

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



**CONTROL DE BISMUTO EN LOS CONCENTRADOS DE  
PLOMO Y COBRE DE COMPAÑÍA MINERA MILPO – UNIDAD  
EL PORVENIR**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
METALURGISTA**

PRESENTADO POR:  
PERCY FIDEL ROJAS ADAMA

**LIMA – PERU**

**2011**

## **DEDICATORIA**

A todos los colaboradores que entregaron diversas motivaciones para la culminación de este trabajo que empezó hace tiempo y solo necesitaba de una luz para su ejecución.

## RESUMEN

En el presente informe se muestra un estudio para mejorar el control de bismuto en los concentrados de plomo y cobre producidos en la Compañía Minera Milpo Unidad El Porvenir.

Se analizó y estudió en primera instancia la ocurrencia del bismuto en la tendencia mineral a procesarse en la planta concentradora, encontrándose en el estudio petrográfico que existen 3 minerales a quienes le corresponden el 97% del contenido total de bismuto (Bismutina  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ , Cosalita  $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$  y Bismuto Nativo).

Se evaluaron variables operativas como el grado de molienda, tiempos de flotación, reactivos y otros, que fueron basados en la tendencia mineral a procesarse en la planta concentradora.

Comercialmente las penalidades aplicadas a los concentrados de cobre y plomo por contenidos de Bi, son cada vez mayores y los contratos de comercialización más exigentes.

Los resultados finales, hallados en el estudio, mostraron la factibilidad de controlar el contenido de Bismuto en los concentrados de plomo. Tomando como límite máximo superior a 1.83% (Contenido acumulado a Dic-2010). Estos mismos resultados se validaron a nivel industrial con la aplicación de lo hallado en la investigación.

## SUMMARY

This report shows a study to improve the control of bismuth in lead and copper concentrates produced at “Milpo” Mining Company, “El Porvenir” Unit.

We analyzed and studied in the first instance the occurrence of bismuth ore trend processed in the concentrator, the petrographic study found that there are 3 minerals to those who are 97% of total bismuth (Bismutina  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ , Cosalita  $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$  and bismuth).

Operative variables were evaluated as grinding, flotation time, reagents and others, which were based on the trend in the processed ore concentrator plant.

Commercially the penalties applied to copper and lead concentrates by Bi contents, are increasing and demanding marketing contracts.

The final results, found in the study showed the feasibility of controlling the content of bismuth in lead concentrates. On the upper limit to 1.83% (Content accrued December-2010). The same results were validated on an industrial scale with the application of the research found.

## NOMENGLATURA

UNIDAD	SIMBOLO
Bismuto	Bi
Plomo	Pb
Zinc	Zn
Cobre	Cu
Plata	Ag
Cabeza	Cab.
Concentrado	Conc.
Coefficiente de correlación	S
Coefficiente de normalidad Anderson-Darling	P
Etapa de flotación rougher	Ro
Etapa de flotación scavenger	Scv
Relave	Rve
Tiempo	T
Potencial de hidrogeno.	pH
Horse power	HP
Kilowatt	Kw
Gramos por tonelada métrica	gr/ton
Tonelada métrica por día	TMPD
Dólares por kilogramo	\$US/Kg
Kilowatt por hora	Kw-hr
Tamaño de partícula con 80% pasante.	D <sub>(80)</sub>
Porcentaje en peso, pasante a 74 micras.	%
Valor de la tabla estadística student	t-student

## INDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES	
1.1. Planteamiento del problema	16
1.1.1. Descripción del problema	16
1.2. Hipótesis	17
1.2.1. Hipótesis operativa	17
1.2.2. Variables	17
1.3. Objetivo	17
1.3.1. Objetivo Fundamental	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Justificación de la investigación	18
1.5. Metodología de la investigación	19
1.6. Marco teórico	19
1.7. Antecedentes generales	20
1.8. Antecedentes de la investigación	21
CAPITULO II: MODELO PROPUESTO	
2.1. Metodología de la investigación	23
2.1.1. Identificación del problema	23
2.1.2. Diseño de la investigación	24
2.1.3. Análisis del fenómeno	24
2.1.4. Tipo de Investigación	26
2.1.5. Finalidad de la Investigación	27
2.1.6. Propósito del control del grado de remolienda en el proceso de flotación bulk	27
2.1.7. Posibles causas que originan el mayor contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre	27
2.1.8. Planteamiento de alternativas de solución	31

### CAPITULO III: VALIDACIÓN DEL METODO

3.1. Caracterización del material en estudio	35
3.2. Pruebas de laboratorio para evaluar las Alternativas de solución	35
3.2.1. Estudio mineralográfico de los concentrados Pb y Cu	35
3.2.2. Pruebas metalúrgicas variando condiciones de operación (remolienda)	42
3.2.3. Pruebas de flotación para distintos grados de molienda	48
3.2.4. Pruebas de concentración de bismuto	53
3.2.4.1. Pruebas de concentración de bismuto variando la dosificación del depresor RCS	53
3.2.4.2 Pruebas de concentración de bismuto variando el pH	56
3.2.4.3. Pruebas de concentración de bismuto usando colectores afines al bismuto como el ester de xantato	57
3.2.4.4 Pruebas de exploración para flotación inversa Pb-Cu	58

### CAPITULO IV: ANALISIS COSTO BENEFICIO

4.1. Valorización del ahorro por control de bismuto En el concentrado de plomo	62
4.2. Valorización del ahorro por menor consumo de aceros	63
4.3. Valorización del ahorro por menor consumo energía	64

### CAPITULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Evaluación de los resultados	66
-----------------------------------	----

CONCLUSIONES	71
--------------	----

BIBLIOGRAFIA	73
--------------	----

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla N° 2.1. Correlación entre el Bi y los otros metálicos de importancia metalúrgica en los resultados 2010. (Pág. 32)

Tabla N° 3.1. Minerales conteniendo Bi en el concentrado de plomo. (Pág. 36)

Tabla N° 3.2. Ensayes comunes en los concentrados de cobre, plomo y bulk de las muestras para estudio. (Pág. 36)

Tabla N° 3.3. Análisis modal de las muestras ensayadas en el estudio. (Pág. 37)

Tabla N° 3.4. Liberación de minerales asociados al Bi. (Pág. 38)

Tabla N° 3.5. Procedimiento a seguir para las pruebas metalúrgicas. (Pág. 42)

Tabla N° 3.6. Análisis químico valorado para la alimentación y relave de la prueba de flotación bulk. (Pág. 43)

Tabla N° 3.7. Parámetros y dosificación de reactivos para las pruebas de flotación. (Pág. 46)

Tabla N° 3.8. Leyes de bismuto en los resultados metalúrgicos de las pruebas de flotación experimental, estándar versus mayor grado de molienda. (Pág. 47)

Tabla N° 3.9. Procedimiento a seguir para las pruebas de flotación para diferentes tiempos de molienda (distintos grados de liberación del mineral). (Pág. 48)

Tabla N° 3.10. Balances metalúrgicos de las pruebas de flotación, para los diferentes tiempos de molienda. (Pág. 49)

Tabla N° 3.11. Variación de las leyes y recuperaciones de Bi, para los diferentes tiempos de molienda. Se observa que para un mayor tiempo, hay mayor recuperación y mayor ley en las espumas de la flotación bulk. (Pág. 50)

Tabla N° 3.12. Análisis de resultados de cada fracción o tamaño, obtenido para el relave de cada prueba de flotación. (Pág. 51)

Tabla N° 3.13. Análisis granulométrico de los relaves finales de las pruebas de flotación, donde se observa el % -m200 de cada muestra final. (Pág. 52)

Tabla N° 3.14. Balances metalúrgicos para las diferentes pruebas de concentración de bismuto, variando la dosificación de RCS. (Pág. 54)

Tabla N° 3.15. Balances metalúrgicos para las diferentes pruebas de concentración de bismuto, variando el pH. (Pág. 56)

Tabla N° 3.16. Balances metalúrgicos para las diferentes pruebas de concentración de bismuto, variando la dosificación del colector ester de xantato. (Pág. 57)

Tabla N° 3.17. Balance metalúrgico para la flotación inversa de separación Pb-Cu. Las leyes de concentrados Pb y Cu, alcanzaron valores aceptables. (Pág. 58)

Tabla N° 3.18. Cuadro de dosificaciones de cianuro, para una concentración de 3%. El total de cianuro requerido está por encima de 166.6 gr/tm de mineral tratado. (Pág. 59)

Tabla N° 4.1. Análisis químico valorado a los diferentes tamaños granulométricos hallados para el relave de la flotación bulk (muestra industrial). (Pág. 61)

Tabla N° 4.2. Resultados reales de la concentración de Pb, durante el año 2010 y el periodo de estudio 2011 en la planta concentradora El Porvenir de la Cía. Minera Milpo S.A.A. (Pág. 62)

Tabla N° 4.3. Referencia diferenciada de la penalización por contenido de bismuto obtenido entre el 2010 y 2011. (Pág. 63)

Tabla N° 4.4. Cálculo de ahorro por menor consumo de aceros en la remolienda bulk, para el tonelaje tratado hasta agosto del 2010. Un total de 1'742,129 toneladas de mineral. (Pág. 64)

Tabla N° 4.5. Cálculo de ahorro por menor consumo de energía en la remolienda bulk, por la parada del molino de remolienda bulk que tiene una potencia de 100 HP y 77.7 Kw de consumo energético. (Pág. 64)

## **LISTADO DE FIGURAS**

Figura N° 1.1. Diagrama del planteamiento del problema. (Pág. 17)

Figura N° 1.2. Evolución anual del contenido de Bi en los concentrados de plomo. (Pág. 21)

Figura N° 2.1. Metodología PDCA (Pág. 23)

Figura N° 2.2. Flujograma de trabajo PDCA. (Pág. 25)

Figura N° 2.3. Análisis de resultados metalúrgicos por guardias – 2010. (Pág. 26)

Figura N° 2.4. Flujograma de planes, acciones y ejecución del trabajo PDCA. (Pág. 28)

Figura N° 2.5. Variación anual de la ley de Bi en el mineral tratado. (Pág. 29)

Figura N° 2.6. Regresión Pb-Bi para la dispersión anual (2010) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos. (Pág. 30)

Figura N° 2.7. Regresión Ag-Bi para la dispersión anual (2010) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos. (Pág. 31)

Figura N° 2.8. Leyes de cabeza (Ag, Pb, Zn y Cu) en el tratamiento anual (2010). (Pág. 33)

Figura N° 2.9. Tamaño de partícula  $D_{(80)}$  para los concentrados Pb-Cu. (Pág. 33)

Figura N° 3.1. Distribución en peso de las menas y gangas en el concentrado de Cu. Mineralógicamente, se tiene como mena a la calcopirita y tetraedrita como menas y la esfalerita, galena, pirita y bismutinita como gangas principales. (Pág. 39)

Figura N° 3.2. Rango de liberación por tamaño de partícula para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el concentrado de cobre. (Pág. 39)

Figura N° 3.3. Porcentaje de liberación para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el estudio del concentrado de cobre. (Pág. 40)

Figura N° 3.4. Distribución en peso de las menas y gangas en el concentrado de Pb. Mineralógicamente, se tiene como mena a la galena y bournonita como menas y la esfalerita, pirita, calcopirita, bismutinita y cosalita como gangas principales. (Pág. 40)

Figura N° 3.5. Rango de liberación por tamaño de partícula para los minerales que contienen bismuto (bismutinita y cosalita), presentes en el concentrado de plomo. (Pág. 41)

Figura N° 3.6. Porcentaje de liberación para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el estudio del concentrado de plomo. (Pág. 41)

Figura N° 3.7. Leyes de bismuto contenidas en las diferentes mallas granulométricas para la alimentación y relave de la prueba de flotación bulk. (Pág. 43)

Figura N° 3.8. Distribución de Bi contenido en cada fracción de mallas granulométricas, para el alimento y relave de la prueba de flotación bulk. (Pág. 44)

Figura N° 3.9. Comportamiento experimental de la liberación Ag-Bi en la flotación bulk. (Pág. 45)

Figura N° 3.10. Comportamiento experimental de la liberación Ag-Bi en la flotación bulk. (Pág. 45)

Figura N° 3.11. Determinación de la moliendabilidad del mineral de bismuto para las pruebas de flotación estándar y mayor grado de molienda. (Pág. 47)

Figura N° 3.12. Comportamiento del Bi en las espumas de la flotación experimental bulk. (Pág. 50)

Figura N° 3.13. Variación de los contenidos acumulados retenidos de Bi en el relave final de cada prueba de flotación (3 min, 5 min, 7 min y 9 min). (Pág. 51)

Figura N° 3.14. Porcentaje -m200 halladas en las muestras de relave, de las pruebas de flotación bulk. (3 min, 5 min, 7 min y 9 min). (Pág. 53)

Figura N° 3.15. Leyes de bismuto obtenidos en las espumas y relave de las pruebas de concentración de Bi, variando la dosificación de RCS. (Pág. 55)

Figura N° 3.16. Recuperación de bismuto en las espumas y relave de las pruebas de concentración de Bi, variando la dosificación de RCS. (Pág. 55)

Figura N° 3.17. Variación de pH desde 8 hasta 11 para realizar la flotación de muestras del concentrado de Pb obtenido en el circuito de separación Pb-Cu. (Pág. 56)

Figura N° 5.1. Regresión Pb-Bi para la dispersión anual (2011) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos. (Pág. 67)

Figura N° 5.2. Gráfica de cajas, que permite diferenciar los datos, respecto de las posiciones de referencia, para determinar en la población la concentración de datos, respecto de la mediana, 1er cuartil y 3er cuartil. (Pág. 68)

Figura N° 5.3. Resumen gráfico de los resultados estadísticos, realizados al análisis de datos (ley de bismuto contenida en el concentrado de plomo), para todos los ensayos químicos del concentrado de Pb obtenido en el 2010. (Pág. 68)

Figura N° 5.4. Resumen gráfico de los resultados estadísticos, realizados al análisis de datos (ley de bismuto contenida en el concentrado de plomo), para todos los ensayos químicos del concentrado de Pb obtenido en el 2011. (Pág. 69)

Figura N° 5.5. Análisis de resultados metalúrgicos por guardias – 2011. (Pág. 70)

Figura N° 5.6. Comparación de la evolución de la reducción de defectos por año. (Pág. 70)

## INTRODUCCIÓN

La Compañía Minera Milpo S.A.A. es una empresa minera peruana que continuamente se propone llevar a cabo el desarrollo de Proyectos que buscan mejorar los niveles de producción. La búsqueda de nuevas alternativas de trabajo para poder orientar los resultados al cumplimiento de sus objetivos planeados a nivel empresarial, fue estableciendo un planeamiento estratégico con el objetivo de incrementar el volumen de tratamiento de mineral hasta 5000 TMPD.

Este planeamiento comprendía un completo análisis, con la finalidad de determinar las condiciones existentes, los recursos y las capacidades del medio, así como prever los efectos y consecuencias de la realización de las alternativas de trabajo. El planeamiento no aportó algunos elementos necesarios para una correcta operación y optimización de las alternativas de trabajo, de tal manera que se fue evidenciando, de acuerdo a lo planeado, que la profundización disminuía la ley de plomo de 0.93 a 0.57% e incrementaba la ley de cobre de 0.29 a 0.34%. Asimismo, no consideró el incremento de la ley de cabeza de Bi en el mineral extraído en la mina y tratado en la planta concentradora. Las asociaciones mineralógicas del Bi con el Pb y Ag, se fueron dando proporcionalmente conforme se incrementaban los tonelajes de tratamiento.

Consecuentemente, el contenido de Bi en los concentrados de Cu y Pb, fueron variando desfavorablemente a los fines de comercialización que se manejan actualmente en la unidad minera El Porvenir.

## **CAPITULO I**

### **ASPECTOS GENERALES**

#### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.1.1. Descripción del problema**

La compañía minera MILPO S.A.A. es una empresa que tiene la Unidad Minera El Porvenir, con una línea de producción de 3 tipos de concentrados (Cobre, Plomo y Zinc).

A lo largo del tiempo, el tratamiento de mineral ha tenido algunas variaciones muy importantes en el aspecto operativo. Las leyes de mineral alimentado a la planta fueron disminuyendo tanto para el Pb y Zn, mientras que la ley de Cu se ha mantenido con un ligero incremento. El proceso de flotación con menores leyes de Pb y Ag, favoreció negativamente, una mejor recuperación de Bi, elemento metálico que ha evidenciado un incremento importante y preocupantemente contenido en los concentrados de Pb y Cu.

En el presente estudio, se enfoca el problema de la reducción y control del contaminante Bi en los concentrados metalúrgicos de plomo y cobre; y se formula las siguientes preguntas de investigación:

¿Cuáles son las condiciones determinantes en el proceso para la reducción y control del Bi en los concentrados metalúrgicos de plomo y cobre por flotación?



**Figura N° 1.1.** Diagrama del planteamiento del problema.

## 1.2. HIPOTESIS

“El control granulométrico de la remolienda bulk permitirá la disminución y control de Bi en los concentrados de Pb, permitiendo un método viable técnicamente y de bajo costo”

### 1.2.1. Hipótesis operativa

“Las condiciones del proceso para reducir y controlar el Bi, están determinados principalmente por el control granulométrico en la remolienda bulk”

### 1.2.2. Variables:

- **Dependiente:** Contenido de bismuto.
- **Independiente:** Grado de liberación en los productos mixtos e intermedios de la flotación bulk.

Concentración de Bi = Función (Grado de liberación en la flotación bulk)

## 1.3. OBJETIVO

### 1.3.1. Objetivo Fundamental

Controlar el contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre, producidos en la Compañía Minera Milpo S.A.A.

### 1.3.2. Objetivos específicos

Adicionalmente, el presente trabajo de investigación presenta los siguientes objetivos trazados:

- a. Disminuir y controlar el contenido de bismuto en el concentrado de plomo, sin afectar el grado del concentrado y su recuperación.
- b. Favorecer en la separación cobre – plomo, el incremento del desplazamiento de bismuto al concentrado de cobre, por tener menor deducción y mayor rango de variación a la penalidad aplicable en su contrato de comercialización.
- c. Evaluar otros factores que intervienen en el proceso y su viabilidad técnica optimizando las variables determinantes.
- d. Optimizar el costo operativo, por menor consumo de energía, reactivos y otros suministros.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El estudio comprende temas de importancia para el desarrollo de la empresa minera, tanto en el aspecto técnico y económico.

El desarrollo del presente estudio de investigación está orientado a disminuir el contenido de bismuto en los concentrados de cobre y plomo, mediante la implementación de alternativas aplicadas al proceso productivo, cuyo análisis costo/beneficio haya determinado un mayor ingreso atractivo, para mejorar el margen económico alcanzado por la comercialización de los concentrados producido en la compañía minera.

Es conocido que, el contenido de bismuto en los concentrados es mayormente controlable por lixiviación. Sin embargo, la implementación de estos procesos requiere de inversiones muy altas y también de mayor costo de operación por el uso de reactores autoclaves y altas temperaturas, además de los riesgos de seguridad y medio ambiente asociados a estos procesos.

Los procesos de flotación son menos costosos, y su comportamiento típico puede modificarse si el proceso se enfoca sobre el procesamiento de cada especie

mineralógica y no sobre elementos químicos. Es así que, se pueden obtener distintos resultados variando los parámetros operativos del proceso de flotación. Parámetros que en muchos casos no implican mayores gastos o inversiones, tales como la liberación, cinética de flotación y tipos de agentes tenso-activos (colectores, modificadores y otros).

No cabe duda que la investigación permitirá encontrar alternativas para tratar el complejo problema de control del bismuto en los concentrados de cobre y plomo, de manera que el proceso de flotación con las nuevas variables operativas obtenidas, permita obtener una disminución al menor contenido posible en los concentrados a comercializar.

### **1.5. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN**

El estudio sigue un análisis experimental con pruebas de laboratorio que demuestran la factibilidad de reducir y controlar el contenido de bismuto en los concentrados de Pb, mediante la eliminación de la remolienda en el circuito de flotación bulk.

Mediante esta propuesta tenemos la certeza de disminuir y controlar la presencia del contaminante bismuto (Bi), en los concentrados de Pb producidos en la Compañía Minera Milpo S.A.A. El contenido de Bi en los concentrados de Pb deberían ser menores a 1.83%

### **1.6. MARCO TEORICO**

Es importante explicar las características del Bi y su comportamiento, los cuales permiten conocer las ventajas y desventajas para la aplicación de la metodología de control en la flotación bulk. En este estudio vemos al Bi como un elemento contaminante y altamente penalizable en el concentrado de plomo, también se describe las características y el comportamiento de la flotación bulk a diferentes

grados de molienda y liberación. Por lo tanto en este capítulo abarcamos las nociones teóricas que corresponde al tema en estudio.

### **1.7. ANTECEDENTES GENERALES**

La producción de minerales de bismuto cesó a finales de la década de los 60's, con el cierre de las ultimas explotaciones en Perú, Alemania, Asia central, Canadá, España, Bolivia y Australia.

Durante esos años el Perú se situó en el primer lugar del mundo en la producción de bismuto, por la explotación de los grandes yacimientos de cobre del tipo pirita que tenían bismuto, y se ubicaban en Cerro de Pasco.

Con el tiempo el procesamiento de minerales estaba determinado para minerales valiosos específicos (posibles mezclas de minerales), por otros elementos de interés comercial (plata, oro o metales del grupo platino) y varios componentes menores que representaban un importante riesgo para el medio ambiente, la salud y seguridad laborales, como arsénico, bismuto, selenio, cadmio, etc. Que también indican la forma de procesamiento.

Muchos productores de concentrados fueron recibiendo cada vez menores montos por la comercialización de sus productos, debido a las penalidades por impurezas o elementos no deseables en sus productos finales (contaminantes como azufre, arsénico, antimonio o bismuto), que dependen de las fundiciones y refinерías, que castigan al productor.

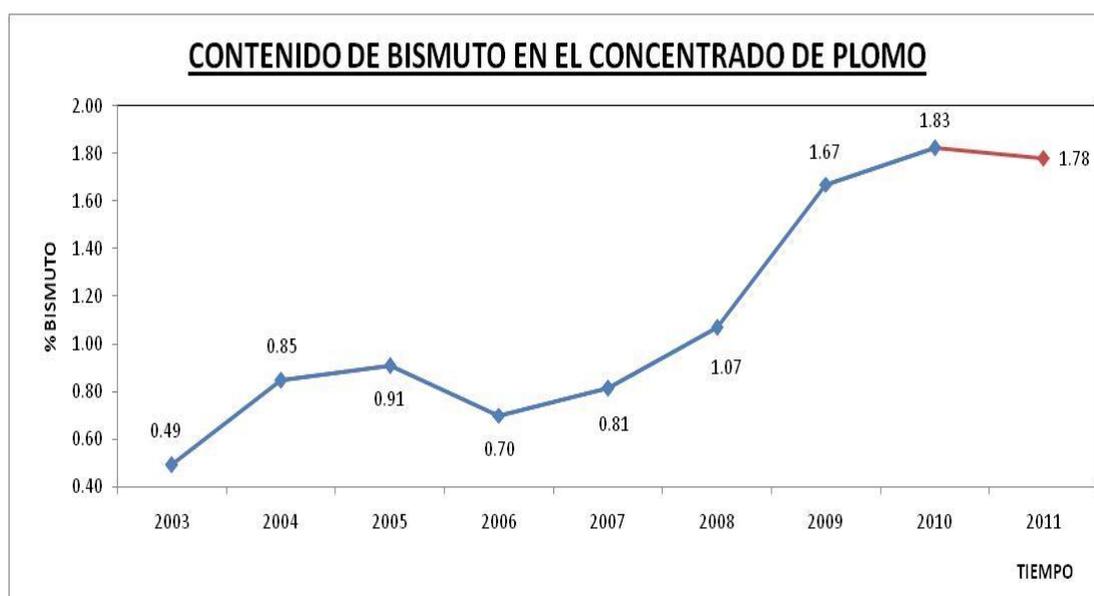
En la actualidad, la mayor parte de la producción mundial de bismuto se obtiene como coproducto del refino metalúrgico de minerales de plomo o cobre, o también, aunque en menor medida, de los de wolframio, molibdeno y estaño.

Las tendencias mineralógicas de la explotación de minerales es cada vez más decreciente en las leyes de los minerales de plata, plomo, cobre y zinc. Asimismo, estas características están incorporando un nuevo reto para el éxito de yacimientos de baja ley de minerales, puesto que, la selectividad de los elementos metálicos flotables es cada vez menor, haciéndose evidente la necesidad de identificar las diversas técnicas de ingeniería, para lograr un menor contenido de elementos contaminantes, como el bismuto, en forma dinámica, y de ese modo obtener una ventaja económica, cumplir con las normas ambientales vigentes y proveer un lugar de trabajo seguro.

Las compañías mineras están experimentando importantes avances en el desarrollo de innovaciones en sus procesos, adaptando variables, que pueden ser el punto de partida, aplicable a los futuros proyectos.

### 1.8. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

La producción de concentrados de Cu y Pb en la UM El Porvenir, empezó a evidenciar mayores leyes de Bi en sus contenidos a partir del año 2008.



**Figura N° 1.2.** Evolución anual del contenido de Bi en los concentrados de plomo

El monitoreo del contenido de bismuto en el concentrado de plomo, durante el 2009 y 2010 alcanzaron los más altos valores, una tendencia a mayores incrementos y al mismo tiempo una gran preocupación por las mayores penalidades aplicables en la comercialización del concentrado.

Esta desviación captó una gran atención de la gerencia corporativa, comercial y operativa.

Se convirtió en un problema que requería un tratamiento especial, para el cual se planteó el método PDCA.

Se definió al incremento de la ley de Bi en los concentrados de plomo y cobre como el problema “el resultado indeseable”.

## CAPITULO II

### MODELO PROPUESTO

#### 2.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El origen de la investigación tiene un carácter operacional, por lo tanto, la metodología de investigación, debe estar alineada a las directrices de la alta administración, definiendo al método PDCA, como el método de gestión en la investigación y como el punto de partida para hallar las posibles causas del problema, establecer un plan de acción, realizar el seguimiento, verificación y tratamiento del desvío.



Figura N° 2.1. Metodología PDCA

##### 2.1.1. Identificaci3n del problema

La identificaci3n se realiz3 en base a las estadísticas anuales del contenido de bismuto en el concentrado de plomo y descubrir el origen del problema se convirti3 en la prioridad. Sin embargo, el principal objetivo planteado fue controlar el

contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre producidos en el proceso.

Según las condiciones de operación que se fueron presentando a lo largo del tiempo, se estableció que primeramente deberíamos mantener los resultados alcanzados. Es decir asegurar que el contenido acumulado de bismuto en el concentrado de plomo después del 2012, no debería exceder de 1.83% para una ley mínima de plomo en la cabeza de mineral de 0.60%.

### **2.1.2. Diseño de la investigación**

El desarrollo del método de gestión de la investigación, se puede resumir en un flujograma, que muestra la secuencia lógica, ordenada y estructurada del PDCA, que a su vez, es una de las fortalezas para cumplir con la metodología y los fines de la investigación (alcanzar las metas planteadas).

Este diseño es sin duda del carácter CAUSA – EFECTO; metodología que permite establecer la relación existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido, considerado como variable dependiente, teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado, y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación como EXPERIMENTAL-CONDICIONADA.

### **2.1.3. Análisis del fenómeno**

A través de los años, el contenido de bismuto en los concentrados de plomo producidos en la unidad minera El Porvenir, fue incrementándose desde 0.49% en el 2003, hasta 1.83% en el 2010. (Ver figura 1.2.)

Este incremento se evidenció con mayores valores durante el 2010, donde la ocurrencia del bismuto en el concentrado de plomo, tenía en su origen y principales desviaciones, las menores leyes de plomo tratadas en la cabeza del mineral y la

ocurrencia del bismuto asociado al plomo en contenidos del mineral COSALITA ( $Pb_2Bi_2S_5$ ).

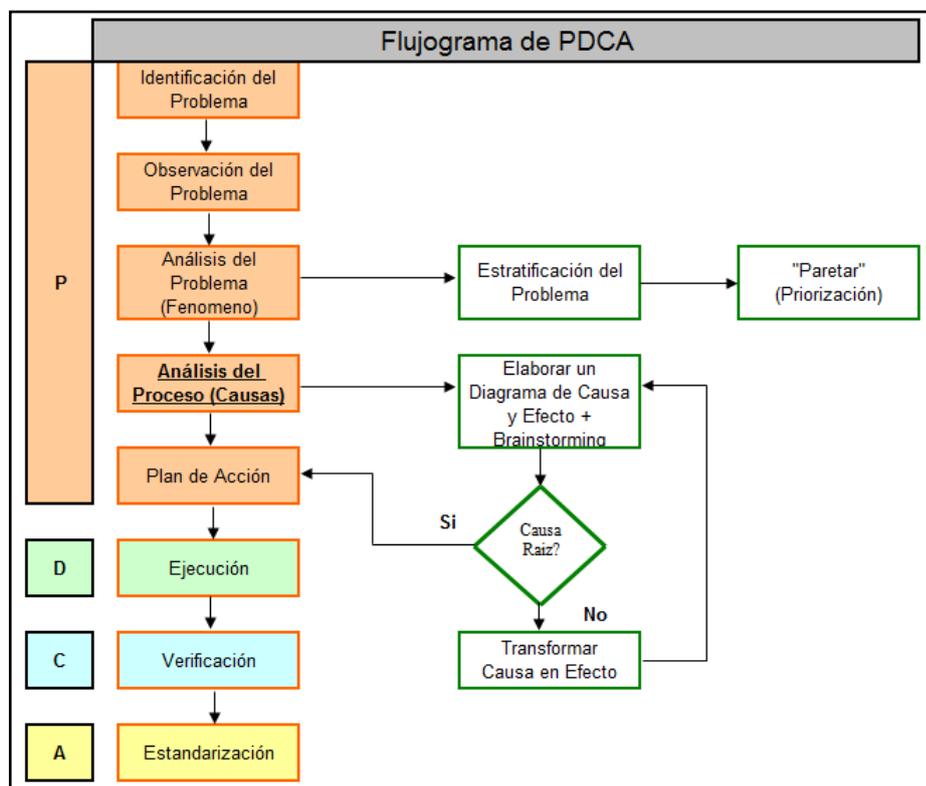
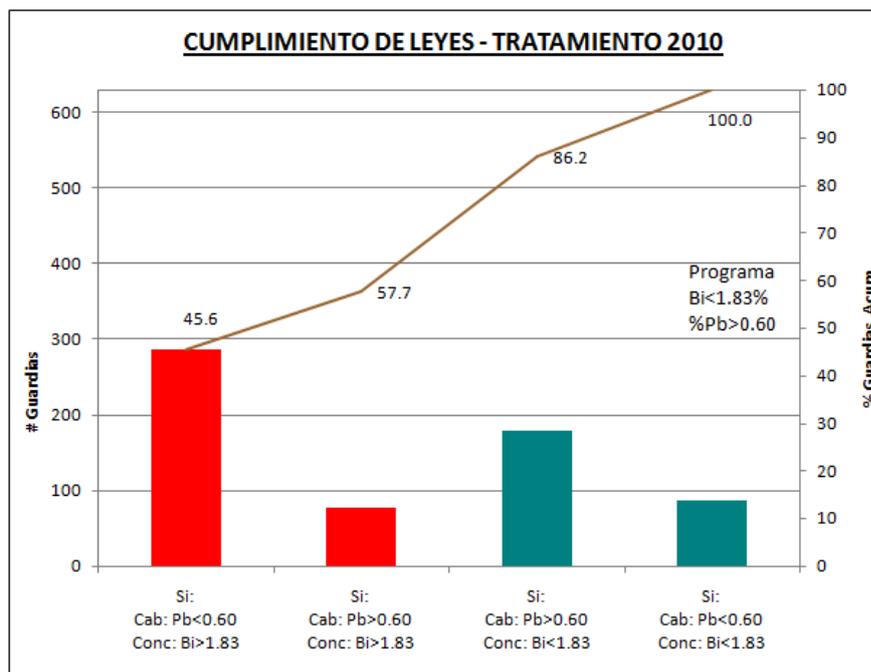


Figura N° 2.2. Flujograma de trabajo PDCA.

El análisis de influencia de la ley de plomo en la cabeza del mineral tratado sobre el mayor contenido de bismuto en el concentrado de plomo se analizó para todo el 2010, tal como se muestra en la siguiente figura 2.3.

El incumplimiento de leyes de plomo en el tratamiento de mineral tiene una influencia muy alta en el mayor contenido de bismuto en el concentrado de plomo. El 45.6% de las guardias en el 2010 tuvieron un contenido de bismuto mayor a 1.83% por menor ley de plomo en la cabeza de mineral programada 0.60%.



**Figura N° 2.3.** Análisis de resultados metalúrgicos por guardias – 2010

Sin embargo, se puede visualizar que existe un 12.1% de las guardias que tuvieron una ley de cabeza de mineral por encima de lo programado (0.60%) y a pesar de ello se obtuvo un contenido mayor a 1.83% de bismuto al concentrado de plomo. La desviación ocurrida obedece a otras causas del tipo operativo y de control del proceso, tal como el grado de remolienda, que será motivo de estudio.

#### **2.1.4. Tipo de Investigación**

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y la naturaleza del problema planteado, para el desarrollo del presente estudio se empleó el tipo de investigación “SUSTANTIVA”, porque permite responder a los problemas planeados, de acuerdo a la caracterización sobre el control del contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre, producidos en la Compañía Minera Milpo S.A.A., describiendo y explicando las CAUSAS Y EFECTOS, traducidos en resultados obtenidos de las diversas pruebas experimentales.

### **2.1.5. Finalidad de la Investigación**

La presente investigación tiene por finalidad evaluar y analizar las diversas pruebas metalúrgicas, desarrolladas a nivel de laboratorio, en la Compañía Minera Milpo S.A.A., y demostrar las ventajas que ofrece, controlar el grado de remolienda en la flotación bulk, para optimizar el proceso metalúrgico de la planta concentradora y permita reducir y controlar el contenido de Bi en los concentrados de Pb y Cu. Contenido de Bi menor a 1.83% en el acumulado anual después del 2010.

### **2.1.6. Propósito del control del grado de remolienda en el proceso de flotación bulk**

El propósito del control del grado de remolienda en la flotación bulk, es evitar el incremento de liberación del Bi en la flotación bulk. Esta liberación incrementa la flotabilidad del bismuto en la flotación bulk y su respectivo desplazamiento hacia los concentrados de plomo y cobre, producidos por la Compañía Minera Milpo S.A.A.

El control de grado de remolienda permitirá adicionalmente algunas otras ventajas operativas, que al final se vayan a convertir en la creación de valor sobre el proceso de flotación bulk.

### **2.1.7. Posibles causas que originan el mayor contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre**

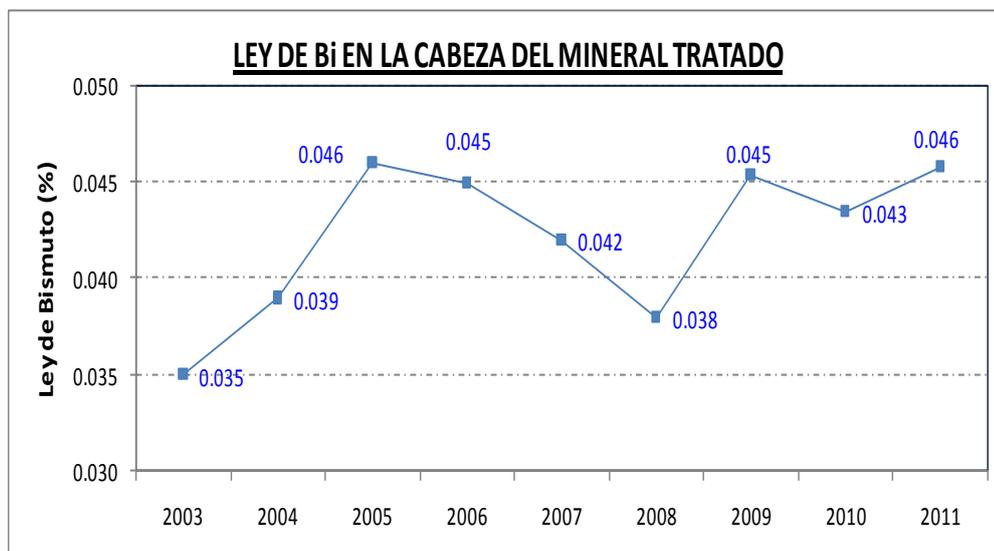
Las posibles causas son diversas. Sin embargo, para identificar aquellas que tienen mayor influencia se realizó un mapeo del proceso y su respectivo plan de determinación del grado de influencia y control sobre el objetivo final, controlar el contenido de bismuto en los concentrados de plomo y cobre. En el siguiente flujograma, se muestra el planeamiento del método PDCA para mejorar el resultado a obtenerse en el proceso (disminuir y controlar el Bi en los concentrados de Pb).



**Figura N° 2.4.** Flujograma de planes, acciones y ejecución del trabajo PDCA.

Considerando el flujograma tenemos lo siguiente:

- El incremento de la ley de bismuto en el mineral a tratar (Ley de cabeza), influye proporcionalmente, incrementando el desplazamiento de bismuto en los concentrados de Pb y Cu. El blending de tratamiento está basado en la ley de Zn del mineral de cabeza, por su mayor ley de ocurrencia y nivel de producción. Por lo tanto, los niveles de bismuto en la ley de cabeza del mineral, tienen un carácter no controlable, porque está sujeto a los contenidos sin regulación alguna para el elemento Bi.
- Los cambios estructurales en la mineralogía, fueron generando una reducción de las leyes de Pb y Ag en la cabeza del mineral a ser tratado en la planta concentradora. Quedando demostrado que existe una gran correlación entre la menor ley de cabeza de Pb y Ag, y la mayor ley de bismuto, contenida en los concentrados de Pb.

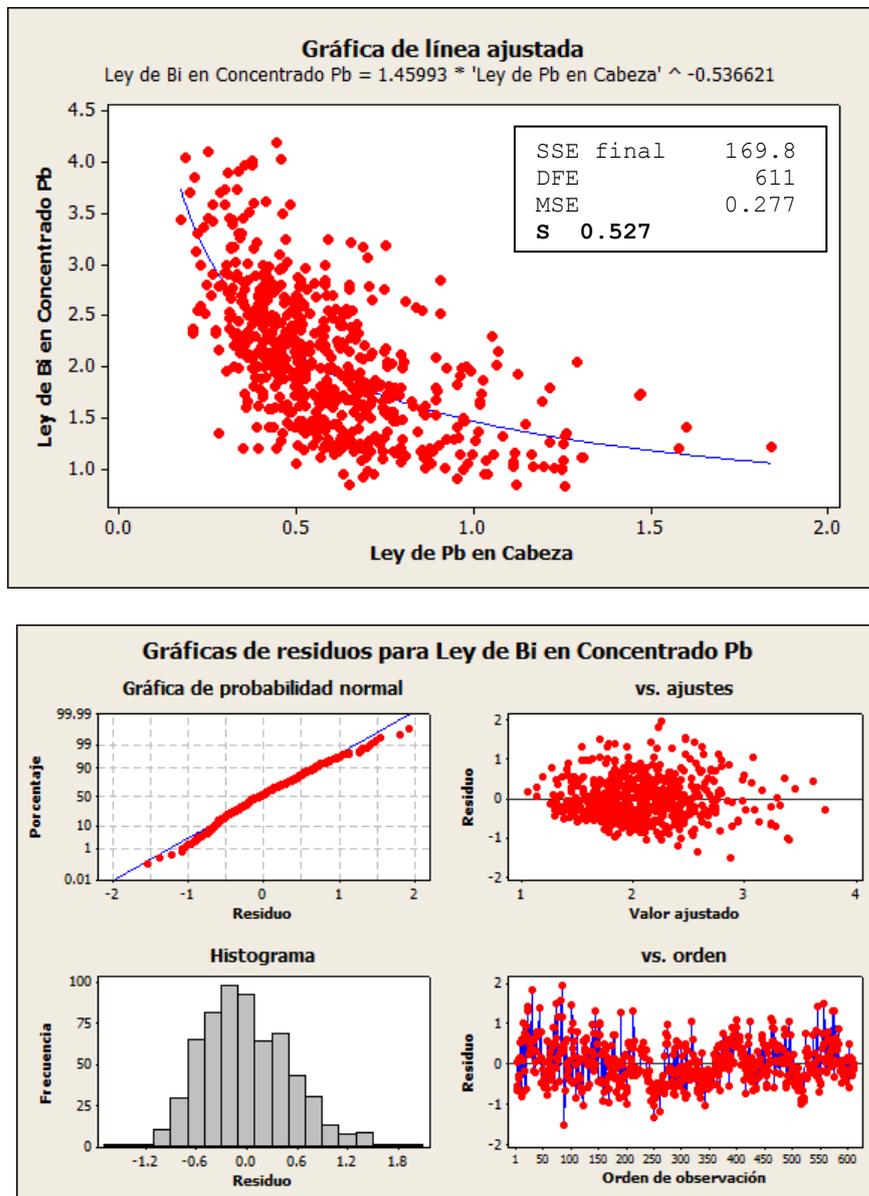


**Figura N° 2.5.** Variación anual de la ley de Bi en el mineral tratado.

- El análisis de datos por guardias que corresponde al periodo 2010, permite observar la correlación que existe entre las leyes de cabeza de Pb y Ag con la ley de bismuto contenida en el concentrado de Pb.
- Para validar esta correlación se realizó una regresión no lineal en el software minitab, encontrándose la ecuación de una curva característica para la relación entre pares de variables (Ley de Pb en la cabeza, Ley de Bi en concentrado de Pb) y sus respectivas graficas de analisis para los residuos de Ley de Bi en concentrado de Pb.

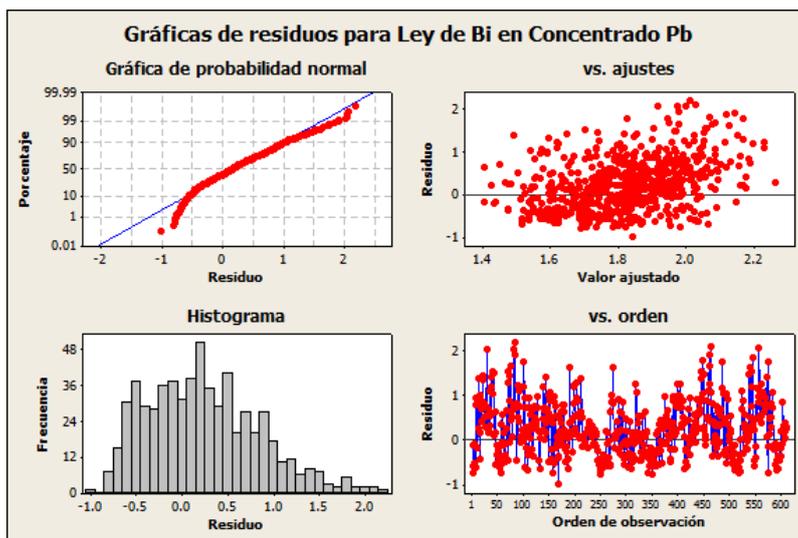
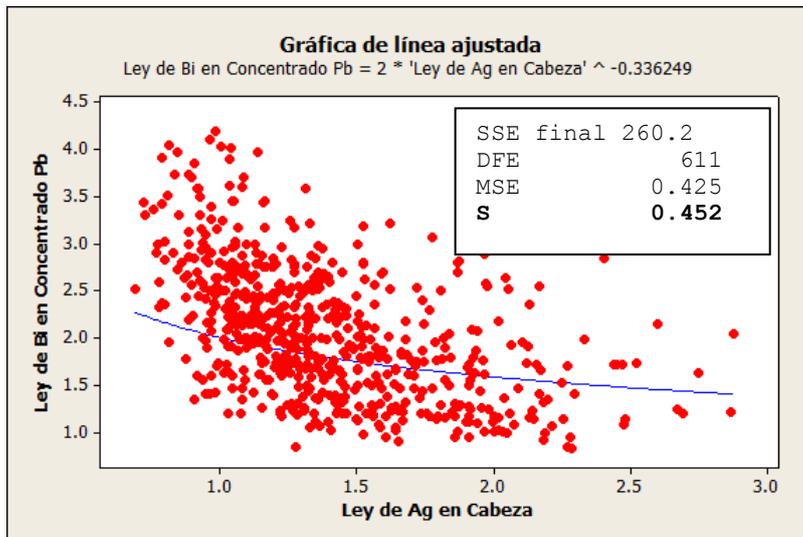
En los gráficos se puede apreciar que de acuerdo a la grafica de probabilidad normal, hay una buena normalidad en el comportamiento de los residuos para la ley de Bi en Concentrado Pb, para el contenido de plomo en la cabeza.

Durante el año 2010, el bismuto en el concentrado de plomo, tenía también otro origen asociada a la ley de Ag en la cabeza del mineral tratado. Sin embargo, cuando se realizó el estudio de regresión no lineal, se determinó que no hay una buena correlación.



**Figura N° 2.6.** Regresión Pb-Bi para la dispersión anual (2010) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos

En los gráficos se puede apreciar que de acuerdo a la gráfica de probabilidad normal, no hay una buena normalidad en el comportamiento de los residuos para la ley de Bi en el concentrado de Pb, para el contenido de plata en la cabeza. La prueba de normalidad calcula el valor P por debajo de 0.005, teniendo que ser mayor a este valor.



**Figura N° 2.7.** Regresión Ag-Bi para la dispersión anual (2010) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos.

**2.1.8. Planteamiento de alternativas de solución**

Para encontrar la mejor alternativa de solución será necesario desarrollar el estudio de los siguientes 4 enunciados, que buscan acercarse con mayor precisión a resolver el origen o la alternativa de solución, que alcanzaría resolver el objetivo principal del presente estudio:

- La realización de un estudio mineralográfico para los concentrados de Pb y Cu, podrían identificar el tipo de ocurrencia del bismuto. Asimismo, realizar el grado de liberación al que debería llegar el Pb y Cu, para que el desplazamiento de bismuto sea menor y poder alcanzar el control de bismuto en los concentrados.

**Tabla N° 2.1.** Correlación entre el Bi y los otros metálicos de importancia metalúrgica en los resultados 2010.

<b>Año: 2010</b>		
<b>Correlaciones y t-student</b>		
<b>BISMUTO</b>	<b>Corr.</b>	<b>Estadístico t</b>
Plomo	63.15	75.35
Plata	61.82	73.24
Zinc	8.06	-17.04
Cobre	7.85	16.80
Fierro	2.04	-8.30

El origen de la necesidad de un estudio mineralográfico nace de las mayores correlaciones entre la ley de bismuto y las leyes de Pb y Ag, respecto de los otros elementos metálicos, analizados en la regresión de datos por análisis químicos de los diferentes productos obtenidos en el beneficio de mineral por guardias durante el 2010 (concentrados de Pb, Cu, Zn y relaves).

Para el año 2010, los balances metalúrgicos reales mostraban una mayor correlación del bismuto con el plomo y la plata, y su mayor significancia con ellos, dado que coincidentemente, fueron los elementos que experimentaron conjuntamente, la misma tendencia de variaciones en su ocurrencia y contenido metálico.

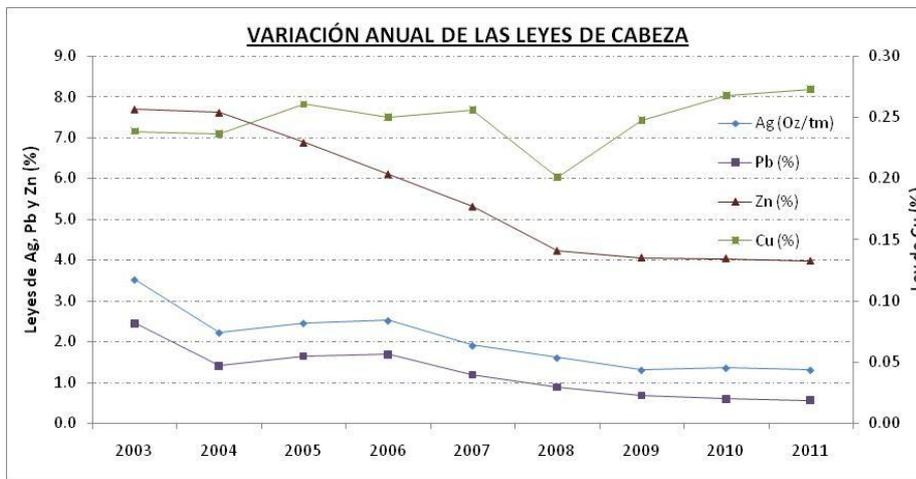


Figura N° 2.8 Leyes de cabeza (Ag, Pb, Zn y Cu) en el tratamiento anual (2010)

- La menor ley de cabeza de Pb, tratada en la planta concentradora, cambió las condiciones granulométricas de flotación, especialmente el grado de reducción en la remolienda bulk, dado que a menor contenido de plomo en las espumas del circuito, han favorecido la liberación de otros metálicos presentes en la pulpa, existiendo una supuesta mayor liberación e incremento de su flotabilidad.

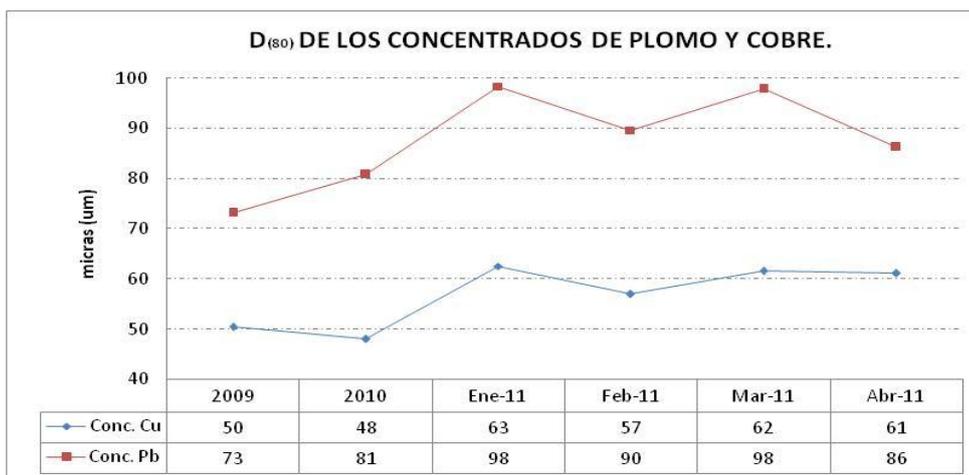


Figura N° 2.9 Tamaño de partícula  $D_{(80)}$  para el concentrado Pb-Cu.

El  $D_{(80)}$  de los concentrados de plomo y cobre fueron menores durante los años 2009 y 2010, en donde se operaba con la remolienda bulk, que muy notoriamente favorecía la liberación y flotabilidad del bismuto en el circuito bulk.

- Existen contratos de comercialización, donde el contenido de bismuto se convierte en pagable a partir de 6%. La realización de pruebas de flotación a nivel de laboratorio, servirían entonces para realizar el descarte para verificar la viabilidad de concentración de bismuto.
- El incremento de la ley de cabeza de Cu y el tipo de separación de Pb-Cu, por el método de bicromato (depresión de Pb) se fue valorando para mejorar y optimizar la performance de desplazamiento de bismuto hacia el concentrado de Cu, cambiando el método de separación Pb-Cu, por la separación inversa Cu-Pb (depresión de Cu con cianuro acomplejado con óxido de zinc).

### **CAPITULO III**

#### **VALIDACIÓN DEL METODO**

##### **3.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL EN ESTUDIO**

La investigación realizada en la Unidad El Porvenir de la Compañía Minera Milpo S.A.A., se llevo a cabo con muestras del área de molienda. El mineral tratado es polimetálico, alimentado mediante 04 fajas transportadoras a través de dos circuitos paralelos a la Molienda primaria y Clasificación, hasta 5100 TMPD de tratamiento (Meta 2011).

El tamaño de mineral alimentado a los molinos primarios, tiene un  $F_{80}$  de 6800 micras y el producto obtenido para la flotación contiene 49% -m200.

##### **3.2. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN**

###### **3.2.1. Estudio mineralográfico de los concentrados Pb y Cu**

Se desarrolló un amplio estudio mineralógico en Inspectorate's Petrographic Services Group.

En resumen, 3 minerales explican 97% del bismuto contenido en el concentrado de Pb. Su distribución aproximada, junto con su solución solida de Bismuto se muestra en la tabla 3.1.

Los minerales asociados al bismuto son principalmente liberados y tienden a asociarse con otros minerales de bismuto.

**Tabla N° 3.1.** Minerales conteniendo Bi en el concentrado de plomo

MINERAL	FORMULA	PORCENTAJE
Bismutinita	$\text{Bi}_2\text{S}_3$	72
Cosalita	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$	21
Bismuto Nativo	Bi	4
Solución sólida		3

**Tabla N° 3.2.** Ensayes comunes en los concentrados de cobre, plomo y bulk de las muestras para estudio.

Análisis	Conc. Cu.	Conc. Pb	Bulk Cu-Pb
%Cu	26.5	0.7	17.3
%Pb	6.6	63.3	9.4
%Zn	6.0	4.1	4.8
%Bi	1.5	2.0	2.9

**Tabla N° 3.3.** Análisis modal de las muestras ensayadas en el estudio

Distribución porcentaje en peso	Formula	Conc. Cu.	Conc. Pb.	Bulk Cu-Pb
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	73.0	1.6	48.2
Covelita	$\text{CuS}$	<0.1	<0.1	<0.1
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	<0.1	<0.1	<0.1
Digenita/Chalcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	<0.1	<0.1	<0.1
Pirita*	$\text{FeS}_2$	2.7	5.4	12.1
Óxidos de Hierro**		<0.1	<0.1	<0.1
No opacos		1.6	9.6	15.6
Esfalerita	$\text{ZnS}$	11.1	7.6	8.9
Galena	$\text{PbS}$	7.2	72.4	10.3
Tetraedrita	$(\text{Cu,Fe,Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	2.4	0.2	1.1
Pirrotita	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}$	<0.1	<0.1	<0.1
Bismutinita	$\text{Bi}_2\text{S}_3$	1.8	1.9	3.0
Bismuto Nativo	$\text{Bi}$	<0.1	<0.1	<0.1
Cosalita	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$	0.1	0.8	0.5
Bournonita	$\text{PbCuSbS}_3$	<0.1	0.5	<0.1
Otros***		<0.1	<0.1	<0.1

\* "Pirita" incluye pirita, marcasita y arsenopirita.

\*\* "Óxidos de Hierro" incluye magnetita, hematita y goethita.

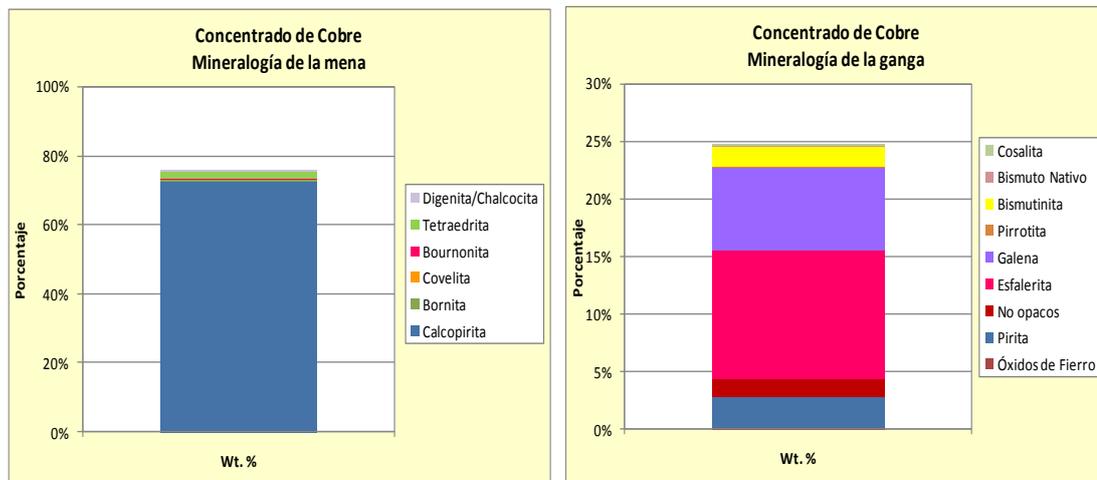
\*\*\* Otros minerales donde los principales son: molibdenita, eclarita, kochkarita y telurio nativo.

**Tabla N° 3.4.** Liberación de minerales asociados al Bi.

<b>% De liberación de Minerales de Bi</b>	<b>Formula</b>	<b>Concentrado Cu</b>	<b>Concentrado Pb</b>	<b>Bulk Cu-Pb</b>
Bismutinita	$\text{Bi}_2\text{S}_3$	88	99	100
Cosalita	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$	100	100	93
Bismuto Nativo	Bi	33	99	86

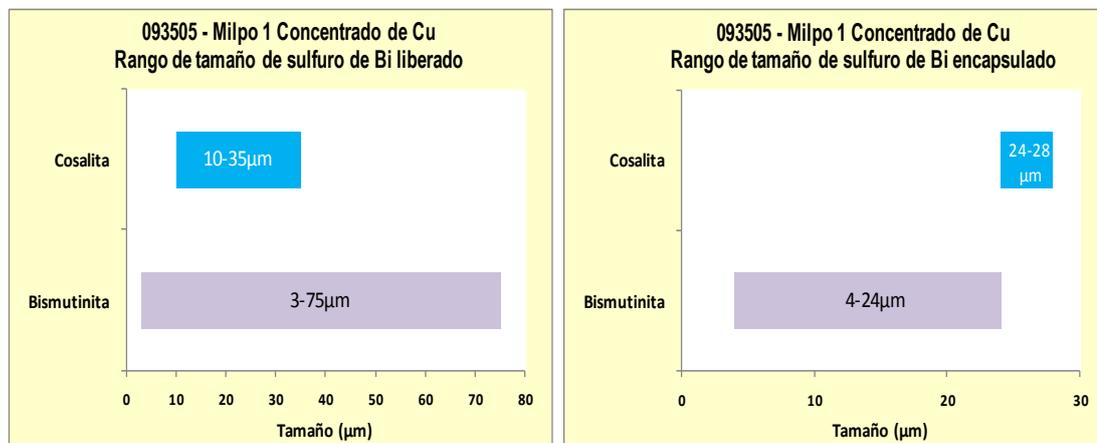
La principal fuente para el bismuto son la bismutinita y la cosalita. Menor, bismuto nativo y otras sulfosales incluyendo eclarita, y teluros como telurobismutita, aleksita y kochkarita están también presentes en niveles muy bajos. El análisis EMPA (Electron Microprobe Point Analysis) indica que solamente existe bismuto en menor proporción en solución sólida con galena (~0.1 a 0.2%) o con bajo nivel tetraedrita-tenantita o bornita. Los minerales asociados al bismuto son principalmente liberados y tienden asociarse con otros minerales de bismuto. Las cantidades menores son asociadas con otros sulfuros (sulfuro de cobre, pirita, esfalerita o galena), o no opacos ganga. Bismutinita y cosalita, de la misma manera que las menas del mineral, tienden a ser finos granos en los productos de las pruebas metalúrgicas.

En el concentrado de Cu y sus menas, el 73% de peso corresponde a la calcopirita y el 2.4% a la tetraedrita. Para las gangas se tiene que el 11.1% corresponde a esfalerita, el 7.2% a galena, 2.7% a pirita y 1.8% a bismutinita.



**Figura N° 3.1.** Distribución en peso de las menas y gangas en el concentrado de Cu Mineralógicamente, se tiene como mena a la calcopirita y tetraedrita como menas y la esfalerita, galena, pirita y bismutinita como gangas principales

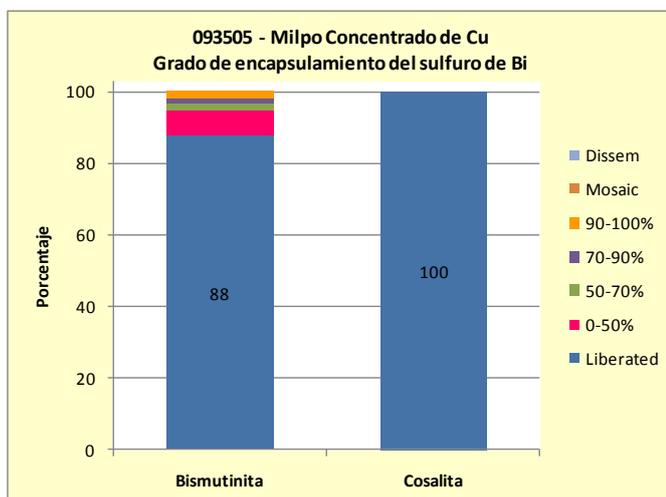
Liberation Profile de Bismuth Sulfides								
Size (µm)	Liberated	Locked	Non-Sulfide Hosting Minerals					
	Mean Size/Size Range (µm)	Mean Size/Size Range (µm)	Cu-S	Pyrite	Iron Oxide	Non-Opaque	Sphalerite	Galena
Bismuthinite	17µm / 3-75µm	10µm / 4-24µm	48	4	0	Trace	48	Trace
Cosalite	19µm / 10-35µm	26µm / 24-28µm	Trace	0	0	Trace	Trace	Trace



**Figura N° 3.2.** Rango de liberación por tamaño de partícula para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el concentrado de cobre

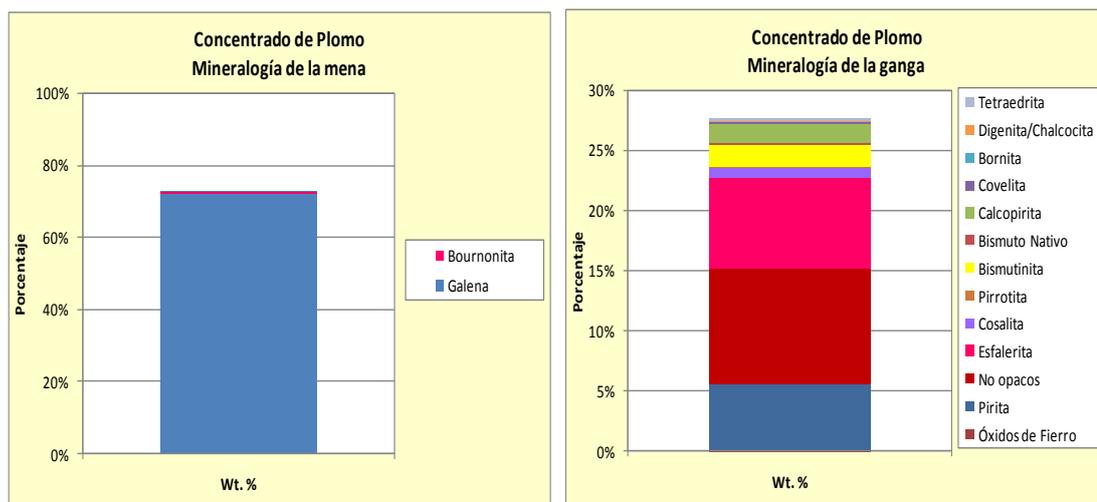
En la liberación de los sulfuros de bismuto contenidos en el concentrado de cobre, para la cosalita es del 100% entre 10 a 35µ y la bismutinita es del 88% de liberación entre 3 a 75µ.

Degrees of Locking															
Size (µm)	Bismuthinite, Statistical Grain %							Size (µm)	Cosalite, Statistical Grain %						
	Locked								Locked						
	Liberated	0-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Mosaic	Dissem		Liberated	0-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Mosaic	Dissem
	88	7	2	1	2	0	0		100	Trace	Trace	Trace	Trace	0	0



**Figura N° 3.3.** Porcentaje de liberación para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el estudio del concentrado de cobre.

En el concentrado de Pb y sus menas, el 72.4% de peso corresponde a la galena y el 0.5% a la bournonita. Para las gangas se tiene que el 7.6% corresponde a esfalerita, el 5.4% a pirita, 1.6% a calcopirita, 1.9% a bismutinita y 0.8% a cosalita.



**Figura N° 3.4.** Distribución en peso de las menas y gangas en el concentrado de Pb. Mineralógicamente, se tiene como mena a la galena y bournonita como menas y la esfalerita, pirita, calcopirita, bismutinita y cosalita como gangas principales.

En la liberación de los sulfuros de bismuto contenidos en el concentrado de plomo, para la cosalita es del 100% entre 3 a 125 $\mu$  y la bismutinita es del 99% de liberación entre 3 a 212 $\mu$ .

Size ( $\mu$ m)	Liberated	Locked	Non-Sulfide Hosting Minerals					
	Mean Size/Size Range ( $\mu$ m)	Mean Size/Size Range ( $\mu$ m)	Cu-S	Pyrite	Iron Oxide	Non-Opaque	Sphalerite	Galena
Bismuthinite	20 $\mu$ m / 3-212 $\mu$ m	14 $\mu$ m / 4-63 $\mu$ m	0	47	0	2	0	51
Cosalite	28 $\mu$ m / 3-125 $\mu$ m		0	0	0	0	0	0

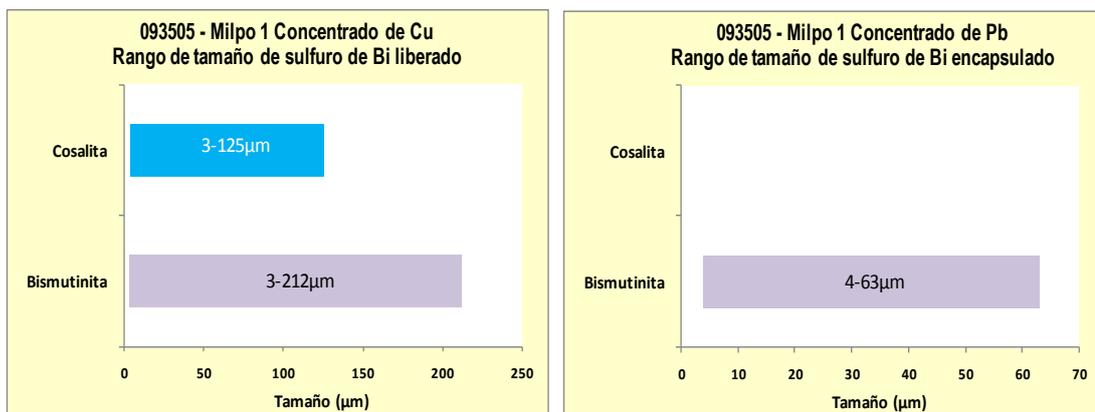


Figura N° 3.5. Rango de liberación por tamaño de partícula para los minerales que contienen bismuto (bismutinita y cosalita), presentes en el concentrado de plomo.

Degree of Locking																
Size ( $\mu$ m)	Bismuthinite, Statistical Grain %							Size ( $\mu$ m)	Cosalite, Statistical Grain %							
	Liberated	Locked							Liberated	Locked						
		0-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Mosaic	Dissem			0-50%	50-70%	70-90%	90-100%	Mosaic	Dissem	
	99	1	Trace	Trace	Trace	Trace	0	0	100	Trace	Trace	Trace	Trace	Trace	0	0

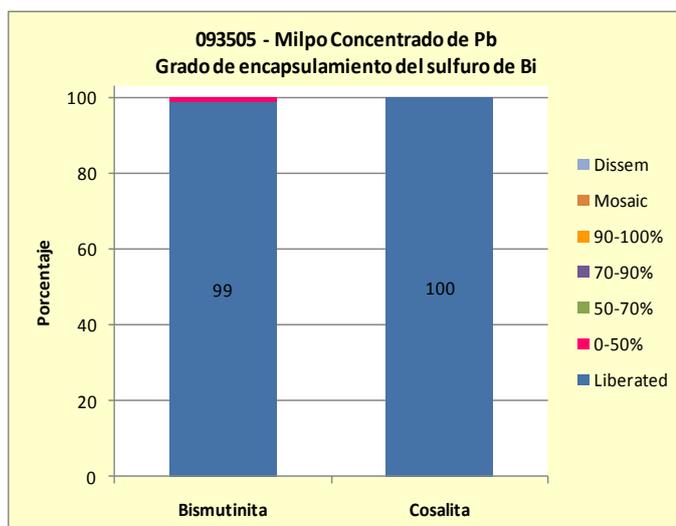


Figura N° 3.6. Porcentaje de liberación para los minerales que contienen bismuto (cosalita y bismutinita), presentes en el estudio del concentrado de plomo.

### 3.2.2. Pruebas metalúrgicas variando condiciones de operación (remolienda)

La mejor correlación del bismuto con el plomo y plata, y los altos porcentajes de liberación de los minerales de bismuto (bismutinita, cosalita y bismuto nativo), todos por encima de 85%, hicieron plantear la necesidad de evaluar una prueba exploratoria (experimental), del comportamiento del Bi en la flotación. Para ello se realizó una prueba estándar de flotación, evaluando el comportamiento del Bi granulométricamente (por tamaños valorados), tanto en la alimentación a la flotación y el relave obtenido en dicha prueba.

**Tabla N° 3.5.** Procedimiento a seguir para las pruebas metalúrgicas

Paso	Descripción
#1	Moler un Kg. De mineral durante seis minutos*. Conforme la rutina de pruebas.
#2	Filtrar, secar y homgeinizar la muestra.
#3	Tomar una parte del peso total y analizar por tamaños con ensaye de cada fracción.
#4	Moler una segunda muestra de un kg, durante seis minutos*.
#5	Flotar diferencialmente obteniendo concentrados rougher, scavenger y un relave final.
#6	Realizar un analisis por tamaños valorado a este relave.
#7	Analizar los resultados de cada fracción o tamaño obtenidos para la alimentación y relave de la flotación.

\* Tiempo de molienda estándar para la muestra igual a seis minutos.

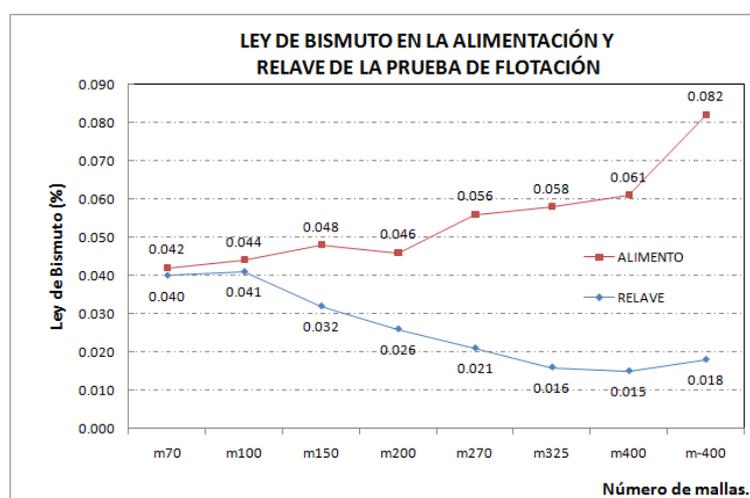
La muestra para estudio fue considerada a un mineral preparado en base a las mayores leyes de bismuto presente en los tajos mineralizados de la mina.

El análisis de fracciones valoradas de la alimentación a la flotación y el relave producido se muestra en las siguientes tablas:

**Tabla N° 3.6.** Análisis químico valorado para la alimentación y relave de la prueba de flotación bulk

Descripción de Muestra - Mineral de Bismuto														
Descarga de molienda - Alimentación a la flotación														
PRODUCTO	Peso	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
	(gr)	(%)	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
Malla N° 70	19.00	5.60	0.84	0.07	12.88	0.48	26.00	0.042	4.17	2.38	3.41	3.61	6.43	3.83
Malla N° 100	44.00	12.96	0.93	0.12	17.05	0.56	25.64	0.044	10.68	9.46	10.46	9.75	14.69	9.29
Malla N° 150	40.90	12.05	0.96	0.13	18.08	0.61	24.85	0.048	10.25	9.52	10.31	9.87	13.23	9.42
Malla N° 200	39.60	11.66	0.93	0.15	19.36	0.64	24.05	0.046	9.62	10.64	10.69	10.03	12.40	8.74
Malla N° 270	45.30	13.34	0.87	0.14	21.67	0.71	23.26	0.056	10.29	11.36	13.69	12.73	13.72	12.17
Malla N° 325	12.80	3.77	0.90	0.13	22.05	0.70	23.07	0.058	3.01	2.98	3.94	3.54	3.84	3.56
Malla N° 400	12.80	3.77	1.09	0.19	22.95	0.78	21.90	0.061	3.64	4.36	4.10	3.95	3.65	3.75
Malla N° -400	125.10	36.85	1.48	0.22	24.87	0.94	19.67	0.082	48.34	49.30	43.39	46.53	32.04	49.23
Cabeza calc	339.50	100.00	1.13	0.16	21.12	0.74	22.62	0.061	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cabeza ensayada			1.19	0.16	22.76	0.69	20.46	0.065						

Descripción de Muestra - Mineral de Bismuto														
Relave Flotación Bulk														
PRODUCTO	Peso	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
RELAVE	(gr)	(%)	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
Malla N° 70	33.00	9.68	0.68	0.05	6.09	0.44	20.36	0.040	14.55	15.10	14.02	16.66	12.16	14.67
Malla N° 100	53.30	15.63	0.74	0.02	3.51	0.31	18.62	0.041	25.57	9.76	13.05	18.96	17.96	24.29
Malla N° 150	39.80	11.67	0.45	0.02	1.93	0.18	15.98	0.032	11.61	7.29	5.36	8.22	11.51	14.16
Malla N° 200	35.60	10.44	0.35	0.02	1.09	0.10	14.20	0.026	8.08	6.52	2.71	4.09	9.15	10.29
Malla N° 270	38.40	11.26	0.23	0.01	0.64	0.06	14.07	0.021	5.73	3.52	1.71	2.64	9.78	8.96
Malla N° 325	10.50	3.08	0.13	0.01	0.62	0.05	16.05	0.016	0.89	0.96	0.45	0.60	3.05	1.87
Malla N° 400	10.30	3.02	0.13	0.02	0.51	0.05	14.02	0.015	0.87	1.89	0.37	0.59	2.61	1.72
Malla N° -400	120.10	35.22	0.42	0.05	7.44	0.35	15.55	0.018	32.71	54.97	62.33	48.24	33.79	24.03
Cabeza calc	341.00	100.00	0.45	0.03	4.20	0.26	16.21	0.026	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cabeza ensayada			0.45	0.03	4.20	0.26	16.21	0.026						

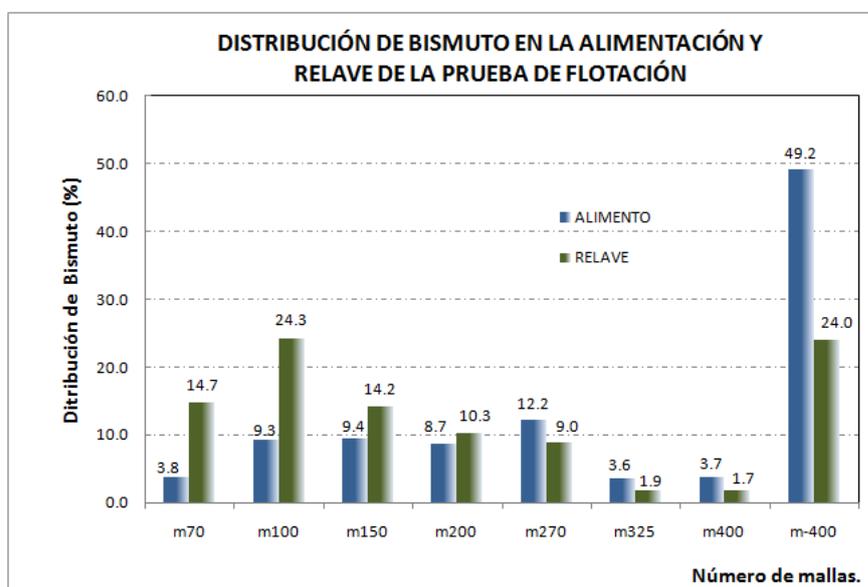


**Figura N° 3.7.** Leyes de bismuto contenidas en las diferentes mallas granulométricas para la alimentación y relave de la prueba de flotación bulk.

Después de la prueba de flotación (retirar las espumas rougher y scavenger bulk). Las mayores leyes de bismuto que estaban contenidas en las mallas más finas de la

alimentación, se desplazaron a las mallas más gruesas del relave valorado por cada fracción de tamaño.

Asimismo, la distribución de bismuto en la alimentación de la prueba de flotación era mucho mayor en la -m400. Sin embargo, después de la prueba de flotación, la distribución de bismuto en el relave, se reduce en la -m400 y se incrementa en las mallas m70, m100, m150 y m200, tal como se puede apreciar en el siguiente cuadro.



**Figura N° 3.8.** Distribución de Bi contenido en cada fracción de mallas granulométricas, para el alimento y relave de la prueba de flotación bulk

La prueba de flotación estándar demostró que el comportamiento de la liberación de Bi tiene las mismas tendencias que el Pb y Ag, incrementan su porcentaje de liberación hacia los menores tamaños de partícula.

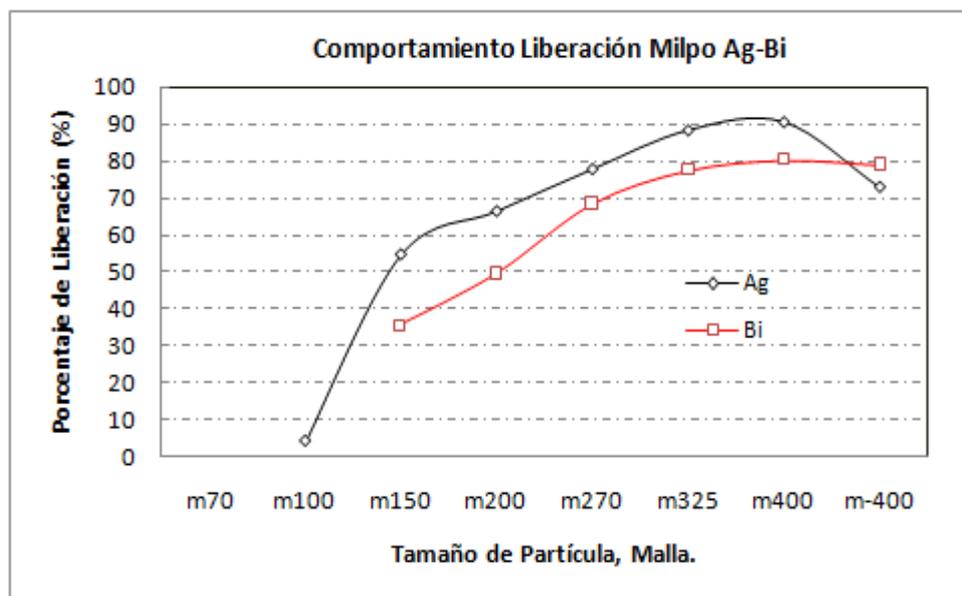


Figura N° 3.9. Comportamiento experimental de la liberación Ag-Bi en la flotación bulk

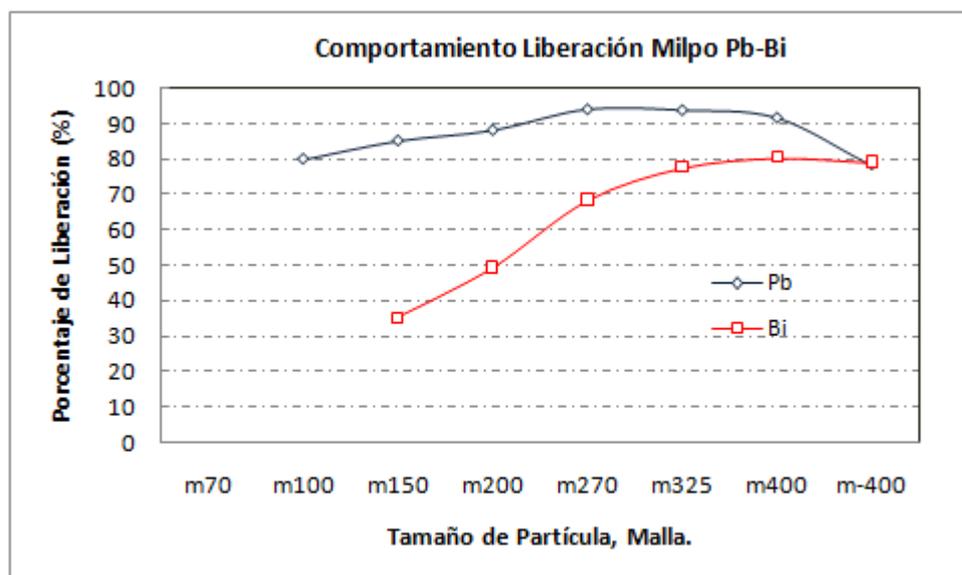


Figura N° 3.10. Comportamiento experimental de la liberación Pb-Bi en la flotación bulk

Si el comportamiento del Bi tiende a incrementar su liberación hacia las fracciones de menor tamaño granulométrico, nace la necesidad de una evaluación comparativa de flotación experimental estándar versus flotación experimental con menor grado de molienda (molienda gruesa).

La prueba metalúrgica experimental de flotación bulk, se desarrollo con una muestra mineral correspondiente a la alimentación al proceso industrial, según el siguiente marco de parámetros estándar de molienda y reactivos.

**Tabla N° 3.7.** Parámetros y dosificación de reactivos para las pruebas de flotación.

Marco de Parámetros y Reactivos, Pruebas Flotación Mineral El Porvenir				
Parámetro	Reactivo	Unidad	Prueba	
			Std (#1)	#2
Molienda	Mineral, Alim Mol	Kg.	1.0	1.0
	Agua Ind.	ml	600	600
	ZnSO4	gr/tm	363.9	363.9
	NaCN	gr/tm	51.1	51.1
	Tiempo	minutos	7.4	5.4
Acond. Pb	MC-C25	gr/tm	2.1	3.1
	3418-A	gr/tm	X	X
	MIBC	gr/tm	4.3	4.3
	Tiempo	minutos	2.0	2.0
Flot. Pb	Tiempo	minutos	3.0	3.0
Acond. Bulk	3418-A	gr/tm	36.0	36.0
	A-3477	gr/tm	X	X
	Tiempo	minutos	2.0	3.0
Flot. Bulk	MIBC	gr/tm	X	X
	Tiempo	minutos	3.0	3.0
Acond. Scv.	ZnSO4	gr/tm	86.1	86.1
	NaCN	gr/tm	15.0	15.0
	AR-1242	gr/tm	0.9	0.9
	A-5100	gr/tm	X	X
	MIBC	gr/tm	1.4	1.4
	Tiempo	minutos	1.0	1.0
Flot. Scv.	Tiempo	minutos	3.0	3.0

La variación importante de evaluación se dio en el grado de molienda para la prueba #2, dado que se está buscando evaluar el comportamiento del Bi, en un medio con mayor granulometría. Por lo tanto, se puede apreciar que el tiempo de molienda ha sido variada, mientras que para obtener 51% -m200 en 7.4 minutos de molienda, se realizó una molienda de tan solo 5.4 minutos, alcanzando un 45% -m200.



Los cuadros muestran una disminución sustancial de las leyes de Bi en el concentrado bulk y en cada uno de los subproductos que conforman este concentrado (Rougher Pb, Rougher Bulk y Scavenger Bulk). Este comportamiento tuvo la amplia influencia del menor grado de molienda de la muestra (molienda gruesa).

### 3.2.3. Pruebas de flotación para distintos grados de molienda

Evidenciado el efecto del grado de molienda sobre el comportamiento del bismuto en la flotación bulk, se planeó pruebas experimentales de flotación para validar resultados a obtenerse en la flotación bulk, para diferentes grados de molienda.

La instrucción para el desarrollo de las pruebas, describió 6 pasos a seguir, desde la molienda del mineral hasta los análisis químicos y granulométricos de cada uno de las fracciones de tamaño seleccionadas en los relaves finales de las pruebas experimentales de flotación.

**Tabla N° 3.9.** Procedimiento a seguir para las pruebas de flotación para diferentes tiempos de molienda (distintos grados de liberación del mineral)

Paso	Descripción
#1	Moler un Kg. de mineral para 4 diferentes tiempos (durante 3,5, 7 y 9 minutos).
#2	Flotar diferencialmente obteniendo concentrados Ro, Scv y un Rve.final, con el mismo estandar de reactivos.
#3	Realizar los análisis químicos y sus respectivos balances metalúrgicos.
#4	Filtrar, secar y homgeinizar la muestra de relve.
#5	Tomar una parte del peso total y analizar por tamaños con ensaye de cada fracción.
#6	Analizar los resultados de cada fracción o tamaño obtenidos para el relave de la flotación.

Cada prueba de flotación bulk, eligió un diferente tiempo de molienda. De ese modo, la prueba tuvo condiciones estándar para todas las pruebas, con la excepción del tiempo de flotación de cada uno de las pruebas de flotación.

**Tabla N° 3.10.** Balances metalúrgicos de las pruebas de flotación, para los diferentes tiempos de molienda

PRODUCTO	Peso %	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %						
		Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	
Molienda 3 minutos	%													
Conc. Bulk	6.16	23.69	8.89	10.12	2.27	15.36	0.357	66.11	83.17	14.19	65.29	7.81	53.40	
Scv. Bulk	3.56	3.72	0.92	7.63	0.41	8.76	0.075	6.00	4.96	6.18	6.85	2.57	6.45	
<b>Ro + Sc Bulk</b>	<b>9.72</b>	<b>16.37</b>	<b>5.97</b>	<b>9.21</b>	<b>1.59</b>	<b>12.94</b>	<b>0.150</b>	<b>72.10</b>	<b>88.13</b>	<b>20.37</b>	<b>72.14</b>	<b>10.38</b>	<b>59.85</b>	
Rve Final	90.28	0.68	0.09	3.88	0.07	12.03	0.018	27.90	11.87	79.63	27.86	89.62	40.15	
Cabeza calc	100.00	2.21	0.66	4.39	0.21	12.12	0.041	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
<b>Cabeza ensayada</b>		<b>2.29</b>	<b>0.62</b>	<b>4.43</b>	<b>0.23</b>	<b>12.95</b>	<b>0.043</b>							

PRODUCTO	Peso %	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
		Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
Molienda 5 minutos	%												
Conc. Bulk	7.05	19.97	7.05	7.34	1.81	18.90	0.326	67.05	82.04	11.62	63.09	11.44	54.28
Scv. Bulk	3.47	4.24	1.00	8.13	0.57	9.00	0.080	7.01	5.72	6.33	9.82	2.68	6.55
<b>Ro + Sc Bulk</b>	<b>10.52</b>	<b>14.79</b>	<b>5.06</b>	<b>7.60</b>	<b>1.41</b>	<b>15.64</b>	<b>0.174</b>	<b>74.06</b>	<b>87.76</b>	<b>17.95</b>	<b>72.91</b>	<b>14.12</b>	<b>60.82</b>
Rve Final	89.48	0.61	0.08	4.09	0.06	11.18	0.019	25.94	12.24	82.05	27.09	85.88	39.18
Cabeza calc	100.00	2.10	0.61	4.46	0.20	11.64	0.042	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>Cabeza ensayada</b>		<b>2.29</b>	<b>0.62</b>	<b>4.43</b>	<b>0.23</b>	<b>12.95</b>	<b>0.043</b>						

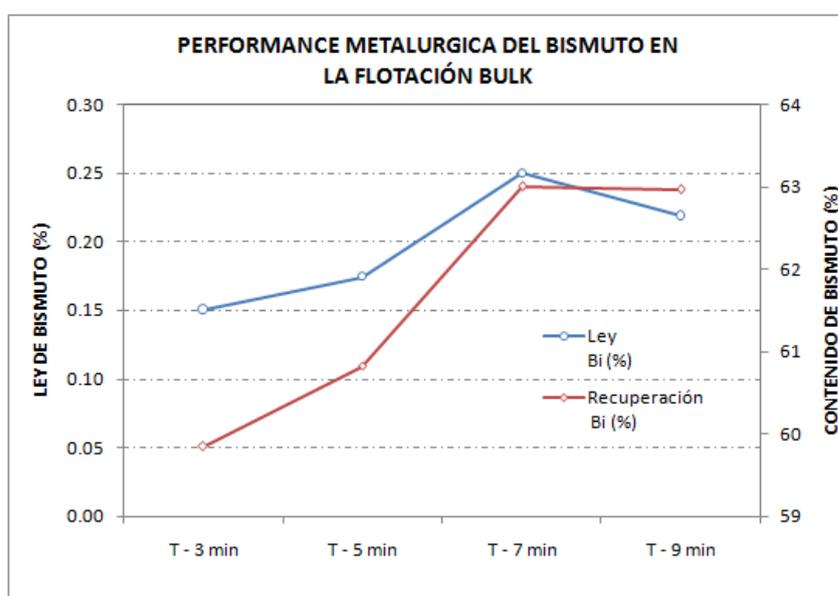
PRODUCTO	Peso %	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
		Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
Molienda 7 minutos	%												
Conc. Bulk	10.59	13.35	4.33	6.57	1.35	18.53	0.222	72.55	84.76	15.94	71.28	17.72	57.55
Scv. Bulk	4.19	2.51	0.50	6.38	0.32	8.28	0.053	5.40	3.84	6.12	6.66	3.13	5.46
<b>Ro + Sc Bulk</b>	<b>14.78</b>	<b>10.28</b>	<b>3.24</b>	<b>6.52</b>	<b>1.06</b>	<b>15.63</b>	<b>0.250</b>	<b>77.95</b>	<b>88.60</b>	<b>22.06</b>	<b>77.93</b>	<b>20.86</b>	<b>63.00</b>
Rve Final	85.22	0.50	0.07	3.99	0.05	10.28	0.018	22.05	11.40	77.94	22.07	79.14	37.00
Cabeza calc	100.00	1.95	0.54	4.37	0.20	11.07	0.041	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>Cabeza ensayada</b>		<b>2.29</b>	<b>0.62</b>	<b>4.43</b>	<b>0.23</b>	<b>12.95</b>	<b>0.043</b>						

PRODUCTO	Peso %	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
		Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
Molienda 9 minutos	%												
Conc. Bulk	8.21	16.57	5.52	6.17	1.60	19.48	0.276	68.45	83.11	11.62	63.94	14.28	56.36
Scv. Bulk	4.82	3.11	0.67	7.07	0.52	9.09	0.055	7.55	5.95	7.81	12.27	3.91	6.61
<b>Ro + Sc Bulk</b>	<b>13.03</b>	<b>11.59</b>	<b>3.73</b>	<b>6.50</b>	<b>1.20</b>	<b>15.64</b>	<b>0.219</b>	<b>75.99</b>	<b>89.06</b>	<b>19.42</b>	<b>76.21</b>	<b>18.19</b>	<b>62.97</b>
Rve Final	86.97	0.55	0.07	4.04	0.06	10.54	0.017	24.01	10.94	80.58	23.79	81.81	37.03
Cabeza calc	100.00	1.99	0.55	4.36	0.20	11.21	0.040	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>Cabeza ensayada</b>		<b>2.29</b>	<b>0.62</b>	<b>4.43</b>	<b>0.23</b>	<b>12.95</b>	<b>0.043</b>						

En resumen, las pruebas de flotación en base a la flotabilidad de bismuto influenciada por el grado de molienda, muestra un incremento de la ley de bismuto proporcional al grado de molienda o tiempo de molienda. Para mayor tiempo de molienda, mayor grado de liberación y por ello se correlaciona una mayor recuperación de bismuto en el concentrado Rougher + Scavenger Bulk.

**Tabla N° 3.11.** Variación de las leyes y recuperaciones de Bi, para los diferentes tiempos de molienda

Ley de Cabeza	Bi	0.043
Espumas Bulk	Ley Bi (%)	Recuperación Bi (%)
T - 3 min	0.15	59.85
T - 5 min	0.17	60.82
T - 7 min	0.25	63.00
T - 9 min	0.22	62.97



**Figura N° 3.12.** Comportamiento del Bi en las espumas de la flotación experimental bulk.

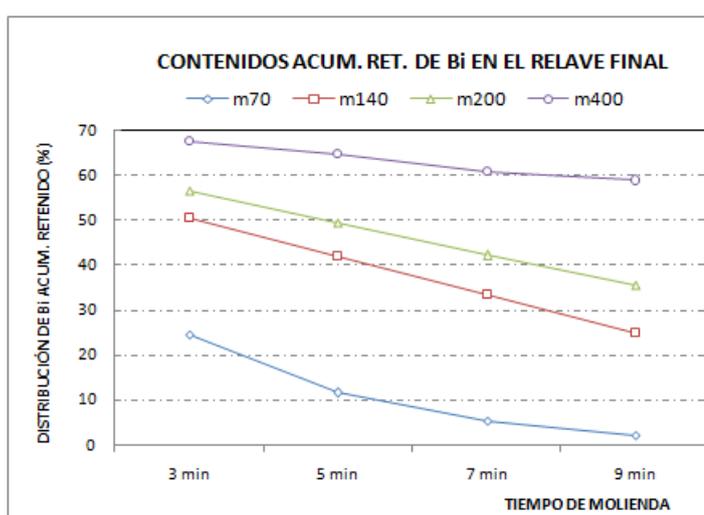
Si se analiza la distribución de contenidos acumulados de bismuto en los relaves obtenidos en las pruebas de flotación se puede observar que para un menor tiempo de molienda se tiene mayor valor retenido de distribución para mallas gruesas. Es así que para una molienda de 3 minutos, el acumulado retenido en la malla 200 está en 56.6% del bismuto total en el relave. Y para una molienda de 9 minutos solo se tiene el 35.8% del bismuto total retenida en la malla 200. Este efecto de molienda y liberación favorece altamente la flotabilidad del bismuto en la flotación bulk.

El análisis de resultados de cada fracción o tamaño obtenidos para el relave de flotación se muestra en los siguientes cuadros:

**Tabla N° 3.12.** Análisis de resultados de cada fracción o tamaño, obtenido para el relave de cada prueba de flotación

Tiempo	Distribución Acum. Ret. De Bi en el Relave.			
malla	3 min	5 min	7 min	9 min
m40	2.8	0.6	0.0	0.0
m45	6.1	1.7	0.34	0.0
m70	24.6	11.7	5.5	2.2
m100	39.7	26.5	17.2	9.4
m140	50.6	42.2	33.7	25.1
m200	56.6	49.6	42.3	35.8
m270	64.3	61.0	56.1	52.0
m325	65.5	62.0	57.4	54.1
m400	67.7	64.9	61.1	59.0
m-400	100.0	100.0	100.0	100.0

Agrupando los contenidos en cuatro mallas de referencia podemos apreciar que para todos los casos, el mayor porcentaje de bismuto acumulado retenido contenido en el relave se tiene para el menor tiempo de molienda probado.



**Figura N° 3.13.** Variación de los contenidos acumulados retenidos de Bi en el relave final de cada prueba de flotación (3 min, 5 min, 7 min y 9 min).

En los análisis de la distribución granulométrica de los relaves obtenidos, se puede verificar los grados de molienda evaluados. Considerando un tiempo de molienda estándar para las pruebas metalúrgicas de 5 minutos, las referencias probadas de liberación deberían ser entre 3 y 5 minutos.

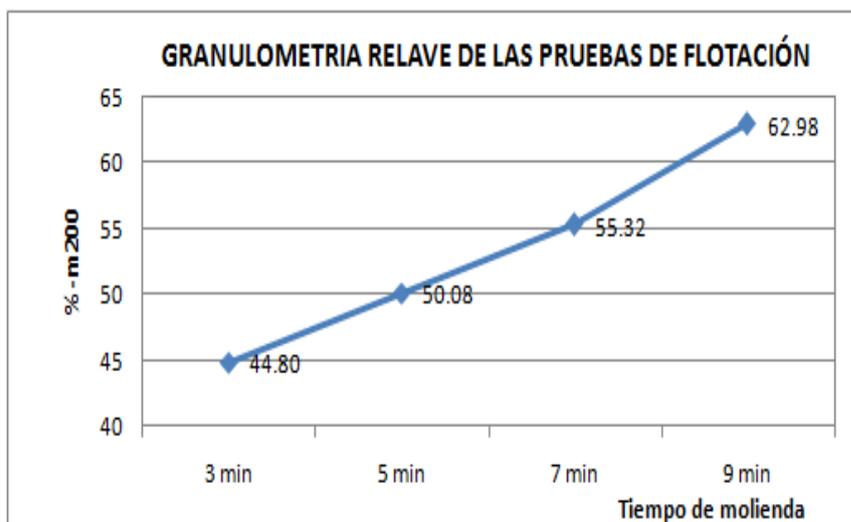
**Tabla N° 3.13.** Análisis granulométrico de los relaves finales de las pruebas de flotación

Rve1.	Molienda:	3 min		Rve2.	Molienda:	5 min	
malla	um	%peso	Ac (-)	malla	um	%peso	Ac (-)
m40	425	5.20	94.80	m40	425	1.98	98.02
m45	355	3.54	91.26	m45	355	2.10	95.92
m70	212	14.22	77.04	m70	212	9.20	86.72
m100	150	13.32	63.72	m100	150	12.48	74.24
m140	106	10.98	52.74	m140	106	14.38	59.86
m200	74	7.94	44.80	m200	74	9.78	50.08
m270	53	11.14	33.66	m270	53	15.10	34.98
m325	44	2.50	31.16	m325	44	2.52	32.46
m400	37	4.02	27.14	m400	37	4.94	27.52
m-400		27.14	0.00	m-400	20	27.52	0.00
Rve. Final		100.00		Rve. Final		100.00	

Rve3.	Molienda:	7 min		Rve4.	Molienda:	9 min	
malla	um	%peso	Ac (-)	malla	um	%peso	Ac (-)
m45	355	1.64	98.36	m70	212	3.76	96.24
m70	212	5.62	92.74	m100	150	7.52	88.72
m100	150	10.80	81.94	m140	106	13.64	75.08
m140	106	15.80	66.14	m200	74	12.10	62.98
m200	74	10.82	55.32	m270	53	19.50	43.48
m270	53	17.44	37.88	m325	44	4.16	39.32
m325	44	2.74	35.14	m400	37	7.86	31.46
m400	37	6.00	29.14	m-400	20	31.46	0.00
m-400	20	29.14	0.00	Rve. Final		100.00	
Rve. Final		100.00					

Gráficamente se puede observar que los niveles de reducción de tamaño en el relave deberían estar entre 44.8 y 50.08% -m200, para minimizar la liberación del bismuto y controlar su flotabilidad en el circuito bulk y posteriormente en los concentrados de Pb y Cu.



**Figura N° 3.14.** Porcentaje -m200 halladas en las muestras de relave, de las pruebas de flotación bulk

### 3.2.4. Pruebas de concentración de bismuto

Para las pruebas de concentración del bismuto, se partió de la consideración que un concentrado con niveles de bismuto por encima de 6.0%, convierte el contenido de Bi en un pagable y no penalizable.

Dado esta partida, se realizó diversas evaluaciones para concentrar el bismuto desde los concentrados de plomo obtenidos en el circuito de separación Pb-Cu.

#### 3.2.4.1. Pruebas de concentración de bismuto variando la dosificación del depresor RCS.

Las primeras pruebas exploratorias, se realizaron variando la dosificación del depresor de plomo RCS en el circuito de separación Pb-Cu. Las dosificaciones del complejo depresor RCS fueron desde 3 gr/ton en la prueba PLA-01 hasta 15 gr/ton en la prueba PLA-05, variando 3 gr/ton en cada prueba de flotación.

El depresor RCS tiene una concentración de 4.55% y su composición comprende 55% de bicromato de sodio, 17.5% de silicato de sodio y 27.5% de carboximetilcelulosa.

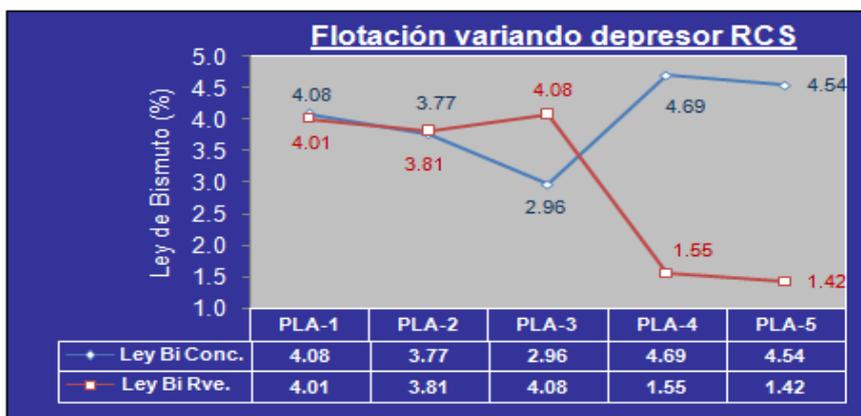
Durante las pruebas de flotación se obtuvo 2 productos, el concentrado (espumas) que debería estar enriquecido en Bi y su respectivo relave que debería ser de menor contenido de bismuto y su consecuente mejor calidad de concentrado de bulk.

**Tabla N° 3.14.** Balances metalúrgicos para las diferentes pruebas de concentración de bismuto, variando la dosificación de RCS

PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-01	%	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	4.61	88.09	61.01	5.75	3.97	6.27	4.08	4.95	4.53	7.99	18.59	6.61	4.69
RLVE-Pb	95.39	81.66	62.10	3.20	0.84	4.28	4.01	95.05	95.47	92.01	81.41	93.39	95.31
Cabeza calc	100.00	81.96	62.05	3.32	0.98	4.37	4.01	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-02	%	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	9.48	84.56	59.92	5.24	2.65	6.26	3.77	9.99	9.63	15.16	22.60	13.04	9.37
RLVE-Pb	90.52	79.73	58.83	3.07	0.95	4.37	3.81	90.01	90.37	84.84	77.40	86.96	90.63
Cabeza calc	100.00	80.19	58.93	3.28	1.11	4.55	3.81	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-03	%	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	9.30	65.59	63.04	4.75	2.87	8.93	2.96	7.64	9.85	12.93	25.06	19.01	6.93
RLVE-Pb	90.70	81.34	59.14	3.28	0.88	3.90	4.08	92.36	90.15	87.07	74.94	80.99	93.07
Cabeza calc	100.00	79.88	59.50	3.42	1.07	4.37	3.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-04	%	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	4.85	283.25	66.15	4.42	7.76	7.83	4.69	15.06	4.74	5.58	40.94	11.30	13.36
RLVE-Pb	95.15	81.34	67.70	3.81	0.57	3.13	1.55	84.94	95.26	94.42	59.06	88.70	86.64
Cabeza calc	100.00	91.12	67.62	3.84	0.92	3.36	1.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-05	%	Ag*	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	5.62	265.89	67.70	4.72	7.91	7.74	4.54	16.30	5.56	7.26	48.02	13.09	15.98
RLVE-Pb	94.38	81.34	68.48	3.59	0.51	3.06	1.42	83.70	94.44	92.74	51.98	86.91	84.02
Cabeza calc	100.00	91.71	68.44	3.65	0.93	3.32	1.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

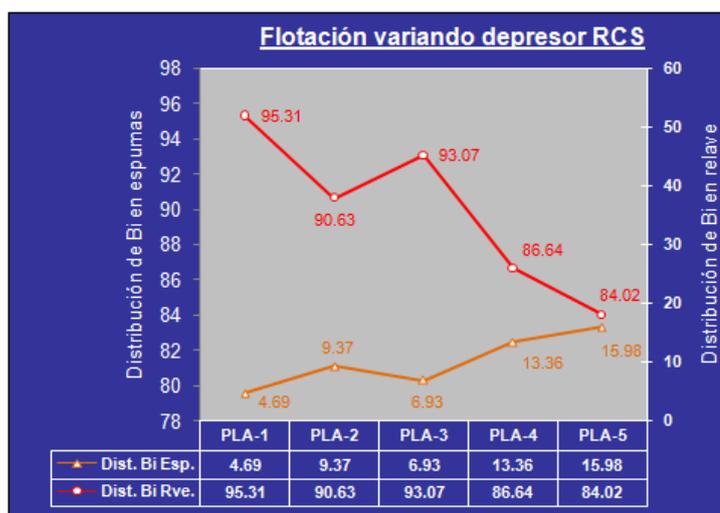
Las pruebas mostraron que no se pudo superar la ley de Bi, por encima de 5% en las espumas. Hay una tendencia creciente del contenido de Bi para el incremento

proporcional de la dosificación de RCS, hasta un nivel en que empieza a descender casi asintóticamente (dosificaciones por encima de 15 gr/ton).



**Figura N° 3.15.** Leyes de bismuto obtenidos en las espumas y relave de las pruebas de concentración de Bi, variando la dosificación de RCS

A pesar de mejorar la distribución del bismuto en las espumas de las pruebas de flotación, disminuyendo su desplazamiento al relave. No se alcanzó superar 6,0% de bismuto en las espumas, condición que haría pagable el bismuto y no penalizable.



**Figura N° 3.16.** Recuperación de bismuto en las espumas y relave de las pruebas de concentración de Bi, variando la dosificación de RCS.

### 3.2.4.2 Pruebas de concentración de bismuto variando el pH.

**Tabla N° 3.15.** Balances metalúrgicos para las diferentes pruebas de concentración de bismuto, variando el pH

PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-07	%	Ag <sup>+</sup>	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	4.53	240.49	69.42	4.53	15.37	11.94	3.98	13.14	4.52	7.87	62.94	19.31	9.15
RLVE-Pb	95.47	75.55	69.73	2.52	0.43	2.37	1.88	86.86	95.48	92.13	37.06	80.69	90.85
Cabeza calc	100.00	83.03	69.72	2.61	1.11	2.80	1.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

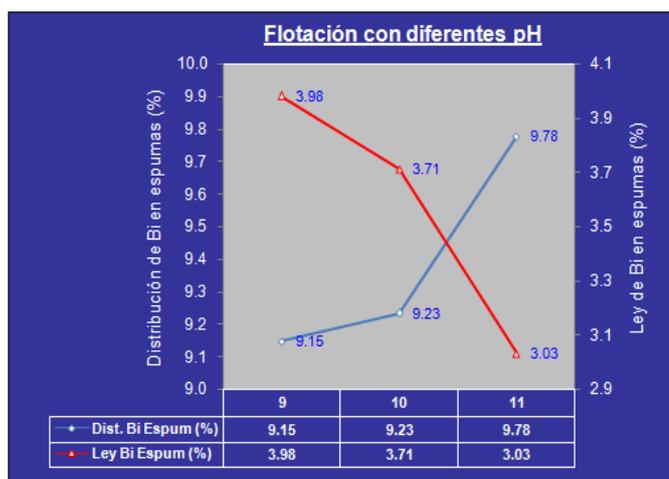
  

PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-09	%	Ag <sup>+</sup>	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	6.84	166.54	66.30	5.31	7.53	9.14	3.03	14.30	6.87	10.98	53.02	17.70	9.78
RLVE-Pb	93.16	73.30	65.99	3.16	0.49	3.12	2.06	85.70	93.13	89.02	46.98	82.30	90.22
Cabeza calc	100.00	79.68	66.01	3.31	0.97	3.53	2.12	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)						Distribución, %					
PLA-08	%	Ag <sup>+</sup>	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
CONC.Pb	4.65	199.98	43.27	5.67	9.90	10.52	3.71	11.38	2.92	9.28	55.30	15.86	9.23
RLVE-Pb	95.35	75.88	70.19	2.70	0.39	2.72	1.78	88.62	97.08	90.72	44.70	84.14	90.77
Cabeza calc	100.00	81.65	68.94	2.84	0.83	3.08	1.87	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Estas pruebas permitieron verificar que el mayor beneficio de incrementar el pH es mejorar la calidad del concentrado de plomo, sin mayores alcances al objetivo principal de incrementar el contenido de bismuto en las espumas para hallar el grado pagable de bismuto en los concentrados.



**Figura N° 3.17.** Variación de pH desde 8 hasta 11 para realizar la flotación de muestras del concentrado de Pb obtenido en el circuito de separación Pb-Cu



La mayor distribución en peso de las espumas, generaría una alta producción de espumas con altos contenidos de plomo, haciendo un manejo operacional complicado, dado que no se tendría alguna alternativa viable sobre la comercialización de este subproducto.

#### 3.2.4.4 Pruebas de exploración para flotación inversa Pb-Cu.

Las pruebas metalúrgicas modificando el método de separación a un circuito de separación inverso se realizaron inicialmente evaluando el grado de los concentrados de Pb y Cu a obtenerse.

**Tabla N° 3.17.** Balance metalúrgico para la flotación inversa de separación Pb-Cu.  
Las leyes de concentrados Pb y Cu, alcanzaron valores aceptables

PRODUCTO	Peso	Ensayes, % (*oz/tc)					Distribución, %				
	%	Ag <sup>+</sup>	Pb	Zn	Cu	Fe	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
Cc. Pb.	10.61	127.58	62.02	0.85	6.17	5.20	18.23	32.51	2.15	3.22	3.03
Rve. 2da. Limp.	11.56	104.23	32.92	1.78	16.00	13.89	16.23	18.81	4.92	9.09	8.83
Rve. 1era. Limp.	26.44	71.42	15.87	3.42	22.52	20.08	25.44	20.74	21.63	29.26	29.21
Medios Sep.	38.01	81.41	21.06	2.92	20.54	18.20	41.67	39.55	26.56	38.35	38.04
Cc. Cu.	51.38	57.95	11.00	5.80	23.15	20.85	40.10	27.93	71.30	58.44	58.93
Cabeza calc Bulk	100.00	74.25	20.23	4.18	20.36	18.18	81.77	67.49	97.85	96.78	96.97

Los grados alcanzados para el concentrado de plomo y cobre, estuvieron en el rango esperado, 62.02% para el plomo y 23.15% para el cobre.

Sin embargo, el alto consumo de cianuro y sus consecuentes variaciones en los niveles permisibles de monitoreo de los efluentes producidos en la unidad minera, hicieron desestimar esta aplicación y su mayor análisis aplicado al comportamiento del bismuto frente a este tipo de método de separación Pb-Cu.

El consumo de cianuro alcanzó a 166.66 gr/ton, necesariamente para alcanzar los grados de plomo y cobre estándar.

**Tabla N° 3.18.** Dosificaciones de cianuro, para una concentración de 3%

SEPARACION BULK	REACTIVO	CONCENTRACION	DOSIS	CONSUMO
		(%)	(cc/min)	(gr/ton)
ACONDICIONAMIENTO II SEP.BULK	CIANURO DE SODIO	3.0	10522	90.91
CLEANER I PLOMO	CIANURO DE SODIO	3.0	7014	60.60
CLEANER II PLOMO	CIANURO DE SODIO	3.0	1753	15.15

El total de cianuro requerido está por encima de 166.6 gr/tm de mineral tratado.

El manejo ambiental para estos niveles de cianuro a usarse en el proceso, superó cualquier otra prioridad operativa. Desestimándose las pruebas, para mantener y controlar los estándares ambientales alcanzados en la unidad minera El Porvenir.

## **CAPITULO IV**

### **ANALISIS COSTO BENEFICIO**

Según la metodología PDCA aplicada a la investigación y la búsqueda de la resolución del problema, se tendría que establecer un plan de acción siguiendo el análisis desarrollado para hallar las posibles causas del incremento de Bi en los concentrados de Pb-Cu y su respectivo control.

Las pruebas realizadas a todas las posibles alternativas de solución del problema planteado en el presente estudio, evidenciaron claramente la viabilidad del control del bismuto mediante el grado de molienda.

Las pruebas se realizaron variando los tiempos de molienda y consecuentemente los grados de liberación para la condición de molienda primaria y secundaria (alcanzar un mínimo de 50 % -m200).

Sin embargo, a nivel industrial el control a estos niveles (50% -m200) es muy estricto porque el circuito está configurado para una flotación diferencial, donde las recuperaciones de Ag, Pb, Zn y Cu están diseñados para tales grados de molienda.

No podríamos cambiar el grado por un probable efecto en la flotación zinc (menor recuperación y pérdidas en el relave por falta de liberación).

Las restricciones presentadas al control granulométrico en la molienda primaria y secundaria, crearon una especial atención en la remolienda bulk, donde se da también una alta liberación de elementos metálicos valiosos.

Las restricciones para la remolienda bulk, serían la menor recuperación de Ag, Pb y Cu. Pero esto se descartó con un análisis químico valorado al relave del circuito bulk, donde se notó que el contenido de Ag y Pb en la malla -400, estaban con valores relativos altos (25.8% para la Ag y 32.4% para el Pb), que podrían permitir tomar como medida de control, la parada del molino de remolienda bulk (COMESA 5'x5') para el control del problema en estudio.

**Tabla N° 4.1.** Análisis químico valorado a los diferentes tamaños granulométricos hallados para el relave de la flotación bulk (muestra industrial)

Relave Bulk			Ensaye						Distribución %					
Malla No	Abertu micras	Peso %	Ag Oz/tm	Pb %	Zn %	Cu %	Fe %	Bi %	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Bi
m70	210	19.87	1.18	0.14	3.45	0.23	13.74	0.040	30.0	35.1	16.0	30.6	17.5	24.8
m100	150	11.80	0.95	0.08	4.00	0.21	17.44	0.038	14.3	11.7	11.0	16.7	13.2	14.0
m140	105	11.60	0.71	0.06	4.17	0.20	18.00	0.033	10.5	8.3	11.3	15.5	13.4	12.1
m200	74	7.83	0.64	0.04	4.37	0.16	18.94	0.028	6.4	4.2	8.0	8.3	9.5	7.0
m270	53	11.50	0.64	0.04	4.65	0.10	17.89	0.029	9.4	5.7	12.5	7.9	13.2	10.6
m325	44	2.37	0.39	0.03	4.62	0.05	16.78	0.024	1.2	1.0	2.5	0.8	2.5	1.8
m400	37	3.60	0.51	0.04	5.43	0.08	17.71	0.025	2.4	1.6	4.6	1.9	4.1	2.9
-m400	-37	31.43	0.64	0.08	4.67	0.09	13.18	0.027	25.8	32.4	34.2	18.3	26.6	26.9
<b>Cab. Calc.</b>		100.0	<b>0.78</b>	<b>0.08</b>	<b>4.29</b>	<b>0.15</b>	<b>15.59</b>	<b>0.032</b>	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Las ventajas propuestas para esta medida serían:

- Control del contenido de Bi en el concentrado de plomo. El menor contenido de bismuto para las menores leyes de plomo proyectadas para el tratamiento del mineral y su respectiva correlación entre el Bi con el Pb, tienen el principal impacto financiero en la comercialización de los concentrados de plomo producidos en el proceso productivo.
- Menor consumo de energía. El control de energía por reducción del consumo de energía en el circuito de flotación bulk, por la parada del molino 5'x5', tendría un impacto significativo para los intereses y objetivos específicos planteados para este estudio.
- Menor consumo de aceros. La parada del molino de remolienda, también impactaría positivamente en el consumo de aceros, por menor consumo de bolas de 1.5" recargables al molino.

- La mayor desventaja de la parada del molino de remolienda bulk, es la probable afectación a la recuperación de Ag y su posible impacto financiero a las recuperaciones alcanzadas en el circuito antes de pararla remolienda bulk.
- Finalmente se realizará la valorización para el periodo de operación sin el circuito de remolienda bulk (Enero a Agosto del 2011).

#### 4.1. VALORIZACIÓN DEL AHORRO POR CONTROL DE BISMUTO EN EL CONCENTRADO DE PLOMO

Para la valorización del ahorro obtenido por el control de bismuto en el concentrado de plomo se utilizará el contenido de bismuto acumulado en los despachos reales de concentrados de plomo durante el 2010 como referencia, y el contenido acumulado entre enero y diciembre del 2011, como indicador del control alcanzado en la remolienda bulk.

**Tabla N° 4.2.** Resultados reales de la concentración de Pb, durante el año 2010 y el periodo de estudio 2011 en la planta concentradora El Porvenir de la Cía. Minera Milpo S.A.A.

Mes	% Pb Cabeza	TMS Conc. Pb	% Bi	Mes	% Pb Cabeza	TMS Conc. Pb	% Bi
feb-10	0.54	1,053	1.25	ene-11	0.76	1,544	1.54
mar-10	0.73	1,528	1.66	feb-11	0.74	1,347	1.39
abr-10	0.62	1,180	2.33	mar-11	0.53	1,056	1.82
may-10	0.59	1,217	1.97	abr-11	0.53	1,051	1.99
jun-10	0.61	1,257	2.23	may-11	0.50	1,009	2.06
jul-10	0.67	1,306	1.52	jun-11	0.41	836	2.38
ago-10	0.66	1,258	1.55	jul-11	0.50	976	1.81
sep-10	0.63	1,313	1.87	ago-11	0.51	789	1.89
oct-10	0.42	845	2.32	sep-11	0.53	820	1.65
nov-10	0.52	1,069	1.71	oct-11	0.32	649	2.41
dic-10	0.65	1,304	1.80	nov-11	0.53	1,110	1.62
<b>2010</b>	<b>0.60</b>	<b>13,328</b>	<b>1.83</b>	dic-11	0.66	1,391	1.47
				<b>2011</b>	<b>0.54</b>	<b>12,578</b>	<b>1.78</b>

Esta evaluación no considera la influencia de la menor ley de plomo (0.54%) en el mineral tratado en el 2011 (enero hasta diciembre), y el acumulado (0.60%) tratado en el mineral durante el 2010. Una diferencia de 0.06% entre el año 2011 y 2010.

Según la correlación hallada para la ley de plomo en la cabeza del mineral tratado y la ley de bismuto contenido en el concentrado de plomo, para menores leyes de plomo el contenido de bismuto es mayor en el concentrado. Sin embargo, con las acciones realizadas para el control de bismuto se puede apreciar un menor contenido del Bi en el concentrado de plomo 2011 respecto del año 2010.

**Tabla N° 4.3.** Referencia diferenciada de la penalización por contenido de bismuto obtenido entre el 2010 y 2011

<b>PENALIDADES:</b>					
<b>Bi 2010:</b>	1.826 %	- 0.50% =	1.326 %	x 1.500 US\$ / 0.01% =	(198.87) US\$/ton conc
<b>Bi 2011:</b>	1.776 %	- 0.50% =	1.276 %	x 1.500 US\$ / 0.01% =	(191.42) US\$/ton conc
<b>AHORRO =</b>					<b>7.46 US\$/ton conc</b>

Aplicando las condiciones de comercialización vigentes para la penalización de bismuto en el concentrado de plomo, se obtiene un ahorro de 7.46 US\$/ton de concentrado de plomo. Si en el 2011 se tuvo una producción de 12,578 toneladas de concentrados de plomo; se obtuvo un ahorro de 93,832 US\$.

La comercialización en los concentrados de Pb, castiga el contenido de Bi por encima a 0.5% en el concentrado, restando 1.5 US\$ por cada 0.01% de Bi contenido en el concentrado.

#### **4.2. VALORIZACIÓN DEL AHORRO POR MENOR CONSUMO DE ACEROS**

Durante el 2010 se consumió en promedio 78.7 gr/ton de bolas de acero con 1.5” de diámetro. Para el 2011, el menor consumo de bolas por parada del molino de

remolienda dio un consumo de 53.8 gr/ton, hallándose un ahorro de 24.9 gr/ton, que valorizado por el costo unitario de 1.10 \$US/Kg de acero, para las 1'742,129 toneladas de mineral tratado hasta diciembre del 2011, se tuvo un ahorro de 35,744 US\$, por menor consumo de bolas de acero.

**Tabla N° 4.4.** Cálculo de ahorro por menor consumo de aceros en la remolienda bulk, para el tonelaje tratado hasta agosto del 2010. Un total de 1'742,129 toneladas de mineral.

MENSUAL		Consumo de acero gr/tm												Acumulado
INSUMOS	Precio \$/kg	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Consumo gr/tm
Bolas 11/2" - 2010	1.10	79.8	81.6	80.7	74.9	75.9	74.0	98.1	86.5	81.4	69.7	68.1	74.4	78.7
Bolas 11/2" - 2011	1.10	49.9	44.9	50.4	49.5	47.3	51.9	49.2	72.7	77.7	51.0	47.5	62.8	53.8
<b>MENOR CONSUMO</b>														24.9
<b>MINERAL TRATADO (ton)</b>														1,742,129
<b>AHORRO</b>														47,897

La reducción del consumo de bolas de acero en 24.9 gr/tm de mineral tratado, estuvo dentro de lo proyectando al inicio del proyecto, validando el cumplimiento del objetivo secundario de reducir los costos por menor consumo de suministros. La valorización de ahorro por consumo de aceros, no está considerando el menor gasto por ahorro de forros del molino y el mantenimiento mecánico y/o eléctrico del molino de remolienda.

#### 4.3. VALORIZACIÓN DEL AHORRO POR MENOR CONSUMO ENERGÍA

Las características técnicas del motor del molino se muestran en el siguiente cuadro:

**Tabla N° 4.5.** Cálculo de ahorro por menor consumo de energía en la remolienda bulk, por la parada del molino de remolienda bulk que tiene una potencia de 100 HP y 77.7 Kw de consumo energético

ITEM	TIPO	MARCA	POTENCIA	VOLTIOS	AMPERIO	Factor	CONSUMO
		MOTOR	HP	V	Amp	Cos $\phi$	Kw
Molino Rem. Bulk	5'x5'	Baldor	100	440	120	0.85	77.7

El molino de remolienda bulk 5'x5' dejó de operar 345 días durante el 2011. Esta parada del molino de remolienda significó un ahorro de energía, de un total de 643,848Kw-hr. Representando un ahorro del gasto por energía de 42,494 \$US. El costo unitario promedio del 2011, por energía eléctrica es de 0.066 \$US/Kw-hr.

## **CAPITULO V**

### **ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **5.1. EVALUACION DE LOS RESULTADOS**

La evaluación de los resultados será basado en el análisis real y estadístico del contenido de bismuto obtenido a partir de enero del 2011. Fecha de parada del molino de remolienda bulk, para controlar la ley de Bi en el concentrado de plomo.

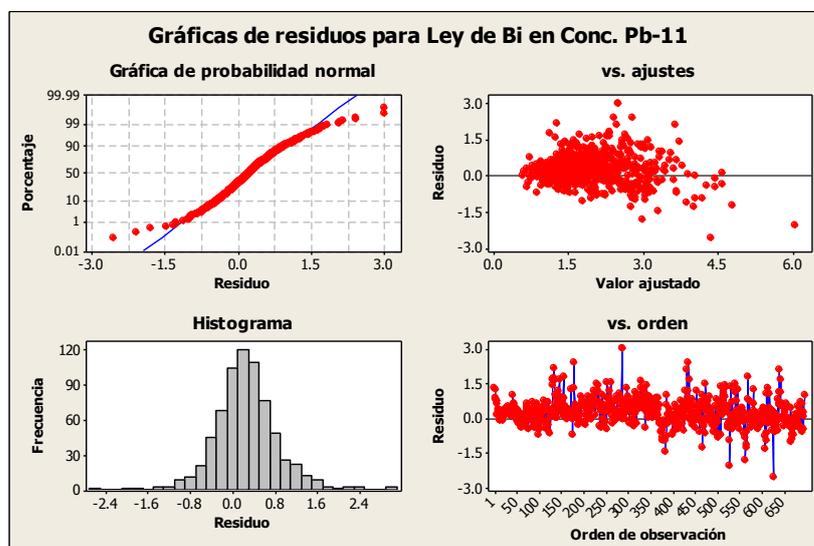
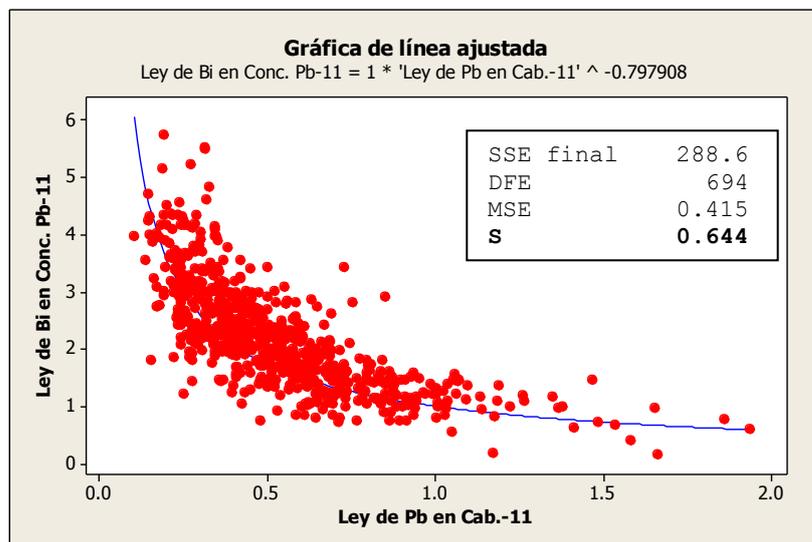
Dado la correlación hallada entre la ley de plomo en la cabeza del mineral tratado y la ley de bismuto en el concentrado de plomo, por la presencia esencialmente del mineral Cosalita ( $Pb_2Bi_2S_5$ ), se puede concluir que durante el 2011, su regresión validó aun mas su correlación, por el mejor ajuste y mayor coeficiente de correlación obtenido (0.644 en el 2011 y 0.452 en el 2010).

En la dispersión de datos que corresponden a la ley de bismuto en el concentrado de plomo y la ley de plomo en la cabeza de mineral se puede apreciar una menor variabilidad.

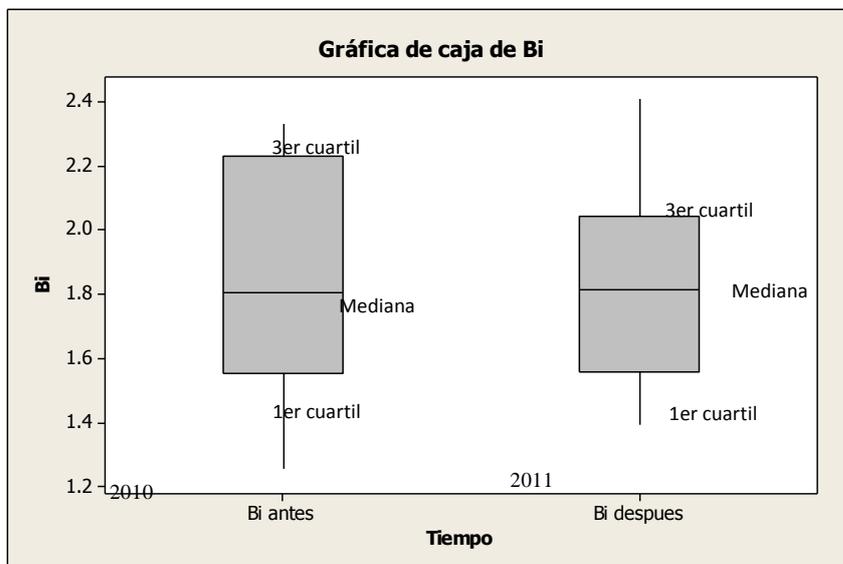
Analizando la normalidad de los residuos obtenidos en la regresión y correlación del bismuto contenido en el concentrado de plomo y la ley de plomo en la cabeza del mineral tratado, se halla un comportamiento del tipo normal.

La menor variabilidad del bismuto en el concentrado de plomo es también un indicador del efecto producido por la menor liberación del bismuto y su

consecuente flotabilidad en el concentrado bulk. Esta variabilidad se puede evaluar comparando la variabilidad durante el 2010 y el alcanzado en el año 2011.

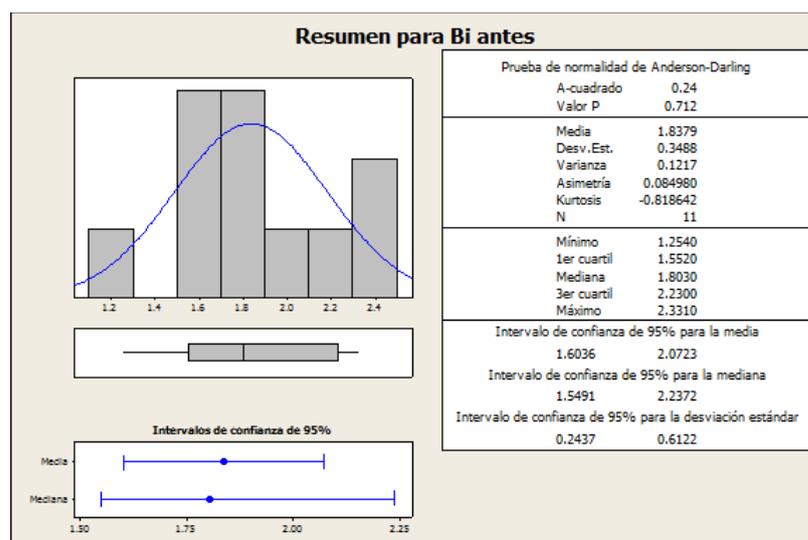


**Figura N° 5.1.** Regresión Pb-Bi para la dispersión anual (2011) de resultados metalúrgicos por guardias y comportamiento normal de los datos y residuos



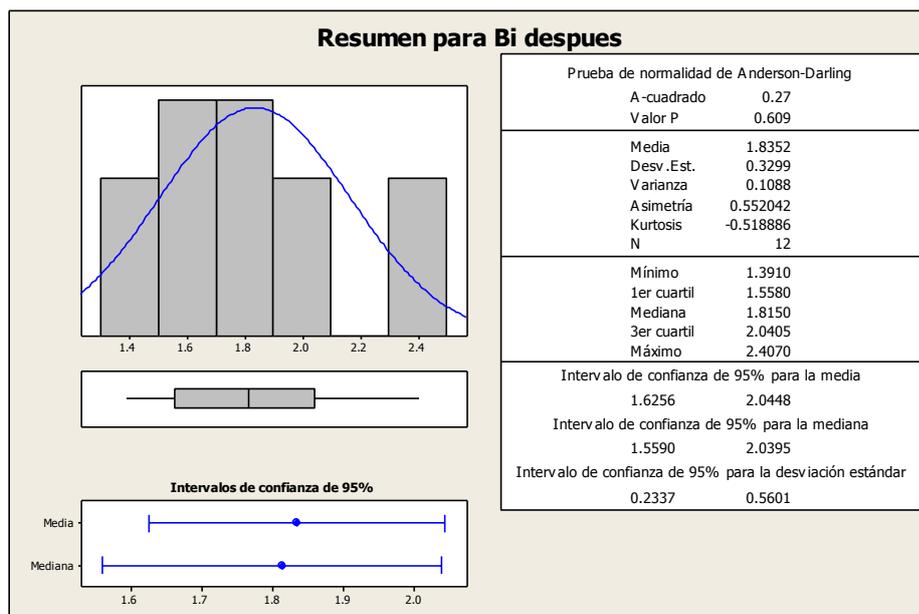
**Figura N° 5.2.** Gráfica de cajas, que permite diferenciar los datos, respecto de las posiciones de referencia, para determinar en la población la concentración de datos, respecto de la mediana, 1er cuartil y 3er cuartil

Analizando los datos mediante las graficas de cajas, se pueden observar claramente el control obtenido sobre la variabilidad a partir del control de liberación sin remolienda bulk.



**Figura N° 5.3.** Resumen gráfico de los resultados estadísticos, realizados al análisis de datos (ley de bismuto contenida en el concentrado de plomo), para todos los ensayos químicos del concentrado de Pb obtenido en el 2010

Si observamos el posicionamiento de los puntos antes (2010) y después (2011) del cambio realizado en la planta, podemos destacar que en el 2010, el 75% de datos con valores más bajos eran menores a 2.230% (3er cuartil). Sin embargo, en el 2011 el 75% de los datos con valores más bajos son menores a 2.040% (3er cuartil).



**Figura N° 5.4.** Resumen gráfico de los resultados estadísticos, realizados al análisis de datos (ley de bismuto contenida en el concentrado de plomo), para todos los ensayos químicos del concentrado de Pb obtenido en el 2011

Asimismo, se puede visualizar el mayor control cuando se compara la desviación estándar obtenida en el 2010 y 2011. Mientras que en el 2010 se alcanzó 0.3488, en lo que va del año 2011 se alcanzó 0.3299 de desviación estándar.

Se puede concluir también que la metodología empleada para la resolución del problema, aprovechó la oportunidad de mejora identificada al inicio, donde se apreciaba que durante el 2010, el 12.1% de las guardias tuvo una ley de cabeza de plomo en el mineral por encima de lo programado (0.60%) y a pesar de ello se obtuvo un contenido mayor a 1.83% de bismuto al concentrado de plomo.

Durante el 2011, solo existe un 5.03% de guardias que presentan una ley de plomo mayor a 0.60% y una ley de bismuto en el concentrado de plomo mayor a 1.83%, claramente se puede apreciar que hubo una reducción de 7.07% de casos por esta misma naturaleza, afectando el control del bismuto.

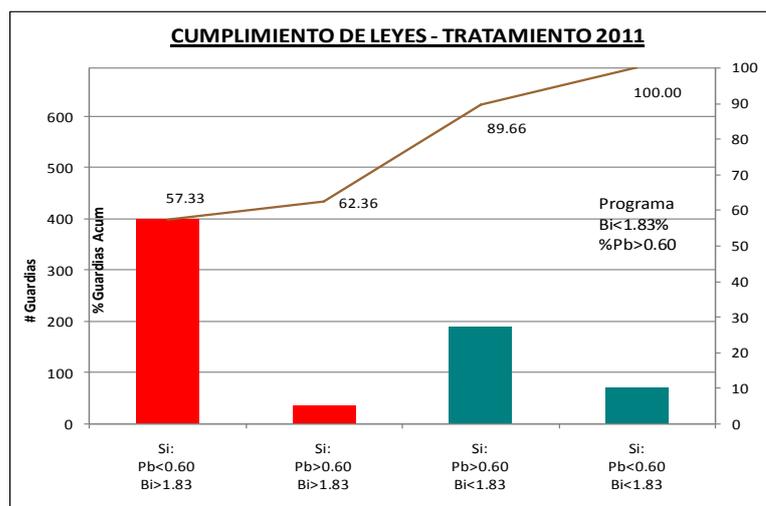


Figura N° 5.5. Análisis de resultados metalúrgicos por guardias – 2011

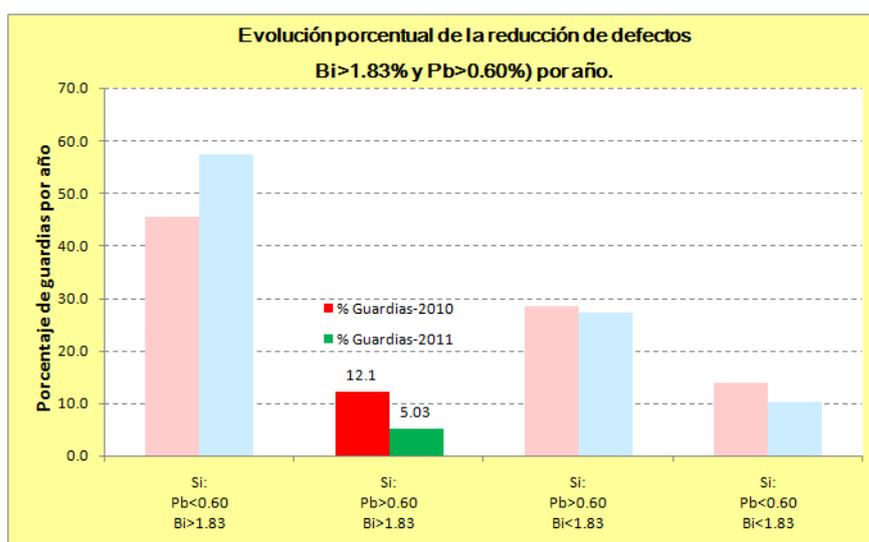


Figura N° 5.6. Comparación de la evolución de la reducción de defectos por año

## CONCLUSIONES

1. El estudio ha demostrado el mejor control del contenido de bismuto en el concentrado de plomo producido en la planta concentradora El Porvenir de Cía. Minera Milpo S.A.A durante el 2011. Las pruebas experimentales para hallar la mejor alternativa de solución al problema planteado, definió el control de la liberación del bismuto en la flotación bulk, parando el molino de remolienda bulk. Minimizando la sobremolienda de los minerales de bismuto con su respectiva flotabilidad y desplazamiento al concentrado de plomo.
2. Es concluyente mencionar que durante el 2011 se tuvo un ahorro total del gasto de hasta 172,070 US\$, por menor penalidad de Bi en el concentrado de plomo, menor consumo de aceros en la remolienda bulk y su respectivo ahorro por menor consumo de energía eléctrica.
3. La correlación existente entre la ley de cabeza de Pb y la ley de Bi en el concentrado de plomo muestra claramente la dependencia entre ambas variables en el proceso de flotación. El control de remolienda de la flotación bulk seguirá siendo en adelante la forma más viable para controlar el desplazamiento de Bi al concentrado de Pb, dado que para los próximos años, las condiciones operacionales colocarán al beneficio de minerales en un escenario más exigente debido a la inevitable reducción de la ley de plomo en la mineralización. Sin embargo, a pesar de planear leyes de plomo

menores a 0.45%, solo se proyectaría un incremento de la ley de Bi en el concentrado de plomo de hasta 1.89% según la ecuación:

$$\text{Ley de Bi en Conc. Pb-11} = 1 * \text{Ley de Pb en Cab.} - 11^{-0.797908}$$

4. El presente estudio debería ampliar su alcance para cuantificar el beneficio económico o en su defecto su afectación en la recuperación de Ag. Recordemos que en segundo nivel o grado, y no menos importante, la ley de bismuto estaba correlacionada con la ley de plata en los diferentes productos obtenidos en el proceso productivo de la unidad minera El Porvenir. En tal sentido se debería extender el estudio, para la aplicación de un proyecto six sigma para optimizar en mayor grado el control de bismuto en el concentrado de plomo.
5. Dado la ocurrencia del Bi en la mineralogía estudiada, se recomienda ampliar la investigación de posibles reactivos depresores de Bismuto. Existe referencias bibliográficas de que el hipoclorito de sodio, en determinados medios, tiene características depresoras para el bismuto nativo y bismutinita. Seguramente la sinergia de un depresor y el control de remolienda bulk, permitirá un menor desplazamiento de Bi al concentrado de Pb.

### **BIBLIOGRAFIA**

1. BAKI YARAR, "Mineral Processing Design", Turkey 1984.
2. BARRY A. WILLS, TIM NAPIER MUNN, "Mineral Processing Technology", October 2006.
3. C. K. GUPTA, "Chemical Metallurgy", Mumbai 2003.
4. FATHI HABASHI, "Extractive Metallurgy", Québec 2000.
5. P. BALAZ, "Extractive Metallurgy of Activated Minerals", First Edition 2000.
6. SRDJAN M. BULATOVIC, "Handbook of Flotation Reagents", April 2007.