluble en NaCN en Ripios de Lixiviación



%Cobre Soluble NaCN	
Media	0,15
Error típico	0,00
Mediana	0,13
Moda	0,20
Desviación estándar	0,07
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	3,85
Coefficiente de asimetría	1,73
Rango	0,50
Mínimo	0,00
Máximo	0,50
Suma	36
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,01

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica positiva, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 0.04%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 2,0.

En el caso de las leyes de los sólidos remanentes (ripios) se observa que el rango de leyes se presenta entre 0.10% a 0.55%, mostrándose los datos principalmente distribuidos hacia valores de 0.13%.

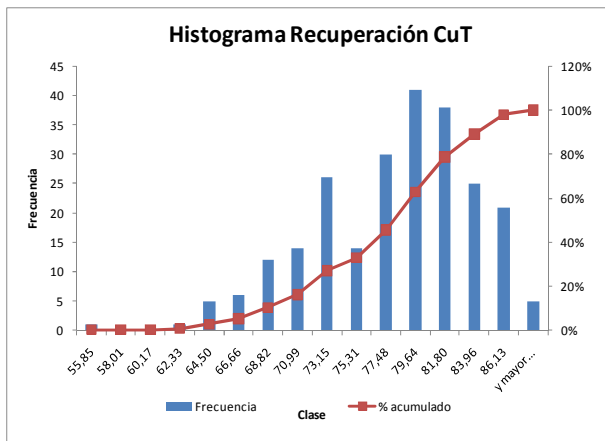
Con esta información es posible calcular la recuperación tanto para el cobre total, soluble en ácido y soluble en cianuro de sodio. La expresión empleada para esta importante variable viene dada por:

$$R = \frac{\text{Ley Cobre Alimentación} - \text{Ley Cobre Ripios}}{\text{Ley Cobre Alimentación}} * 100$$

Esta expresión supone que la variación de la masa es despreciable comparada con la masa total lixiviada posterior al proceso de lixiviación.

Aplicando esta ecuación al set de datos se obtienen los siguientes distribuciones de datos de recuperación tanto para Cobre Total, Soluble en Acido y Soluble en Cianuro.

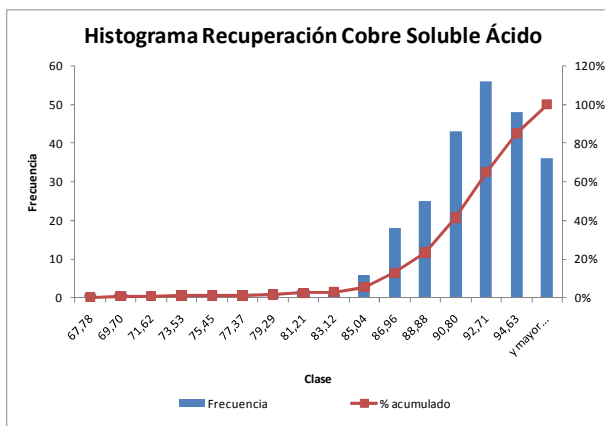
## 5.7 Distribución de Recuperación de Cobre Total



<i>Recuperación Cobre Total</i>	
Media	77,11
Error típico	0,38
Mediana	78,42
Moda	#N/A
Desviación estándar	5,88
Varianza de la muestra	34,62
Curtosis	0,02
Coefficiente de asimetría	-0,62
Rango	32,44
Mínimo	55,85
Máximo	88,29
Suma	18428
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,75

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma mesocúrtica y asimétrica negativa, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 77.11%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 13,1.

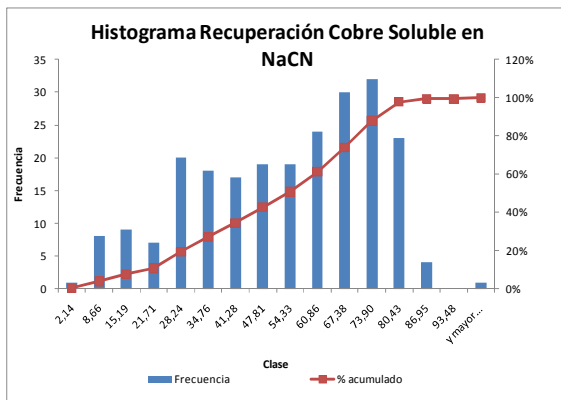
## 5.8 Distribución de Recuperación de Cobre Soluble en Acido



<i>Rec. Cobre Soluble en Acido</i>	
Media	90,90
Error típico	0,26
Mediana	91,49
Moda	#N/A
Desviación estándar	4,09
Varianza de la muestra	16,69
Curtosis	8,30
Coefficiente de asimetría	-2,09
Rango	28,77
Mínimo	67,78
Máximo	96,55
Suma	21726
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	0,52

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma leptocúrtica y asimétrica negativa, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 90.9%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 22,2.

## 5.9 Distribución de Cobre Soluble en NaCN



Rec de Cobre Soluble en NaCN	
Media	49,95
Error típico	1,42
Mediana	53,57
Moda	#N/A
Desviación estándar	21,66
Varianza de la muestra	469,36
Curtosis	-0,81
Coefficiente de asimetría	-0,40
Rango	97,86
Mínimo	2,14
Máximo	95,00
Suma	11587
Cuenta	239
Nivel de confianza(95,0%)	2,80

Se observa que la distribución de los datos se presenta de forma platicúrtica y asimétrica negativa, adicionalmente se observa que la media se encuentra en el orden de 49.9%, el coeficiente de variación de esta distribución es de 2,3.

El modelo de recuperación propuesto, incluye la recuperación de las especies solubles en Ácido (CuSol) y la recuperación de las especies solubles en Cianuro de Sodio (CuIns), finalmente el modelo queda representado de la siguiente forma:

$$\text{Masa} * \text{Rec CuT} * \text{Ley CuT} \\ = \text{Masa} * \text{Rec CuSol} * \text{Ley CuSol} + \text{Masa} * \text{Rec CuIns} * \text{Ley CuIns}$$

Se deprecia el efecto de la pérdida de masa por tal razón es posible simplificar esta variable desde la ecuación

$$Rec\ CuT = Rec\ CuSol * \left( \frac{Ley\ CuSol}{Ley\ CuT} \right) + Rec\ CuIns * \left( \frac{Ley\ CuIns}{Ley\ CuT} \right)$$

La última expresión indica que para conocer la recuperación total de esta unidad Geometalúrgica es necesario determinar primeramente la recuperación tanto de las especies solubles en ácido como solubles en cianuro (Rec CuSol y Rec CuIns). Dada que las características mineralógicas de los minerales probados poseen las mismas características y fueron testeados en condiciones de operación similares es posible establecer que existe una recuperación característica para cada una de estas especies en el amplio espectro de leyes probado, de esta forma se establece lo siguiente:

$$\begin{aligned} Producción\ CuSol_i &= M_i * Rec\ CuSol_i * Ley\ CuSol_i \\ &= M_i * Rec\ CuSol\ Adj * Ley\ CuSol_i \end{aligned}$$

$$Producción\ CuIns_i = M_i * Rec\ CuIns_i * Ley\ CuIns_i = M_i * Rec\ CuIns\ Adj * Ley\ Ins_i$$

Las ecuaciones anteriores con el subíndice “i” representan cada una de las pruebas en columna realizada, con sus características de ley, recuperación y masa. La recuperación con el término “Adj”, indica la recuperación ajustada para el set de datos probado.

Simplificando la masa en ambas ecuaciones es posible linealizar cada una de las ecuaciones estableciendo lo siguiente:

$$Y = Ley\ CuSol_i * Rec\ CuSol_i = Ley\ CuIns_i * Rec\ Ins_i$$

$$X = Ley\ CuSol_i = Ley\ CuIns_i$$

De esta forma en ambas ecuaciones la pendiente de la curva corresponde tanto a la recuperación del cobre soluble en ácido como la recuperación del cobre soluble en Cianuro.

$$Y = \text{Rec CuSol Adj} * X$$

$$Y = \text{Rec CuIns Adj} * X$$

Graficando estas ecuaciones se obtienen los siguientes resultados:

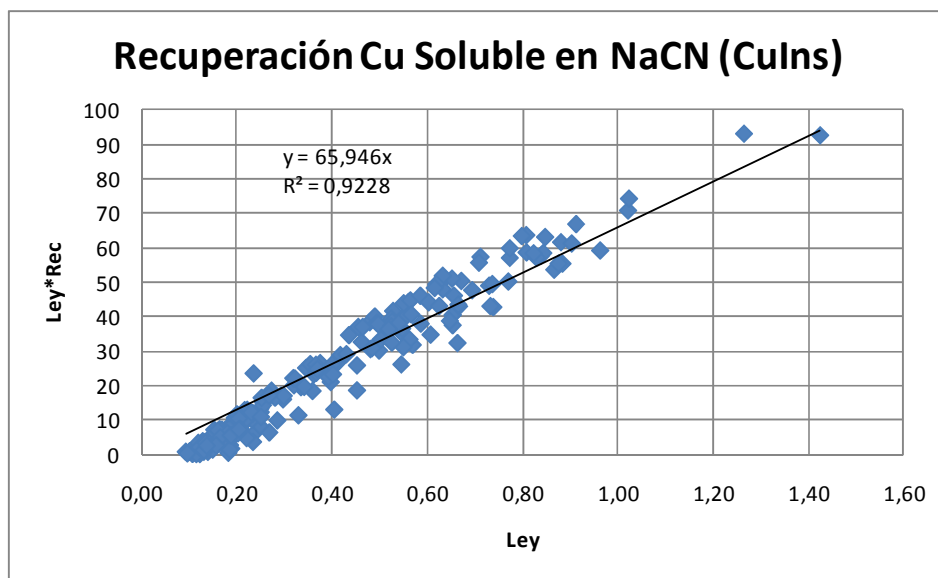
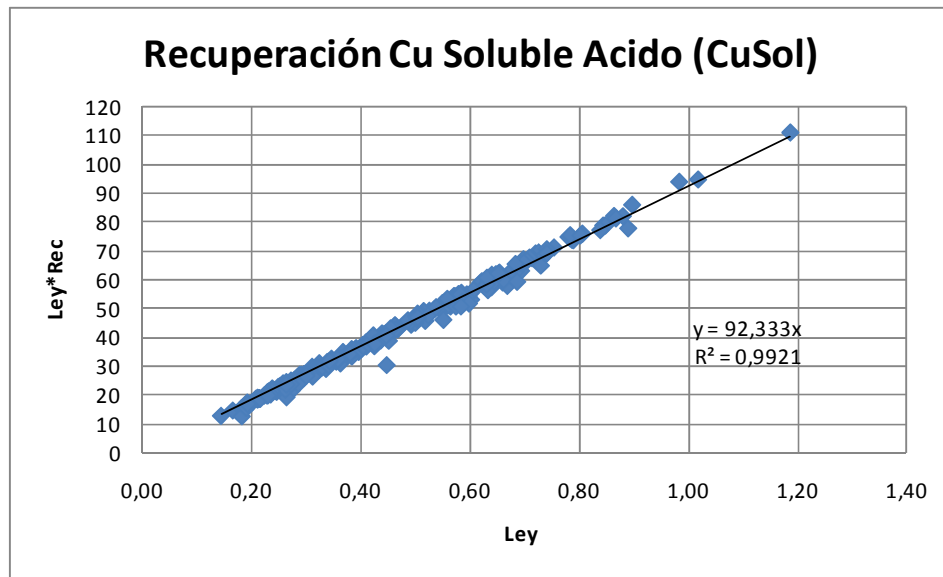


Ilustración 13: Recuperación de Cobre Soluble en NaCN



**Ilustración 14: Recuperación de Cobre Soluble en Ácido**

Los resultados obtenidos al linealizar las ecuaciones indican una recuperación para el cobre soluble en ácido de 92,33% y para el cobre soluble en Cianuro de 65,95%. En ambos gráficos se observan coeficientes de correlación por sobre 0,90 lo que asegura que las expresiones determinadas son capaces de explicar por sobre el 90% de la variabilidad de los datos.

Adicionalmente es posible establecer que para el rango de leyes de cobre soluble en ácido entre 0,14% y 1,19% la recuperación esperada es del orden de 92,33%, para el caso de leyes de cobre soluble en cianuro entre 0,03% y 1,42% la recuperación esperada es del orden de 65,95%. De esta forma la ecuación que modela la recuperación para este bloque Geometalúrgico queda definido de la siguiente forma:

$$Rec\ CuT = 92,33 * \left( \frac{Ley\ CuSol}{Ley\ CuT} \right) + 65,95 * \left( \frac{Ley\ CuIns}{Ley\ CuT} \right)$$

## 6. Análisis Económico

---

El uso de modelos de recuperación y la caracterización geológica permiten determinar al inicio de un proyecto cual es la vía de tratamiento que económicamente entrega el mayor beneficio económico, sin embargo a medida que un proyecto minero va evolucionando es necesario ir comprobando nuevamente el comportamiento metalúrgico de los minerales, puesto que el avance en la explotación minera permite acceder a las muestras de mineral de manera más fácil que al inicio del proyecto y es común también que en algunos casos producto de estrategias gerenciales se realicen cambios en la filosofía de explotación de los minerales. Por esta razón es de suma importancia invertir en programas de pruebas que permitan ir caracterizando la respuesta metalúrgica a medida que el proyecto avanza. En operaciones con un alto grado de estabilidad es común abandonar la práctica de desarrollar este tipo de pruebas y basarse en los resultados históricos obtenidos, no obstante la transición hacia minerales con un mayor grado de alteración, disminución de la granulometría, aumento en la dureza, etc, son problemas comunes que en algún momento pueden impactar fuertemente en los ingresos de la compañía, si no son antes estudiados a través de pruebas. A continuación se mostrará el impacto económico que puede provocar un error en la determinación de la recuperación, la base de cálculo para determinar el impacto económico es lo siguiente:

Item	Unidad	Valor
Mineral Tratado	t/año	18.000.000
CuT	%	0,80
CuSol	%	0,41
Culns	%	0,39
Recuperación CuT	%	79,47
Producción	t/año	114.434
Costo Producción	us/lb	0,77
Precio Cobre	us/lb	3,50

Tabla 8: Características del mineral tratado.

Los valores seleccionados para las leyes, costo de producción y precio del cobre son los valores promedio de la industria, mientras que la recuperación se determinó a través de la ecuación de recuperación determinada anteriormente. El costo de producción y precio del cobre están referidos a cada libra de cobre producido.

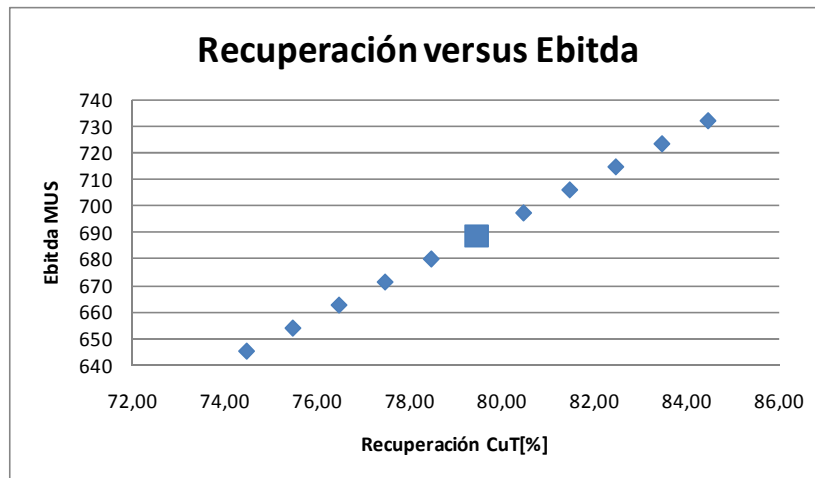
## 6.1 Impacto de la Recuperación en el EBITDA

A continuación se procede a determinar el EBITDA considerando 10 escenarios en los cuales se considera que la recuperación es sobrestimada en un 5% y otro donde la recuperación es subestimada en un 5%, estos escenarios se comparan contra el caso base obteniéndose los siguientes resultados:

Variable	Unidad	Caso -5	Caso -4	Caso -3	Caso -2	Caso -1	C.Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Masa	t	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000
CuT	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
CuSol	%	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
CuIns	%	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Recup CuT	%	84,47	83,47	82,47	81,47	80,47	79,47	80,47	81,47	82,47	83,47	84,47
Producción	ton	121.634	120.194	118.754	117.314	115.874	114.434	115.874	117.314	118.754	120.194	121.634
		5	4	3	2	1	0	1	2	3	4	5
Costo Operación	US/t	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697
Precio	US/t	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714
EBITDA	MUS	732	723	715	706	697	689	697	706	715	723	732
Pérdida	MUS	-43	-35	-26	-17	-9	0	9	17	26	35	43

**Tabla 9: Escenarios EBITDA**

De la tabla anterior se puede observar que para los distintos escenarios el Ebitda bordea entre los 689MUS hasta los 732MUS, el costo de producción empleado en la tabla se encuentra referido a la tonelada de cobre producido, gráficamente se puede establecer la siguiente relación lineal entre Ebitda versus recuperación:



**Ilustración 15: Recupeación Versus EBITDA**

Del gráfico anterior se puede observar que el Ebitda para el caso base es de 689 MUS. En el caso que no se realicen pruebas metalúrgicas y se asuman valores históricos de recuperación es posible que ocurran dos posibilidades, la primera de ellas es la sobrestimación de la recuperación y la segunda es la subestimación de la recuperación.

La sobrestimación de la recuperación genera pérdidas económicas importantes que para el caso de análisis van desde los 9 MUS a los 43 MUS. En el caso de una subestimación de la recuperación las ganancias extras también se mueven en un rango entre los 9MUS y los 43MUS, si bien este último punto es positivo para los ingresos de una compañía minera, también es importante señalar que es probable que se pierdan oportunidades de negocio relevantes como puede ser la generación de contratos de transporte y venta de cátodos, e inclusive en la gestión de los permisos ambientales de producción que por lo general exponen limitaciones a los volúmenes producidos.

## 6.2 Impacto Económico de la Caracterización Geometalúrgica

La realización de pruebas metalúrgicas para la obtención de un modelo geometalúrgico a veces es objetado por el alto costo que este tipo de pruebas puede generar, no obstante al considerar el beneficio económico que este puede entregar en términos de asegurar las ganancias de la compañía, transforma la realización de este tipo de pruebas en una inversión de bajo costo y de gran valor para la compañía minera al momento de generar su futuro plan de negocios. A continuación se procede a calcular el impacto económico de la no realización de pruebas metalúrgicas en el EBITDA de una compañía minera. Estos cálculos se realizarán empleando como caso base las 232 pruebas en columnas realizadas para determinar el modelo de recuperación, de esta forma se tiene lo siguiente:

Variable	Unidad	Valor
N° Pruebas		239
Peso Columna	kg	350
Perforación	kg/m	30
Perforación	US/m	70
Costo Operación	US/prueba	1422
Costo Perforación	US	195.183
Costo Operación	US	339.816
Costo Total	US	534.999

Ilustración 16: Precio de Pruebas

En función a los costos de perforación para la obtención de muestras y los costos asociados al control de las pruebas se puede determinar que el costo total para el caso en estudio es de 534.999 US.

Es probable que el valor anterior parezca excesivo para un set de pruebas, no obstante para el análisis económico a realizar resulta apropiado dado que ejemplifica un caso extremo en términos de caracterización de muestras. En función de esta información se establecen los siguientes cálculos que muestran la pérdida asociada al determinar erróneamente la recuperación bajo cinco escenarios:

Variable	Unidad	C.Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Masa	t	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000	18.000.000
CuT	%	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
CuSol	%	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Culns	%	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39
Recup CuT	%	79,47	80,47	81,47	82,47	83,47	84,47
Producción	ton	114.434	115.874	117.314	118.754	120.194	121.634
Costo Operación	US/t	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697	1.697
Precio	US/t	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714	7.714
EBITDA	MUS	689	697	706	715	723	732
Pérdida	MUS	0	9	17	26	35	43
Pérdida/Costo	US/US		-16	-32	-49	-65	-81

Tabla 10: Evaluación de Escenarios

A partir de la información de los cinco escenarios, se estimo la pérdida asociada por cada dólar que no se invirtió en pruebas, de esta manera se establece que cuando la recuperación se sobrestima un 2% superior al caso base, que se supone es el valor real, es posible determinar que en este caso por cada dólar no invertido en pruebas se genera una pérdida de 32 dólares en el EBITDA, a continuación se grafica esta situación para los cinco escenarios.

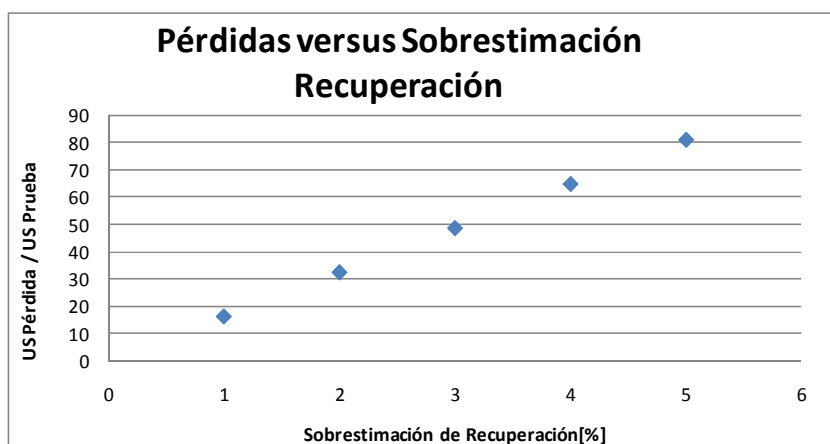


Ilustración 17: Pérdidas por sobrestimación

Para el caso de una sobrestimación del 5% se establece que la pérdida por cada dólar no invertido en pruebas es de alrededor de 81 dólares en el EBITDA.

### 6.3 Variables que Impactan en el EBITDA

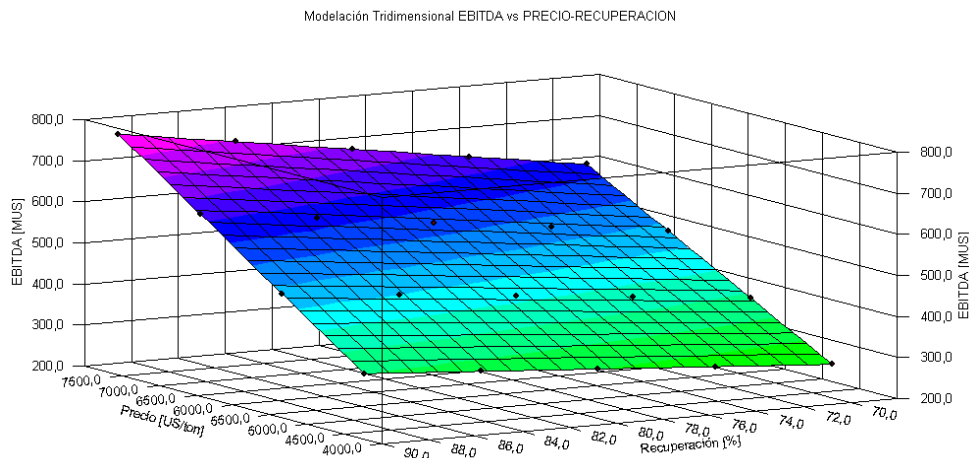
Para el ejemplo estudiado es posible determinar que las ganancias antes de impuesto y amortización se pueden determinar a través de la siguiente expresión:

$$EBITDA = MASA * RECUPERACION * LEY * (PRECIO - COSTO OPERACIONAL)$$

Empleando los valores de masa, ley y costo operacional (expresado en función de las libras de cobre producido) empleado para el caso base, la ecuación anterior queda expresada de la siguiente forma:

$$EBITDA = 0,00144 * Recuperacion * (PRECIO - 1697)$$

La expresión anterior puede ser representada a través de la siguiente superficie:



**Ilustración 18: Relación tridimensional, precio, recuperación Ebitda**

De la superficie anterior se observa que el efecto del precio del cobre es mucho mayor que el efecto de la recuperación (Pendientes), no obstante el tener acotada la variable recuperación permite simplificar un problema multivariable en un problema en el cual sólo la variable precio es significativamente influyente.

Cuando existe un alto grado de conocimiento de la variabilidad del precio como también de la recuperación, es posible obtener valores acotados en las ganancias, esto obviamente permite proyectar de mejor forma el negocio minero y generar las estrategias de acción más efectivas que permitan incrementar las utilidades. A continuación se presenta un gráfico de contorno donde es posible visualizar las distintas combinaciones de precio y recuperación que permiten obtener distintos rangos de ganancia.

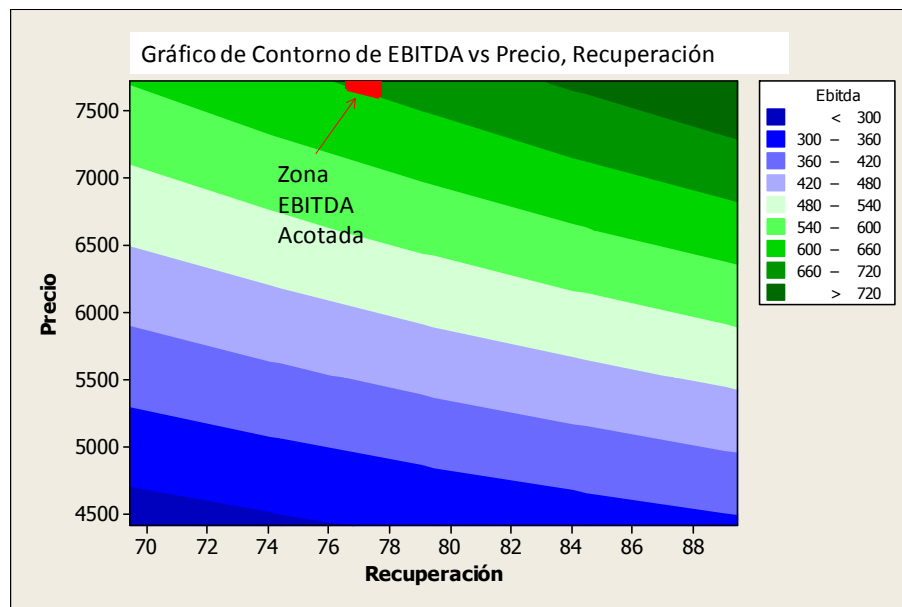


Ilustración 19: Gráfico de contorno

## 7. Conclusiones

---

1. El empleo del análisis secuencial es una técnica ampliamente usada en la industria minera y a través de ella se han caracterizado yacimientos mineros en distintas partes del mundo. Su uso es altamente extendido dado su bajo costo comparado con el uso de microscopía.
2. Dentro de la formulación de modelos de recuperación es posible establecer que existe una técnica simple de análisis que permite determinar a través de correlaciones lineales la recuperación tanto de la parte soluble (óxidos) e Insoluble (Sulfuros) en minerales de cobre.
3. La sobrestimación de la recuperación en un determinado bloque de mineral puede llevar a generar estimaciones erróneas en las ganancias de la compañía, no obstante la inversión en la realización de pruebas metalúrgicas permite minimizar la incertidumbre en la producción y en las ganancias que una operación hidrometalúrgica pueda generar. Para el caso de estudio se pudo estimar que un error en el 5% de la recuperación genera pérdidas de hasta 43 millones de dólares.
4. El poseer un modelo geometalúrgico que permita predecir la recuperación y por ende la producción anual, no sólo permite asegurar una determinada ganancia a los inversionistas, sino que también permite negociar contratos de transporte, adquisición de insumos, acordes a la realidad, existiendo la posibilidad de reducir los costos operacionales.

5. La inversión en pruebas metalúrgicas sólo representa un pequeño impacto en los costos operativos (menor al 0,1%), sin embargo la no realización de estas pruebas puede llevar a perder hasta 81 US por cada dólar no invertido en pruebas.

## 8. Bibliografía

---

- 1 The Sequential Copper Analysis Method Geological, Mineralogical, and Metallurgical Implications, G.A.Parkinson, October 2002.
- 2 Análisis de Cobre por el Método Secuencial como herramienta para definir el modelo minero metalúrgico en Southern Perú Copper Corporation, Vicente Palacios, Berta Arias, Eva Venero, Junio 2005.
- 3 Escondida Partial Extraction Workshop, R.K.Preece, November 2009.
- 4 Apuntes del Curso Análisis de Datos y Métodos Cuantitativos, Magister en Gestión Minera, Octubre 2010.
- 5 Apuntes del Curso Dirección Financiera, Magister en Gestión Minera, Noviembre 2010.
- 6 Apuntes del Curso Dirección Financiera, Magister en Gestión Minera, Noviembre 2010.
- 7 Apuntes del Curso Análisis de Procesos Metalúrgicos, Magister en Gestión Minera, Julio 2009.

## 9. Anexos

Datos N°	Análisis Químico Cabeza Sondaje			Análisis Químico Ripio Sondaje		
	%CuT	%AsCu	%CuSulf	%CuT	%AsCu	%CuSulf
1	0,84	0,18	0,65	0,28	0,03	0,25
2	0,91	0,37	0,55	0,21	0,02	0,19
3	0,87	0,31	0,56	0,16	0,04	0,12
4	0,91	0,26	0,65	0,30	0,02	0,28
5	0,84	0,28	0,56	0,18	0,03	0,15
6	0,98	0,41	0,57	0,28	0,03	0,25
7	0,76	0,53	0,24	0,21	0,03	0,17
8	1,30	0,41	0,88	0,36	0,03	0,33
9	0,72	0,34	0,38	0,15	0,02	0,13
10	0,87	0,47	0,41	0,31	0,04	0,27
11	0,73	0,40	0,33	0,26	0,05	0,22
12	0,54	0,27	0,27	0,24	0,04	0,20
13	0,77	0,31	0,45	0,22	0,03	0,19
14	0,58	0,25	0,34	0,16	0,02	0,14
15	0,53	0,17	0,36	0,15	0,02	0,13
16	0,52	0,29	0,23	0,14	0,02	0,12
17	0,42	0,26	0,16	0,12	0,02	0,09
18	0,47	0,28	0,19	0,16	0,03	0,13
19	0,57	0,24	0,33	0,16	0,03	0,13
20	0,90	0,25	0,65	0,28	0,04	0,25
21	1,29	0,33	0,96	0,41	0,04	0,37
22	0,85	0,24	0,61	0,27	0,02	0,26
23	0,65	0,24	0,41	0,17	0,03	0,14
24	0,88	0,30	0,59	0,23	0,02	0,21
25	0,82	0,27	0,55	0,31	0,02	0,28
26	0,86	0,63	0,23	0,24	0,05	0,20
27	0,97	0,31	0,66	0,37	0,03	0,34
28	0,80	0,35	0,45	0,29	0,02	0,27
29	0,60	0,41	0,19	0,17	0,04	0,13
30	0,59	0,23	0,36	0,19	0,02	0,17
31	0,59	0,35	0,25	0,15	0,03	0,12
32	0,68	0,52	0,17	0,14	0,03	0,11
33	1,02	0,74	0,29	0,24	0,05	0,19
34	0,81	0,56	0,25	0,22	0,06	0,17
35	0,64	0,14	0,50	0,21	0,02	0,20
36	0,69	0,21	0,48	0,20	0,02	0,17
37	1,10	0,23	0,87	0,35	0,02	0,33
38	1,04	0,79	0,26	0,15	0,05	0,10
39	0,57	0,38	0,19	0,18	0,02	0,16
40	0,80	0,55	0,25	0,15	0,03	0,12
41	0,89	0,50	0,38	0,15	0,02	0,13
42	0,83	0,54	0,30	0,17	0,04	0,14
43	0,61	0,26	0,35	0,11	0,02	0,09
44	0,56	0,18	0,38	0,14	0,03	0,11
45	0,54	0,19	0,35	0,13	0,04	0,09
46	0,57	0,20	0,37	0,13	0,03	0,11
47	0,63	0,21	0,42	0,15	0,02	0,13
48	0,65	0,28	0,37	0,16	0,03	0,13
49	1,17	0,46	0,71	0,16	0,02	0,14
50	0,91	0,27	0,63	0,19	0,06	0,13

Datos N°	Análisis Químico Cabeza Sondaje			Análisis Químico Ripio Sondaje		
	%CuT	%AsCu	%CuSulf	%CuT	%AsCu	%CuSulf
51	0,77	0,21	0,56	0,18	0,03	0,15
52	0,61	0,21	0,40	0,17	0,03	0,14
53	0,70	0,26	0,44	0,16	0,07	0,09
54	0,77	0,29	0,48	0,12	0,02	0,10
55	0,68	0,19	0,49	0,11	0,02	0,09
56	0,65	0,19	0,46	0,10	0,02	0,08
57	0,69	0,19	0,50	0,20	0,03	0,17
58	0,98	0,31	0,67	0,20	0,03	0,17
59	1,02	0,31	0,71	0,17	0,01	0,15
60	0,79	0,26	0,53	0,15	0,04	0,11
61	0,74	0,25	0,49	0,15	0,03	0,11
62	0,85	0,32	0,52	0,14	0,01	0,13
63	0,75	0,22	0,53	0,17	0,03	0,14
64	0,73	0,18	0,55	0,17	0,06	0,11
65	0,78	0,23	0,55	0,21	0,03	0,18
66	0,85	0,36	0,50	0,16	0,04	0,12
67	0,70	0,24	0,46	0,16	0,03	0,14
68	0,82	0,25	0,56	0,14	0,02	0,12
69	0,68	0,21	0,46	0,12	0,03	0,09
70	0,89	0,24	0,65	0,17	0,02	0,14
71	0,89	0,26	0,63	0,17	0,02	0,15
72	0,89	0,26	0,63	0,14	0,03	0,11
73	0,77	0,45	0,32	0,15	0,03	0,12
74	0,99	0,37	0,62	0,14	0,02	0,13
75	1,13	0,52	0,62	0,16	0,02	0,13
76	0,84	0,31	0,52	0,17	0,02	0,15
77	0,85	0,29	0,56	0,26	0,03	0,23
78	0,75	0,21	0,54	0,18	0,03	0,16
79	0,82	0,23	0,59	0,15	0,03	0,13
80	0,89	0,32	0,57	0,18	0,02	0,16
81	0,78	0,26	0,52	0,19	0,04	0,15
82	1,27	0,36	0,91	0,28	0,04	0,24
83	1,13	0,33	0,81	0,20	0,03	0,17
84	0,81	0,26	0,55	0,28	0,04	0,24
85	1,03	0,30	0,73	0,28	0,04	0,24
86	1,43	0,55	0,88	0,37	0,05	0,32
87	1,12	0,32	0,80	0,20	0,04	0,16
88	0,92	0,32	0,60	0,19	0,03	0,16
89	0,68	0,19	0,48	0,21	0,04	0,18
90	1,25	0,40	0,85	0,26	0,04	0,22
91	0,76	0,24	0,53	0,23	0,02	0,20
92	0,98	0,29	0,69	0,27	0,05	0,22
93	1,01	0,36	0,65	0,30	0,04	0,26
94	1,84	0,57	1,26	0,36	0,03	0,33
95	1,13	0,36	0,77	0,32	0,05	0,27
96	1,05	0,31	0,74	0,29	0,05	0,24
97	1,29	0,52	0,77	0,23	0,03	0,20
98	1,35	0,70	0,66	0,22	0,03	0,20
99	1,07	0,30	0,77	0,20	0,03	0,18
100	0,97	0,23	0,74	0,34	0,03	0,31

Datos N°	Análisis Químico Cabeza Sondaje			Análisis Químico Ripio Sondaje		
	%CuT	%AsCu	%CuSulf	%CuT	%AsCu	%CuSulf
101	0,61	0,22	0,40	0,22	0,03	0,19
102	1,76	0,34	1,42	0,55	0,05	0,50
103	1,14	0,30	0,84	0,29	0,03	0,26
104	0,97	0,30	0,67	0,27	0,03	0,24
105	1,38	0,36	1,02	0,35	0,03	0,31
106	1,17	0,33	0,84	0,29	0,03	0,26
107	1,22	0,34	0,88	0,29	0,03	0,26
108	1,00	0,27	0,73	0,34	0,03	0,30
109	0,73	0,39	0,34	0,17	0,03	0,15
110	1,22	0,41	0,81	0,25	0,03	0,22
111	1,44	0,42	1,02	0,31	0,03	0,28
112	0,86	0,19	0,67	0,25	0,03	0,23
113	0,62	0,23	0,39	0,20	0,03	0,17
114	0,57	0,38	0,19	0,17	0,05	0,12
115	0,55	0,38	0,16	0,15	0,05	0,10
116	1,00	0,37	0,63	0,23	0,03	0,19
117	1,19	0,36	0,83	0,29	0,04	0,26
118	1,29	0,38	0,90	0,33	0,03	0,29
119	1,27	0,45	0,82	0,28	0,04	0,24
120	0,79	0,55	0,23	0,15	0,03	0,11
121	0,64	0,46	0,18	0,13	0,02	0,11
122	0,76	0,47	0,29	0,16	0,04	0,12
123	0,86	0,68	0,18	0,18	0,04	0,14
124	0,72	0,56	0,15	0,14	0,04	0,10
125	0,98	0,84	0,13	0,15	0,06	0,10
126	0,62	0,44	0,18	0,13	0,02	0,11
127	0,59	0,43	0,17	0,13	0,04	0,10
128	0,65	0,51	0,14	0,14	0,03	0,11
129	0,92	0,78	0,13	0,15	0,04	0,11
130	1,15	0,90	0,25	0,16	0,04	0,13
131	0,92	0,72	0,20	0,14	0,03	0,11
132	0,83	0,73	0,11	0,13	0,03	0,10
133	0,89	0,75	0,14	0,14	0,04	0,10
134	1,11	0,86	0,25	0,17	0,04	0,13
135	1,05	0,88	0,17	0,17	0,06	0,11
136	1,17	0,98	0,18	0,16	0,04	0,12
137	0,73	0,64	0,09	0,11	0,02	0,08
138	0,80	0,59	0,21	0,16	0,04	0,12
139	0,76	0,60	0,16	0,17	0,06	0,11
140	0,49	0,26	0,22	0,14	0,03	0,11
141	0,73	0,56	0,18	0,15	0,03	0,11
142	0,97	0,81	0,16	0,14	0,05	0,09
143	0,89	0,74	0,15	0,13	0,03	0,09
144	0,78	0,65	0,13	0,12	0,03	0,09
145	0,58	0,43	0,15	0,14	0,03	0,11
146	0,93	0,79	0,14	0,15	0,05	0,10
147	1,12	0,87	0,26	0,17	0,05	0,11
148	1,47	1,19	0,28	0,19	0,07	0,12
149	0,63	0,45	0,18	0,17	0,06	0,11
150	0,58	0,39	0,19	0,17	0,03	0,14

Datos N°	Análisis Químico Cabeza Sondaje			Análisis Químico Ripio Sondaje		
	%CuT	%AsCu	%CuSulf	%CuT	%AsCu	%CuSulf
151	0,84	0,71	0,12	0,16	0,04	0,12
152	0,70	0,51	0,19	0,15	0,03	0,12
153	0,60	0,43	0,17	0,20	0,06	0,14
154	0,89	0,73	0,16	0,17	0,06	0,11
155	0,76	0,66	0,10	0,16	0,07	0,09
156	0,69	0,58	0,11	0,16	0,06	0,09
157	0,70	0,56	0,15	0,16	0,05	0,12
158	0,62	0,52	0,10	0,15	0,06	0,09
159	0,62	0,49	0,12	0,14	0,05	0,10
160	0,84	0,69	0,15	0,18	0,06	0,11
161	0,72	0,60	0,11	0,18	0,07	0,11
162	0,89	0,68	0,21	0,16	0,05	0,11
163	0,82	0,64	0,18	0,18	0,06	0,11
164	0,87	0,67	0,20	0,20	0,09	0,11
165	0,74	0,63	0,11	0,17	0,07	0,11
166	0,65	0,50	0,15	0,17	0,05	0,12
167	0,71	0,57	0,14	0,16	0,03	0,13
168	0,80	0,62	0,18	0,13	0,03	0,10
169	0,80	0,62	0,18	0,13	0,03	0,11
170	0,65	0,38	0,27	0,12	0,04	0,09
171	1,07	0,67	0,40	0,22	0,05	0,17
172	0,86	0,64	0,22	0,17	0,05	0,12
173	0,72	0,49	0,23	0,17	0,04	0,13
174	0,69	0,49	0,21	0,13	0,03	0,10
175	1,03	0,73	0,30	0,21	0,08	0,13
176	0,77	0,56	0,21	0,18	0,05	0,13
177	0,76	0,61	0,15	0,18	0,04	0,13
178	0,72	0,56	0,17	0,16	0,04	0,12
179	0,80	0,58	0,21	0,14	0,03	0,12
180	1,45	1,02	0,43	0,21	0,07	0,14
181	0,84	0,63	0,21	0,15	0,05	0,10
182	0,91	0,66	0,25	0,15	0,06	0,09
183	1,10	0,78	0,32	0,13	0,03	0,10
184	1,11	0,89	0,22	0,20	0,11	0,09
185	1,22	0,85	0,37	0,18	0,06	0,12
186	0,69	0,57	0,12	0,15	0,06	0,09
187	0,69	0,52	0,17	0,14	0,05	0,10
188	0,65	0,44	0,20	0,13	0,03	0,10
189	0,64	0,45	0,20	0,13	0,04	0,09
190	0,83	0,50	0,32	0,14	0,04	0,10
191	0,62	0,40	0,22	0,13	0,04	0,09
192	0,56	0,40	0,15	0,11	0,03	0,08
193	0,62	0,40	0,22	0,15	0,03	0,12
194	0,61	0,44	0,17	0,17	0,05	0,12
195	0,75	0,59	0,16	0,18	0,05	0,12
196	0,82	0,65	0,16	0,16	0,03	0,13
197	0,92	0,78	0,13	0,15	0,03	0,12
198	0,64	0,50	0,14	0,13	0,03	0,10
199	0,63	0,50	0,13	0,13	0,03	0,10
200	0,60	0,41	0,18	0,18	0,04	0,14

Datos N°	Análisis Químico Cabeza Sondaje			Análisis Químico Ripio Sondaje		
	%CuT	%AsCu	%CuSulf	%CuT	%AsCu	%CuSulf
201	0,68	0,45	0,24	0,14	0,14	0,00
202	0,69	0,46	0,22	0,21	0,04	0,17
203	0,69	0,58	0,12	0,14	0,03	0,11
204	0,64	0,54	0,10	0,14	0,05	0,09
205	0,70	0,58	0,12	0,13	0,03	0,10
206	0,56	0,42	0,14	0,12	0,02	0,10
207	0,63	0,44	0,19	0,15	0,04	0,11
208	0,48	0,34	0,14	0,15	0,04	0,11
209	0,52	0,36	0,16	0,15	0,03	0,11
210	0,54	0,34	0,19	0,13	0,03	0,10
211	0,66	0,45	0,20	0,11	0,02	0,09
212	0,62	0,43	0,20	0,14	0,05	0,09
213	0,76	0,56	0,20	0,13	0,05	0,08
214	0,73	0,57	0,16	0,16	0,07	0,09
215	0,75	0,59	0,16	0,15	0,06	0,09
216	0,79	0,60	0,19	0,25	0,08	0,17
217	0,73	0,55	0,18	0,27	0,09	0,18
218	0,74	0,56	0,18	0,14	0,02	0,12
219	0,87	0,63	0,23	0,14	0,02	0,11
220	1,07	0,80	0,27	0,14	0,05	0,10
221	0,87	0,69	0,19	0,26	0,09	0,17
222	0,75	0,58	0,17	0,19	0,08	0,12
223	0,90	0,69	0,21	0,13	0,03	0,10
224	1,07	0,84	0,23	0,17	0,07	0,11
225	0,90	0,74	0,16	0,18	0,05	0,13
226	0,58	0,45	0,13	0,16	0,04	0,12
227	0,68	0,54	0,14	0,14	0,03	0,11
228	0,91	0,71	0,20	0,17	0,03	0,14
229	0,84	0,65	0,19	0,16	0,03	0,13
230	0,91	0,70	0,21	0,17	0,04	0,13
231	0,95	0,70	0,25	0,18	0,04	0,14
232	0,89	0,68	0,21	0,16	0,03	0,13
233	0,56	0,42	0,14	0,12	0,02	0,10
234	0,63	0,44	0,19	0,15	0,04	0,11
235	0,48	0,34	0,14	0,15	0,04	0,11
236	0,52	0,36	0,16	0,15	0,03	0,11
237	0,54	0,34	0,19	0,13	0,03	0,10
238	0,66	0,45	0,20	0,11	0,02	0,09
239	0,62	0,43	0,20	0,14	0,05	0,09

## 10. Nomenclatura

Símbolo	Significado
%CuT	: Porcentaje de Cobre Total
Cct	: Calcosina
Cov	: Covelina
Cpy	: Calcopirita.
Cu	: Cobre
CuCN	: Cobre Soluble en Cianuro Sódico
CuFS	: Cobre Soluble en Sulfato Férrico
CuT	: Cobre Total
EBITDA	: Resultado de una empresa antes de intereses, impuestos, cargos diferidos y amortizaciones.
Fe+3	: Ion Férrico
g	: Gramo
h	: Hora
H2SO4	: Ácido Sulfúrico.
HCl	: Acido Clorhídrico
HClO4	: Ácido Perclórico
HNO3	: Ácido Nítrico
kg	: Kilógramo
l	: Litro
Ley	: Porcentaje de un elemento presente en un compuesto sólido
Ley CuIns	: Ley de Cobre Insoluble
Ley CuSol	: Ley de Cobre Soluble
Ley CuT	: Ley de Cobre Total
m <sup>2</sup>	: Metro Cuadrado
m <sup>3</sup>	: Metro Cúbico
mm	: Milímetro
NaCN	: Cianuro Sódico
R	: Recuperación
Rec CuIns	: Recuperación de Cobre insoluble
Rec CuSol	: Recuperación de Cobre Soluble
Rec Cut	: Recuperación de Cobre Total
t	: Tonelada