

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN METALURGIA EXTRACTIVA

**“OPTIMIZACIÓN EN LA RECUPERACIÓN
METALÚRGICA DE MOLIBDENO, PLANTA II
LAS TÓRTOLAS”**

DIVISIÓN LOS BRONCES – ANGLO AMERICAN

Rodrigo Rubilar Silva

Profesor Guía:

Alvaro Aracena Caipa

2014

En memoria de mi Tata Samuel.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Rubén y Cecilia por su incondicional apoyo durante esta hermosa etapa. Sin dudas el amor, la preocupación constante, la confianza y el esfuerzo puesto en mi, hacen posible éste, nuestro logro. Mis infinitas gracias por siempre estar ahí y entregarme las herramientas y valores que hoy me convierten en un agradecido de la vida.

A mis hermanos, María José, Nicolás e Isidora, por inspirarme en ser cada día mejor y entregarme innumerables alegrías que seguiremos compartiendo. Gracias por existir y constituir la hermosa familia que somos.

A mi abuela Meche, un pilar fundamental en mi vida, una segunda madre, que me ha entregado un cariño infinito y amor incondicional. Gracias por tu apoyo y preocupación, eres lo más grande.

A los amigos que conocí durante este camino y a los de siempre, especialmente a Miguel, Camilo, Fabiola, Felipe, Joaquín, Mary, Melissa, Natalie, Nico, Nicole, Pablo, Pola y Pato. Gracias por todas las risas, consejos y grandes momentos que hemos vivido juntos.

A mis grandes amigos y compañeros Metalúrgicos, Camila, Marcela, Marcos, Walter, Karina, Malcom y Jeisson. Gracias por ser los mejores amigos con los que pude compartir esta etapa, por las noches de estudio, el carrete porteño, los paseos a la playa y las tremendas historias que hemos vivido, que sé serán muchas más.

Al “Profe”, Rodrigo Ceballos por su incondicional apoyo, conocimientos, consejos y confianza entregada durante estos meses de memoria en Las Tórtolas. Gracias Totales Profe!

A Carmen, Cote y Stewart por la amistad y buenos momentos en LT.

Finalmente, a los profesores que me guiaron y apoyaron durante mi paso por la Universidad, especialmente a Lorena Álvarez y Alvaro Aracena, quien me guió en este trabajo de memoria. Gracias por los consejos, paciencia, conocimientos y apoyo entregado durante estos años.

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo optimizar la recuperación metalúrgica en el proceso selectivo de la planta II Las Tórtolas perteneciente a la división Los Bronces de Anglo American, ubicada en la región Metropolitana en la comuna de Colina.

Para esto, se definen tres lineamientos que dirigen las motivaciones al objetivo planteado. En primer lugar se trabaja realizando un estudio técnico-económico centrado en el cálculo de la ley de corte de la planta selectiva II, basándose en tres principios: costos, recuperación y precio del concentrado. Con los resultados obtenidos se logra una claridad acerca del fino de molibdeno necesario para obtener utilidad cero y al mismo tiempo la ley mínima con la que se deben alimentar los procesos colectivo y selectivo. Bajo esta información y los datos recopilados, se infiere que es necesario realizar cambios en la operación y el control de variables, para lograr mejores resultados en el corto plazo y es aquí donde como segundo lineamiento se construye un modelo estadístico multivariable de la ley de Mo en el concentrado mixto, con el objetivo de encontrar las variables que más influencia tienen en la ley del concentrado alimentado a la planta selectiva y por otro lado entender el comportamiento de estas variables, para futuras predicciones a favor del desarrollo de la operación. Por último, a través de estas variables, realizando pruebas en planta, modificando parámetros, se clarificó las mejores condiciones a las que se debe operar para lograr alimentaciones mayores en grado de molibdeno a la planta selectiva. Esta condición finalmente, está directamente relacionada con mejoras en la recuperación metalúrgica y la ley de concentrado en la planta de molibdeno.

A través del trabajo realizado se obtuvo por ley de corte un valor de 0.0045% de MoT alimentado a la planta colectiva, para la obtención de 0.404 ton de Mo fino que a un precio de venta de 11.5 USD/lb cubren los costos de operación de la planta II de Moly. Además por parte del modelo multivariable y su posterior análisis de sensibilidad se obtuvo que las variables incidentes en el grado de Mo en el concentrado mixto corresponden al contenido de Mo en el concentrado rougher de planta colectiva, flujo de agua de lavado, flujo de aire, pH y nivel de espuma en las

columnas del circuito de limpieza de planta colectiva. Finalmente trabajando a 60 m³/h de agua de lavado, 200 m³/h de flujo de aire, 10.8 de pH y un nivel de espuma de 40 cm, se lograría alimentar en promedio leyes superiores en un 16.67% de Mo a la planta selectiva con enriquecimientos en ley que se traducen en beneficios económicos de USD\$5512 por turno.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTA DE FLOTACIÓN SELECTIVA TÓRTOLAS II.....	2
1.2 PLANTA DE FLOTACIÓN COLECTIVA TÓRTOLAS II.	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4 OBJETIVO GENERAL	6
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA.....	7
2.1 ANGLO AMERICAN.....	7
2.2 DIVISIÓN LOS BRONCES.....	8
2.3 PROYECTO DE DESARROLLO LOS BRONCES	9
2.4 ANTECEDENTES GENERALES DEL PROCESO.....	11
2.4.1 Planta de Chancado de Pebbles	11
2.4.2 Planta de Molienda Confluencia.....	12
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA LEY DE CORTE	14
3.1.1 Fundamentos de la Ley de Corte	14
3.1.2 Formulación de la Ley de Corte	15
3.1.3 Ley de Corte de Molibdeno, consecuente con proceso selectivo.....	16
3.2 METODOLOGÍA DE LA OBTENCIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO	17
3.2.1 Análisis de Regresión Lineal Múltiple	17
3.3 FLOTACIÓN COLECTIVA DE CONCENTRADOS Cu-Mo.	18
3.3.1 Reactivos Flotación Colectiva	18
3.3.2 Flotación Columnar	20
3.3.3 Flotación Selectiva de Concentrados Cu-Mo	23

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DEL TRABAJO	27
4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	27
4.2 LEY DE CORTE ASOCIADA A LEYES DE ALIMENTACIÓN.....	28
4.3 MODELO ESTADÍSTICO ASOCIADO A LA LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO	28
4.4 MEJORAS ASOCIADAS A PRUEBAS EXPERIMENTALES	29
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1 OBTENCIÓN DE LA LEY DE CORTE	30
5.1.1 Análisis de Costos Planta Moly	31
5.1.2 Fino Mínimo Requerido Para Utilidad Cero	37
5.1.3 Polinomio Ley Alim. Selectiva – Recuperación Selectiva.....	40
5.1.4 Polinomio Ley de Alim. Planta Selectiva – Ley de Concentrado.	42
5.1.5 Polinomio Ley de Alim. Colectiva – Recuperación Colectiva	43
5.1.6 Método de elección correlación final para Leyes de Alimentación Plantas	45
5.1.7 Polinomio Ley Alim. Planta Selectiva – Ley Alim. Planta Colectiva.....	51
5.1.8 Polinomio Ley de Alim. Planta Colectiva – Recuperación Global.....	54
5.1.9 Ley de Corte Planta de Molibdeno	55
5.1.10 Validación del modelo de cálculo	57
5.1.11 Costos por Reproceso.....	59
5.2 MODELO ESTADISTICO DE LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO	64
5.2.1 Situación actual.....	64
5.2.2 Regresión Primer Trimestre	65
5.2.3 Regresión Segundo Trimestre.....	71
5.2.4 Regresión Tercer Trimestre	75
5.2.5 Regresión Cuarto Trimestre	79
5.2.6 Modelo Final.....	82
5.2.7 Análisis de Sensibilidad.....	87

5.3 MEJORAS EN LA LEY DE ALIMETANCIÓN A PLANTA SELECTIVA	89
5.3.1 Mejoras en Ley de Mo en Concentrado Rougher.....	89
5.3.2 Mejoras según Flujo de Agua de Lavado en Columna	101
5.3.3 Mejoras según Flujo Aire en Columna	106
5.3.4 Importancia del pH en Columnas	110
5.3.5 Mejoras según Nivel de Espuma en Columnas.....	113
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA	119
ANEXO A	120
A.1 Fórmulas Marco Teórico	121
A.1.1 Desarrollo ecuación (2) Ley de Corte	121
A.1.2 Desarrollo ecuación (3) Holdup.....	121
A.2 Fórmulas Resultados y Discusión.....	121
A.2.2 Desarrollo ecuación (8) Recuperación circuito limpieza planta selectiva	122
A.3 Información Adicional.....	122
A.3.1 Ingresos Planta Selectiva	122
A.3.2 Utilidades Planta Selectiva	123
A.3.3 Cálculo de utilidades planta selectiva	123
ANEXO B	125
B.1 Regresiones Primer Trimestre	126
B.2 Regresiones Segundo Trimestre	128
B.3 Regresiones Tercer Trimestre	131
B.4 Regresiones Cuarto Trimestre	133
ANEXO C	136
C.1 Pruebas de Cinética Rougher.....	137
C.2 Resultados Muestreo Celdas Rougher Centro, Cu.....	141
C.3 Resultados Muestreos Flujo de Agua de Lavado Columnas.	142
C.4 Resultados Muestreos Flujo de Aire Columnas.....	143

C.5 Resultados a distintos pH en Columnas.	145
C.6 Resultados Muestreos Nivel de Espuma en Columnas.	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama Operacional Flotación Selectiva Tórtolas II.	3
Figura 1.2: Diagrama Operacional Flotación Colectiva Tórtolas II.	4
Figura 2.1: Distribución general Operación Los Bronces.	8
Figura 2.2: Disposición General Planta de Molienda Confluencia.....	9
Figura 2.3: Disposición general Planta de Flotación Las Tórtolas II.....	10
Figura 2.4: Planta de Pebbles de Confluencia.	11
Figura 2.5: Diagrama Operacional Planta de Molienda Confluencia.....	13
Figura 3.1: Mecanismo de acción de colector Xantato.....	19
Figura 3.2: Estructura molecular de Colector Tinocarbamato.	19
Figura 3.3: Estructura molecular de colector Ditiofosfato.	19
Figura 3.4: Zonas Columna de Limpieza.....	20
Figura 3.5: Esquema explicativo del Holdup y representación gráfica de columna.....	21
Figura 3.6: Distribución de tamaños de burbuja para (a) flujo bajo de aire (17 l/s) y (b) flujo alto de aire (57 l/s).	22
Figura 3.7: Variación del tamaño medio de burbuja (d_{10}) con el flujo de aire.	22
Figura 3.8: Estructura cristalina de la molibdenita.....	23
Figura 3.9: Efecto de la concentración del ion Ca^{2+} en la Recuperación de Mo.	24
Figura 3.10: Hidrólisis del ácido sulfhídrico.	26
Figura 5.1: Gastos mensuales Planta Selectiva II en USD, Las Tórtolas.....	32
Figura 5.2: Distribución de los egresos en planta selectiva II, Las Tórtolas.....	33
Figura 5.3: Distribución de gastos de los materiales en planta selectiva.	33
Figura 5.4: Distribución de los gastos de los reactivos en planta selectiva.	34
Figura 5.5: Ingresos mensuales Planta Selectiva II en USD, Las Tórtolas.	35
Figura 5.6: Utilidades históricas Planta Selectiva II en USD, Las Tórtolas.....	36

Figura 5.7: Ley Alimentación Selectiva v/s Recuperación Selectiva.	41
Figura 5.8: Ley de alimentación Pta Moly v/s Ley de Concentrado.....	42
Figura 5.9: Ley de Alimentación Planta Colectiva v/s Recuperación Colectiva.....	44
Figura 5.10: Distribución normal del tonelaje alimentado a la planta selectiva.	46
Figura 5.11: Ley de Alimentación Planta de Moly v/s Ley de Alimentación Planta Colectiva.	52
Figura 5.12: Leyes de alim planta con colectiva como variable independiente.....	53
Figura 5.13: Recuperación global v/s Ley de alimentación a planta colectiva.....	54
Figura 5.14: Árbol funcional del cálculo de la utilidad producida en planta.	55
Figura 5.15: Ejemplo de cálculo, obtención utilidad turno y día.	56
Figura 5.16: Iteración Ley de Corte, según utilidad cero.....	57
Figura 5.17: Utilidad Acumulada Real y Estimada de diciembre 2013, Pta Moly.	58
Figura 5.18: Histograma Leyes de concentrado, Planta II 2013.....	61
Figura 5.19: Circuito de Limpieza Planta Selectiva II	62
Figura 5.20: Esquema regresión lineal paso a paso.	65
Figura 5.21: Distribución de residuos correspondientes al 1er trimestre 2013.....	69
Figura 5.22: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 1er trimestre, Valor Modelo v/s Real.....	70
Figura 5.23: Distribución de residuos correspondientes a 2do trimestre 2013.....	73
Figura 5.24: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 2do trimestre, Valor Modelo v/s Real.....	74
Figura 5.25: Distribución de residuos correspondientes a 3er trimestre 2013.....	77
Figura 5.26: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 3er trimestre, Valor Modelo v/s Real.....	78
Figura 5.27: Distribución de residuos correspondientes a 4to trimestre 2013.....	81

Figura 5.28: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 4to trimestre, Valor Modelo v/s Real.....	82
Figura 5.29: Distribución de residuos correspondientes al año 2013.....	86
Figura 5.30: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto Anual, Valor Modelo v/s Real	86
Figura 5.31: Cinética de Flotación Rougher, 04-11-2013, CuT	92
Figura 5.32: Cinética de Flotación Rougher, 04-11-2013, MoT.....	93
Figura 5.33: Estimación de parámetros para García Zúñiga y Klimpel, 04-11-2013, MoT.....	96
Figura 5.34: Estimación de parámetros para García Zúñiga y Klimpel, 04-11-2013, CuT.	96
Figura 5.35: Perfil de leyes Mo de Flotación Rougher.....	100
Figura 5.36: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Agua de Lavado. 19-02-2014 TB.	102
Figura 5.37: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Agua de Lavado. 17-02-2014 TB.	103
Figura 5.38: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Aire 06-03-2014 TB.....	107
Figura 5.39: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Aire 20-03-2014 TB.....	107
Figura 5.40: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos valores de pH. 06/01/2013 TB-TC-TA.....	112
Figura 5.41: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos valores de pH. 29/01/2013 TA-TB-TC-TA-TB	112
Figura 5.42: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Niveles de Espuma. 11-02-2014 TB.	113
Figura 5.43: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Niveles de Espuma. 19-02-2014 TB.	114

Figura C-1: Cinéticas Flotación Rougher para Cu. 15/10-21/10-28/10-05/11-11/11-18/11	138
Figura C-2: Cinéticas Flotación Rougher para Mo. 15/10-21/10-28/10-05/11-11/11-18/11	140
Figura C-3: Perfil de Leyes Cu de Flotación Rougher, 04/03-17/03-16/04-23/04.....	141
Figura C-4: Resultados muestreos flujos de agua de lavado.	142
Figura C-5: Resultados muestreos flujos de aire.	144
Figura C-6: Resultados Al variar pH.....	146
Figura C-7: Resultados muestreos Nivel de espuma.	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Costos por turno planta selectiva, de julio 2012 a diciembre 2013.....	37
Tabla 5.2: Finos de Mo/turno para alcanzar Costo/turno mensual.....	38
Tabla 5.3: Finos de Mo de acuerdo a nueva condición.....	39
Tabla 5.4: Iteración Leyes de Alimentación Pta Moly según fino utilidad cero.....	47
Tabla 5.5: Leyes Alimentación Planta Colectiva según cada Polinomio.....	48
Tabla 5.6: Tratamientos alimentados a planta Colectiva según cada polinomio.....	49
Tabla 5.7 Costos de producción 2013.....	59
Tabla 5.8 Leyes de Concentrado v/s Acumulado, 2013.....	60
Tabla 5.9: Costos asociados a 9 días de reproceso.....	61
Tabla 5.10: Costos asociados a 10 días de reproceso.....	62
Tabla 5.11: Costos por reproceso con pérdidas para 9 días.....	63
Tabla 5.12: Costos por reproceso con pérdidas para 10 días.....	63
Tabla 5.13: Estadísticas de la regresión Primer Trimestre 2013.....	66
Tabla 5.14 Análisis Anova Primer Trimestre 2013.....	67
Tabla 5.15 Regresión Lineal Primer Trimestre 2013.....	67
Tabla 5.16: Estadísticas de la regresión corregida Primer Trimestre 2013.....	68
Tabla 5.17 Análisis Anova corregida Primer Trimestre 2013.....	68
Tabla 5.18 Regresión Lineal corregida Primer Trimestre 2013.....	69
Tabla 5.19: Estadísticas de la regresión Segundo Trimestre 2013.....	71
Tabla 5.20: Análisis Anova Segundo Trimestre 2013.....	71
Tabla 5.21: Regresión Lineal Segundo Trimestre 2013.....	71
Tabla 5.22: Estadísticas de la regresión corregida Segundo Trimestre 2013.....	72
Tabla 5.23 Análisis Anova corregida Segundo Trimestre 2013.....	72
Tabla 5.24 Regresión Lineal corregida Segundo Trimestre 2013.....	73

Tabla 5.25: Estadísticas de la regresión Tercer Trimestre 2013	75
Tabla 5.26 Análisis Anova Tercer Trimestre 2013	75
Tabla 5.27 Regresión Lineal Tercer Trimestre 2013	76
Tabla 5.28: Estadísticas de la regresión corregida Tercer Trimestre 2013	76
Tabla 5.29 Análisis Anova corregida Tercer Trimestre 2013.....	77
Tabla 5.30 Regresión Lineal corregida Tercer Trimestre 2013	77
Tabla 5.31: Estadísticas de la regresión Cuarto Trimestre 2013.....	79
Tabla 5.32 Análisis Anova Tercer Cuarto 2013.....	79
Tabla 5.33 Regresión Lineal Cuarto Trimestre 2013.....	79
Tabla 5.34: Estadísticas de la regresión corregida Cuarto Trimestre 2013.....	80
Tabla 5.35 Análisis Anova corregida Cuarto Trimestre 2013	80
Tabla 5.36 Regresión Lineal corregida Cuarto Trimestre 2013.....	81
Tabla 5.37: Estadísticas de la regresión Año 2013	82
Tabla 5.38 Análisis Anova Año 2013.....	83
Tabla 5.39 Regresión Lineal Año 2013	83
Tabla 5.40: Estadísticas de la regresión corregida Año 2013	84
Tabla 5.41 Análisis Anova corregida Año 2013.....	84
Tabla 5.42 Regresión Lineal corregida Año 2013	84
Tabla 5.43: Resumen de coeficientes para cada tiempo estudiado.	85
Tabla 5.44: Estadística descriptiva de cada variable del modelo final	87
Tabla 5.45: Análisis de Sensibilidad de cada variable en el modelo final	88
Tabla 5.46: Leyes y Recuperaciones de muestreos realizados en circuito rougher....	90
Tabla 5.47: Muestra Planta II, Cinética Flotación Rougher CuT, 04-11-2013 TB.....	92
Tabla 5.48: Muestra Planta II, Cinética Flotación Rougher MoT, 04-11-2013 TB.	93
Tabla 5.49: Resultados Estimación de parámetros para García y Zúñiga, Klimpel.....	95

Tabla 5.50: Tiempos de Flotación García y Zúñiga, Klimpel e Interpolación Logarítmica para Cobre.....	96
Tabla 5.51: Tiempos de Flotación García y Zúñiga, Klimpel e Interpolación Logarítmica para Molibdeno.....	97
Tabla 5.52: Datos según diseño para Escalamiento tiempos laboratorio a Planta.....	98
Tabla 5.53: Resultados para Q_p , V_c y Número de Celdas.....	98
Tabla 5.54: Escalamiento tiempos laboratorio a Planta	99
Tabla 5.55: Rangos de operación Columna, muestreos flujos de agua de lavado....	102
Tabla 5.56: Diferencia de enri. para el Agua, a Bajas leyes de Alim. Mo	104
Tabla 5.57: Diferencia de enri. para el Agua, a leyes Medias de Alim. Mo	104
Tabla 5.58: Diferencia de enri. para el Agua, a leyes Altas de Alim. Mo	104
Tabla 5.59: Utilidad para enriquecimiento de 0.025 y 0.006 de Mo.	105
Tabla 5.60: Diferencia de enriquecimiento a leyes Altas de Alim. Mo Rango II	105
Tabla 5.61: Utilidad para enriquecimiento de 0.025 para leyes altas de Mo.	106
Tabla 5.62: Rangos de operación Columna, muestreos flujo de Aire.	106
Tabla 5.63: Diferencia de enri. para el Aire, a Bajas leyes de Alim. Mo	109
Tabla 5.64: Diferencia de enri. para el Aire, a leyes Medias de Alim. Mo	109
Tabla 5.65: Diferencia de enriquecimiento para el Aire, a leyes Altas de Alim. Mo...	109
Tabla 5.66: Utilidad para enriquecimiento de 0.001, 0.022 y 0.051 de Mo.....	110
Tabla 5.67: Rangos de operación Columna, muestreos nivel de espuma.	113
Tabla 5.68: Diferencia de enri. para espuma, a leyes Bajas de Alim. Mo	115
Tabla 5.69: Diferencia de enri. para espuma, a leyes Medias de Alim. Mo.....	115
Tabla 5.70: Diferencia de enri. para espuma, a leyes Altas de Alim. Mo	115
Tabla 5.71: Utilidad para enriquecimiento de 0.038 de Mo.	116
Tabla B.1: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 1er Trimestre	126
Tabla B.2: Anova, Primera prueba, 1er trimestre	126

Tabla B.3: Regresión, Primera prueba, 1er trimestre	126
Tabla B.4: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 1er trimestre.....	127
Tabla B.5: Anova, Segunda prueba, 1er trimestre	127
Tabla B.6: Regresión, Segunda prueba, 1er trimestre	127
Tabla B.7: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 2do trimestre	128
Tabla B.8: Anova, Primera prueba, 2do trimestre	128
Tabla B.9: Regresión, Primera prueba, 2do trimestre	128
Tabla B.10: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 2do trimestre.....	129
Tabla B.11: Anova, Segunda prueba, 2do trimestre	129
Tabla B.12: Regresión, Segunda prueba, 2do trimestre	129
Tabla B.13: Estadísticas de la regresión, Tercera prueba, 2do trimestre.....	129
Tabla B.14: Anova, Tercera prueba, 2do trimestre	130
Tabla B.15: Regresión, Tercera prueba, 2do trimestre	130
Tabla B.16: Estadísticas de la regresión, Cuarta prueba, 2do trimestre	130
Tabla B.17: Anova, Cuarta prueba, 2do trimestre	130
Tabla B.18: Regresión, Cuarta prueba, 2do trimestre.....	131
Tabla B.19: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 3er trimestre	131
Tabla B.20: Anova, Primera prueba, 3er trimestre	131
Tabla B.21: Regresión, Primera prueba, 3er trimestre	131
Tabla B.22: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 3er trimestre.....	132
Tabla B.23: Anova, Segunda prueba, 3er trimestre	132
Tabla B.24: Regresión, Segunda prueba, 3er trimestre	132
Tabla B.25: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 4to trimestre	133
Tabla B.26: Anova, Primera prueba, 4to trimestre	133
Tabla B.27: Regresión, Primera prueba, 4to trimestre	133

Tabla B.28: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 4to trimestre.....	134
Tabla B.29: Anova, Segunda prueba, 4to trimestre	134
Tabla B.30: Regresión, Segunda prueba, 4to trimestre	134
Tabla B.31: Estadísticas de la regresión, Tercera prueba, 4to trimestre.....	134
Tabla B.32: Anova, Tercera prueba, 4to trimestre	135
Tabla B.33: Regresión, Tercera prueba, 4to trimestre	135

NOMENCLATURA

SAG: Molienda Semiautógena.

CuT: Cobre Total.

MoT: Molibdeno Total.

PDLB: Proyecto de Desarrollo Los Bronces.

LC: Ley de Corte.

Cp: Costo de Producción.

Vm: Valor del Mineral.

UM: Unidad de Material.

CM: Costos Mina.

CP: Costos Planta.

C_{FR}: Costos Fundición / Refinación.

Rec: Recuperación.

P_{Me} : Precio del Metal.

ϵ_g : Holdup.

Maxisaco: Saco de almacenamiento de concentrado de Mo con 1.5 ton de capacidad.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Los Bronces, perteneciente a Anglo American dentro de su proyecto de expansión construyó una planta concentradora de 87000 t/d de capacidad, que opera en conjunto con la actual planta Los Bronces. Se contemplan tres áreas físicas: Los Bronces, con chancado primario y transporte de mineral, Confluencia, con molienda SAG, Chancado de Pebbles, Espesamiento de mineral y Planta de Cal; y Las Tórtolas, con Flotación Colectiva, Planta de Moly, Espesamiento y filtrado de Concentrado de Cobre, Espesamiento de Relaves, Planta de Reactivos y Sistema de Recuperación de Aguas de Tranque.

En la nueva Planta Las Tórtolas o Planta II, se procesa mineral proveniente del yacimiento de tipo pórfido cuprífero, con el objetivo de recuperar concentrados de cobre y molibdeno, para su posterior venta o procesamiento en Chagres, fundición de Anglo Sur. Estos concentrados deben alcanzar valores comerciales del 28% de CuT y 48% de MoT y recuperaciones alineadas a los presupuestos de la división, que se componen de un 90% para el Cu y un 50% para el Mo.

La Recuperación Global de Mo, depende de la recuperación que se obtenga en planta colectiva y en planta selectiva, siendo desde la puesta en marcha de planta II, en sólo dos meses, alcanzar los valores de recuperación deseados, en septiembre de 2013 por stock acumulado, y en diciembre 2013, por buen control y operación de las plantas, especialmente la selectiva.

Este escenario deja entre ver que es necesario tomar acción en ambas plantas con el objetivo de cumplir con los presupuestos establecidos a corto y largo plazo, para situar a la Planta Las Tórtolas como un productor de concentrado de molibdeno, que cumple en estándares de calidad y recuperaciones dentro del escenario nacional.

1.1 PLANTA DE FLOTACIÓN SELECTIVA TÓRTOLAS II.

La planta de Moly está diseñada para un tratamiento de 2330 t/d de concentrado colectivo Cu-Mo, produciendo en promedio 19 t/d de concentrado de Mo con ley de 50.5% Mo y 2.5% Cu. El circuito de flotación está compuesto por una primera etapa rougher seguido por tres etapas de limpieza en contracorriente (el concentrado alimenta la etapa siguiente mientras que el relave se recircula a la etapa anterior).

Desde el espesador de concentrado Cu-Mo, de 48 m de diámetro, con descarga gravitacional, se alimenta al acondicionador 1, de 200 m³ de capacidad provisto de agitador, luego el concentrado es dirigido a la flotación rougher, consistente en 12 celdas autoaspirantes y encapsuladas de 500 pie³ (14.16 m³) de capacidad, en arreglo 3-3-3-3, la flotación de primera limpieza consiste en 3 celdas autoaspirantes y encapsuladas de 300 pie³ (8.50 m³) de capacidad en línea con las celdas rougher, la flotación de segunda limpieza, consiste en 2 celdas autoaspirantes y encapsuladas de 300 pie³ (8.50 m³) de capacidad, posteriormente viene la tercera limpieza que consiste en una celda columnar encapsulada de 2.4 m de diámetro y 12 m de altura, la descarga por el fondo de la columna se recircula a la 2da limpieza y el concentrado se alimenta al espesador de concentrado Moly, desde el cual se alimenta a 3 estanques de almacenamiento, donde posteriormente pasara el concentrado al filtro y secador, con el objetivo de reducir la humedad, finalmente, se almacena el concentrado seco en maxisacos de 1 a 1.5 t para su posterior despacho. El diagrama explicado se ve en la Fig. 1.1.

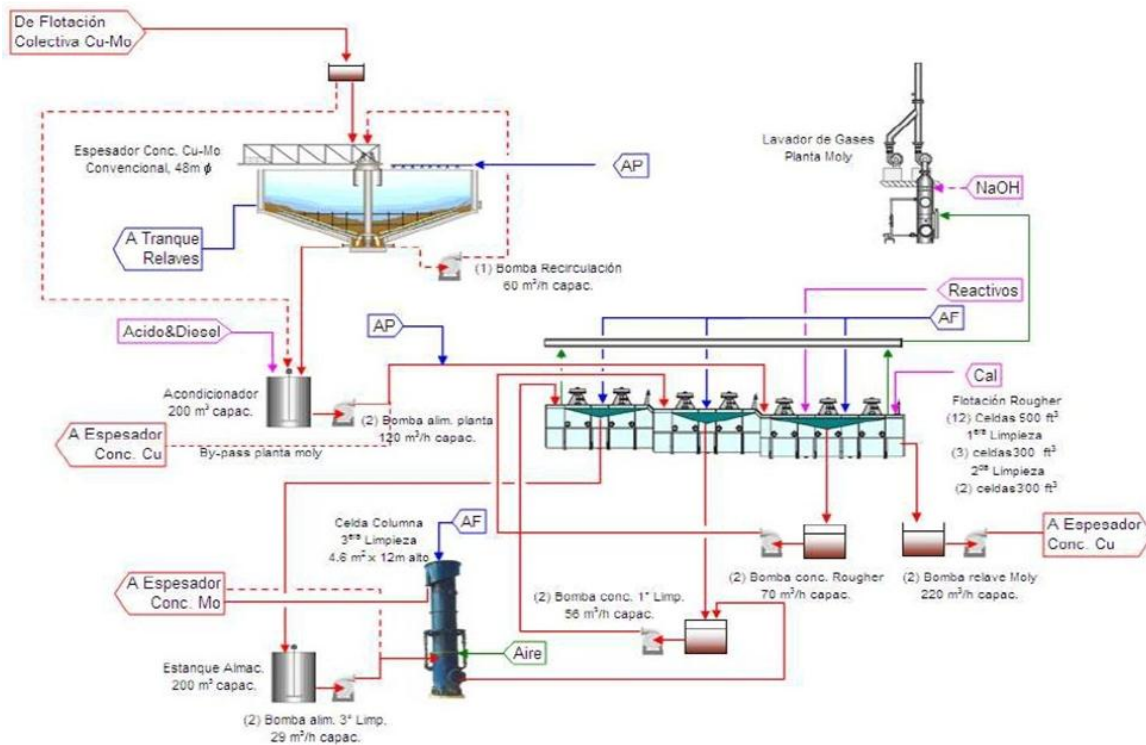


Figura 1.1: Diagrama Operacional Flotación Selectiva Tórtolas II.

1.2 PLANTA DE FLOTACIÓN COLECTIVA TÓRTOLAS II.

La planta tiene una capacidad de procesamiento de 3816 t/h, con una ley de alimentación nominal de 0.84% Cu; con una producción promedio de 2330 t/d de concentrado Cu – Mo (concentrado mixto) con leyes nominales de 27.5% Cu y 0.45% Mo.

El circuito de operación contempla, flotación primaria (rougher), remolienda de los concentrados primarios y scavenger, flotación de limpieza y flotación de scavenger. Los concentrados son enviados al espesador mixto, previo a la planta de Moly; mientras que los relaves finales (mezcla de relaves rougher y scavenger), son conducidos al espesador de relaves, cuya descarga se envía al tranque, vía la nueva canaleta que distribuye por el sector Sur – Oeste del tranque, permitiendo la descarga en diversos puntos hasta el muro Oeste.

La planta de Flotación Colectiva considera, un cajón de recepción del mineroducto, otro cajón distribuidor que alimenta la flotación rougher, ésta

contempla 21 celdas convencionales autoaspirantes de 257 m³ de capacidad, distribuidas en 3 filas, con 7 celdas por fila; el concentrado se conduce al cajón de alimentación ciclones de 200 m³ de capacidad, donde 3 bombas centrífugas horizontales de 2700 m³/h de capacidad, alimentan el flujo a 2 baterías de 14 hidrociclones de 20 pulg (50.8 cm) de diámetro, el underflow pasa a los 3 molinos verticales de 1500 hp cada uno, dotados de bombas de alimentación de 650 m³/h con motores de 90 kW. El overflow pasa a un cajón de 150 m³, con dos bombas centrífugas horizontales de 4000 m³/h de capacidad que alimentan las 4 celdas columnares de sección circular de 5 m de diámetro (20 m² de área) y 14 m de altura total. El relave de la columna es dirigido a la flotación scavenger, que la constituyen 1 fila con 7 celdas autoaspirantes de 257 m³ de capacidad. El relave de la flotación scavenger se une al de la flotación rougher y se dirige al espesamiento de relaves, mientras que el concentrado de la flotación de limpieza se alimenta al espesamiento de concentrado mixto Cu-Mo. El diagrama operacional se presenta en la Fig. 1.2.

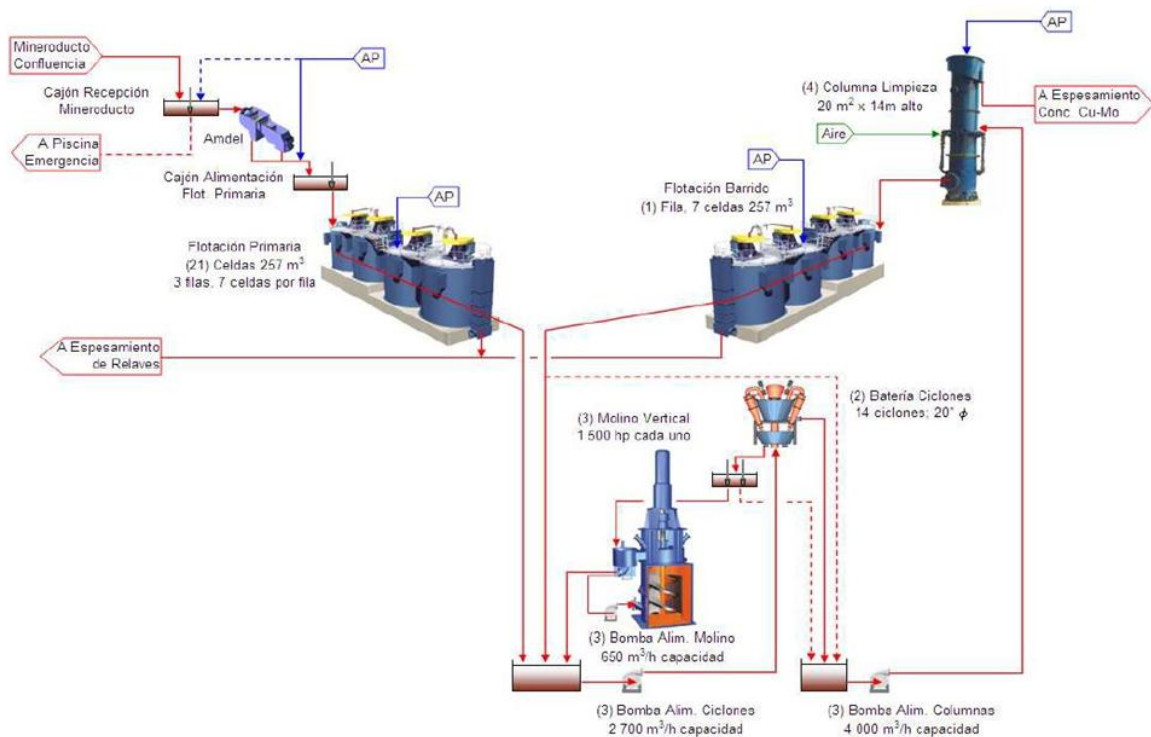


Figura 1.2: Diagrama Operacional Flotación Colectiva Tórtolas II.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo operacional de la planta de flotación las Tórtolas es producir concentrados de calidad comercial, es decir sobre el 28% para el Cu y 48% para el Mo al menor costo posible, utilizando de manera más eficiente los recursos; junto con asegurar buenas recuperaciones, para así cumplir los presupuestos (Budget y Short Term) de producción y así entregar utilidades positivas a la compañía.

Para este año 2014, el mercado de venta de concentrado de molibdeno se ha vuelto más competitivo, ya que el último Benchmarking muestra que las recuperaciones globales de las otras seis concentradoras que comercializan Mo superan a Los Bronces. Al existir una mayor oferta, a Los Bronces se le exigió mayor calidad por parte de Moly, disminuyendo drásticamente por contrato, la cantidad de sacos que se podían comercializar con ley inferior al 48%.

Este nuevo escenario llevo a Anglo American a fijarse metas de producción en la Moly, tanto a corto como largo plazo y es por eso que en lo que a recuperación respecta, se trabaja por un 65% de recuperación colectiva, 80% en la recuperación selectiva y por lo tanto un 50% de recuperación global aproximadamente.

Por otro lado, pese a las exigencias de la compañía, dificulta que siendo el molibdeno un subproducto del cobre, hay periodos de tiempo donde se explotan fases, con bajas leyes en Mo y altas en Cu, siendo una problemática para la operación ya que a concentraciones muy bajas en la alimentación a la planta, se hace imposible flotar el Moly, incurriendo en gastos de energía y reactivos de la planta selectiva principalmente, pero sobre todo llegando a productos finales sin valor comercial, que solo servirían para ser reprocesados, produciendo perdidas en relaves y costos extras.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Optimización de la recuperación metalúrgica y ley de concentrado de molibdeno en Planta II, Las Tórtolas.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Hallar ley de corte de Mo en Planta Selectiva, Las Tórtolas II.
2. Realizar modelo multivariable de la ley de Mo en concentrado mixto.
3. Establecer mejoras que aseguren aumentos en la ley de alimentación a la Planta de Moly.

CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA

2.1 ANGLO AMERICAN

Anglo American es uno de los grupos mineros más grandes del mundo, empleando a un total de 100000 personas. Sus activos mineros de alta calidad incluyen metales del grupo platino, diamantes, cobre, mineral de hierro, carbón térmico y metalúrgico y níquel. Sus operaciones se encuentran en África, Europa, Norte y Sudamérica, Australia y Asia.

Dentro de su unidad de negocio Cobre, Anglo American, es una de las tres empresas mineras más importantes en Chile. Sus operaciones están conformadas por cinco divisiones productivas en el centro y norte del país: Los Bronces, Mantos Blancos, El Soldado, Mantoverde y Chagres. Además, la empresa posee el 44% de la propiedad de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.

La producción en 2013 registró un aumento del 17% en su producción de cobre fino respecto del año anterior, alcanzando un récord anual de 774800 toneladas, debido al mejor desempeño operacional de Los Bronces y Collahuasi.

2.2 DIVISIÓN LOS BRONCES

Los Bronces se encuentra ubicado en la Región Metropolitana a 65 kilómetros de Santiago a 3500 msnm, donde se ubica el yacimiento que es de tipo pórfido cuprífero, las plantas de molienda y la planta de cátodos, mientras que la planta de flotación se encuentra en la comuna de Colina a 40 km de Santiago.

En Los Bronces se extrae minerales de cobre oxidados y sulfurados, los primeros son tratados en la Planta de cátodos de San Francisco, donde ocurren los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electro-obtención, mientras que los Sulfuros son tratados en la Planta Los Bronces y la nueva planta Confluencia, donde ocurre la etapa de chancado primario, molienda SAG, molienda convencional y pre-chancado. Posteriormente estos concentrados son trasladados mediante un mineroducto de 56 km, a Planta de Flotación Las Tórtolas I y II. La totalidad del proceso productivo se puede observar en Fig. 2.1.

La producción en Los Bronces este 2013 alcanzó las 416300 toneladas de cobre fino, aumentando en un 14% con respecto al anterior y 3344 toneladas de molibdeno, versus las 981 toneladas de 2012, impulsado por la puesta en marcha de la planta de flotación selectiva Tórtolas II.



Figura 2.1: Distribución general Operación Los Bronces.

2.3 PROYECTO DE DESARROLLO LOS BRONCES

La puesta en marcha de PDLB produjo sus primeros concentrados en octubre de 2011, sin embargo el espesador de relaves, equipo de suma importancia en la recuperación del recurso hídrico de la planta comenzó su funcionamiento a finales de 2012 y la planta de Moly, empezó a producir sacos de concentrado con mayor frecuencia en julio del mismo año.

PDLB se divide en dos procesos de concentración de mineral, divididos principalmente por su zona geográfica, la planta de conminución y la de flotación que tienen por objetivo y parámetros de operación lo siguiente:

El objetivo de las operaciones unitarias de chancado primario y transporte de mineral en Los Bronces y de molienda y espesamiento de mineral en Confluencia, mostradas esquemáticamente en la Fig. 2.2, es procesar 87000 t/d de mineral obteniendo un producto con granulometría media de 80% bajo 180 micrómetros, en una pulpa con 60% de sólidos en peso y un pH entre 9 y 11.

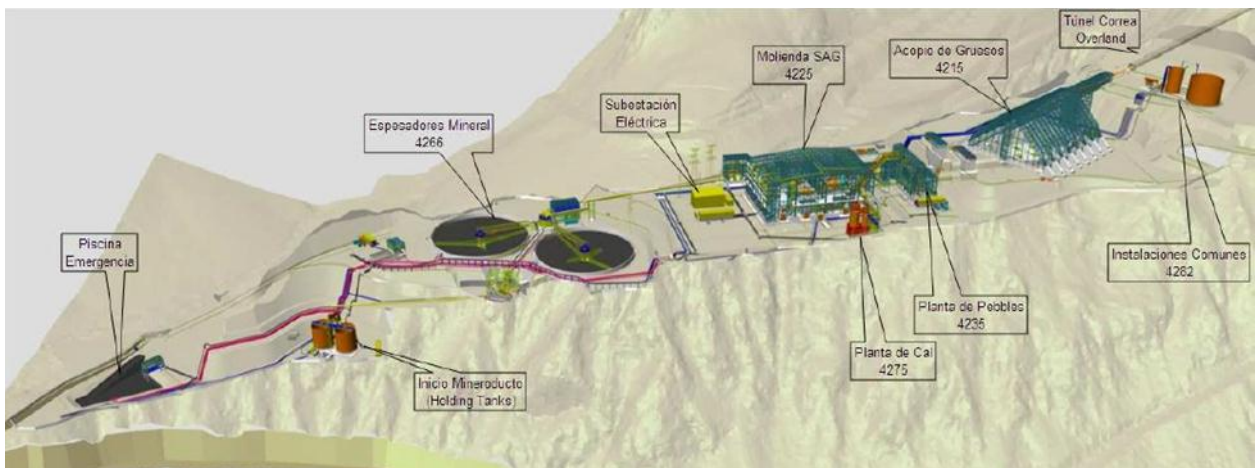


Figura 2.2: Disposición General Planta de Molienda Confluencia.

Mientras que el objetivo de la nueva planta Las Tórtolas, que se representa en la Fig. 2.3, es recuperar el cobre y molibdeno contenido en el mineral proveniente de Confluencia y producir concentrados de calidad comercial, que para los primeros años de operación, se estima en:

Concentrado de Cobre: 27 – 29% de Cu con un 8 – 9% de humedad.

Concentrado de Moly: 50 – 52% de Mo, con un 3 – 4% de humedad.

La planta de filtrado y envasado del concentrado de moly operará sólo 12 horas por día, mientras que la planta de filtrado de concentrado de cobre considera operación continua con una utilización efectiva del 75%.

Parámetros nominales de producción en nueva planta Las Tórtolas son:

Tratamiento: 87000 t/d (74000 – 100000 t/d)

Recuperación Cu: 87 – 88%

Recuperación Mo: 73% (81% en flotación Colectiva y 90% en planta de Moly).



Figura 2.3: Disposición general Planta de Flotación Las Tórtolas II.

2.4 ANTECEDENTES GENERALES DEL PROCESO

2.4.1 Planta de Chancado de Pebbles

Se considera una generación de pebbles nominal equivalente al 20% de la alimentación fresca al molino SAG, 17400 t/d (725 t/h), sin embargo el sistema de transporte de pebbles acepta hasta 1500 t/h. El producto debe tener como máximo un 15% sobre ½ pulg (13 mm), este producto tiene como destino normal su recirculación a los molinos de bolas, sin embargo existe la posibilidad de enviarlo en forma total o parcial al SAG o incluso descartarlos del circuito. Los principales equipos se mencionan a continuación y su diagrama se observa en la Fig. 2.4 el diagrama mencionado.

- ❖ (2) Chancador de cono MP-1000, motor de 750 kW, 385 a 575 t/h capacidad.

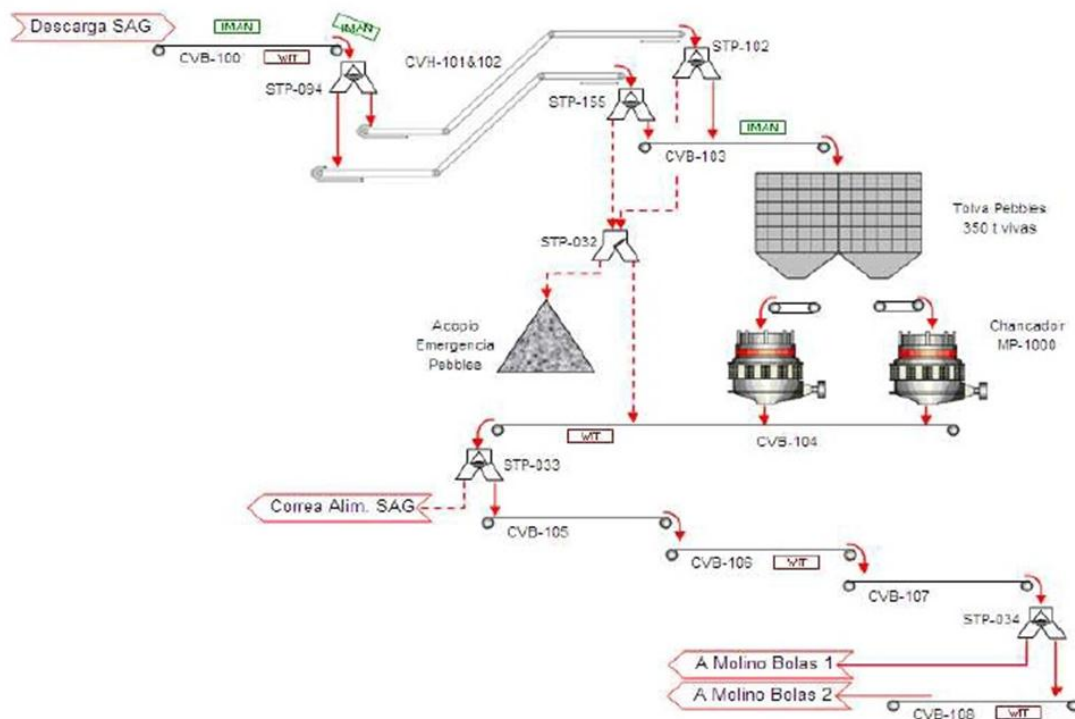


Figura 2.4: Planta de Pebbles de Confluencia.

2.4.2 Planta de Molienda Confluencia

El objetivo general de la operación de la planta de molienda es maximizar el tonelaje tratado cuidando de no exceder el tamaño máximo que se haya definido para el producto final, atendiendo a las restricciones o puntos críticos que puedan aparecer en los diversos equipos y sistemas del circuito.

El circuito comprende una sección de molienda SAG con dos molinos de bolas, chancado de pebbles y harneros desripiadores. La planta tiene una capacidad de procesamiento nominal de 3816 t/h y su producto una granulometría nominal de 80% bajo 180 μm (aprox. 83% - # 65Ty).

El mineral alimentado por la correa Overland desde la estación de transferencia, llega a Confluencia donde existe un acopio de gruesos o Stockpile, desde donde por intermedio de seis alimentadores de correa de 1.83 m x 13 m con 2300 t/h de capacidad, con dos en operación continua se alimenta a una correa llamada "alimentación SAG" de 1.52 m x 221 m, con 5300 t/h de capacidad y de velocidad variable que se une con la alimentación del chancado de pebbles y alimenta al molino SAG de 40 x 25.5 pies (12.19 m x 7.47 m) de 22000 kW de potencia, a la salida del SAG están dos harneros, uno en operación de 12 x 24 pies (3.66 m x 7.31 m) encargado de la clasificación de tamaño, el over se alimenta a chancado de pebbles, mientras que el under va la cuba de recepción, cuba que también es alimentada por el grueso de los dos molinos de bolas que trabajan en paralelo, de 26 x 41.5 pies (7.92 m x 12.65 m) de 16400 kW de potencia. Desde la cuba de gruesos se alimentan las baterías de ciclones a través de cuatro bombas centrifugas de 9500 m³/h de capacidad, con 3000 kW de potencia, con motor de velocidad variable. Las baterías constan de 14 ciclones de 26 pulg (66.04 cm) de diámetro y además se consta de dos sistemas de monitoreo de tamaño de producto PSI-300.

El overflow de los ciclones se envía a espesamiento de relaves, donde se lleva el porcentaje de sólidos a un rango entre 35 – 40%, para posteriormente ser transportado vía mineroducto, a planta de flotación Las Tórtolas II.

En la Fig. 2.5 se presenta el flowsheet del proceso anteriormente descrito:

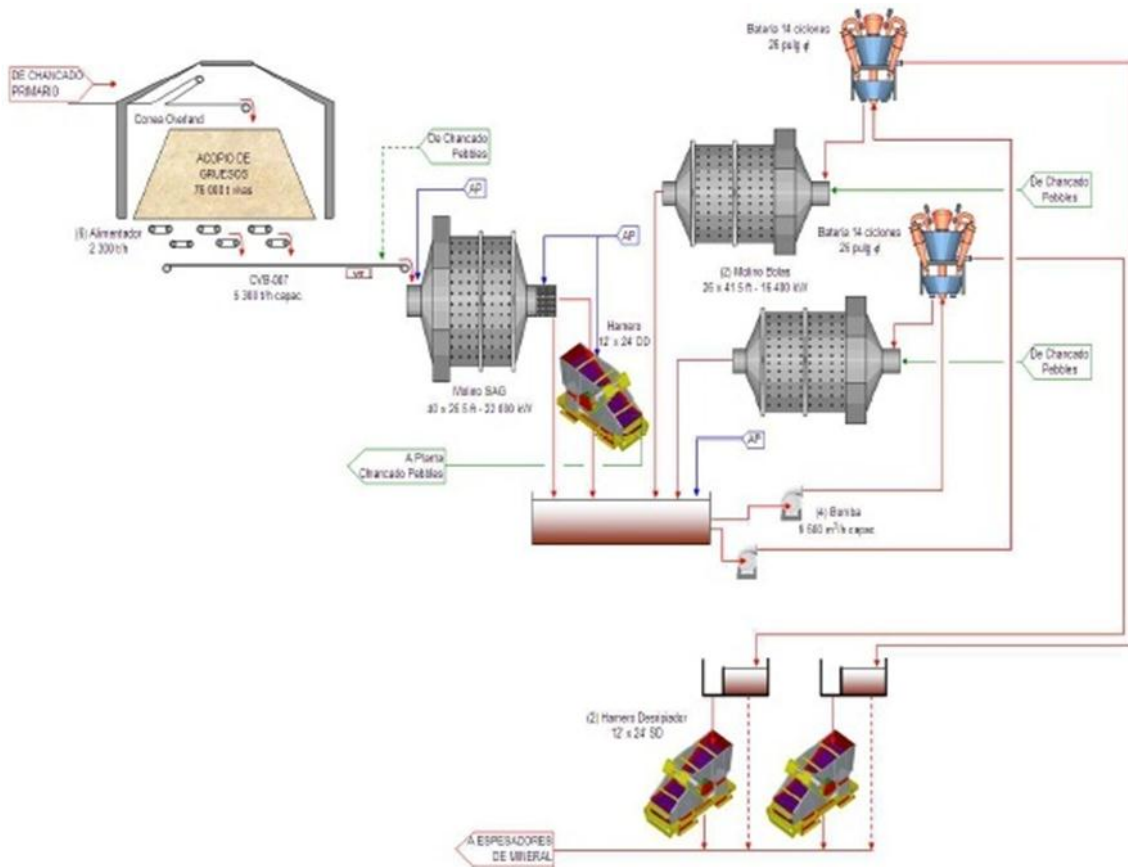


Figura 2.5: Diagrama Operacional Planta de Molienda Confluencia.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA LEY DE CORTE

3.1.1 Fundamentos de la Ley de Corte ^[1]

La ley de corte (LC) es aquella ley de mineral, cuyo valor es igual al costo de producción (Cp); es decir, corresponde a la ley de mineral en que no se producen ni pérdidas ni ganancias. La ley de mineral es expresada en términos de porcentaje, mientras que el valor del mineral (Vm) y el costo de producción (Cp) son expresados en \$/t de mineral.

Bajo este concepto, leyes superiores a la LC darán ganancias, considerándose como mineral económicamente explotable; en cambio leyes inferiores a la LC darán pérdidas, no recomendables para su explotación.

La ley de corte, será aquella ley mínima cuyo valor cubre todos los costos involucrados en el proceso minero (producción + procesamiento + comercialización) y equivale al costo indispensable para que la reserva minera resulte económicamente rentable.

Los límites que se establecen para un yacimiento mineral, particularmente en los casos en que la ley decrece gradualmente, son determinados totalmente en base a consideraciones económicas y no pueden estar delimitados por ninguna característica geológica particular. Si el precio de un metal aumenta entonces es posible bajar la ley de corte y aumentar el tonelaje de reservas. Esto produce una baja de la ley global del yacimiento, pero si el ritmo de producción se mantiene, aumenta la vida de la mina. Las leyes varían de un depósito a otro y claramente a menor ley se requiere un tonelaje mayor para hacer económico un depósito. La tendencia general en las últimas décadas en la minería metálica ha sido explotar menas de leyes cada vez más bajas. Lo que ha llevado al desarrollo de operaciones mineras a mayor escala, superiores a 70000 t/d.

3.1.2 Formulación de la Ley de Corte

Para calcular la ley de corte se debe considerar tanto el costo mina como el costo planta, los cuales generalmente varían durante la vida útil de explotación, ya que las distancias para el transporte del mineral como del estéril varían, además el tratamiento de planta cambia dependiendo de las características del mineral que se explote y los costos de energía y reactivos no son constantes en el transcurso de los años.

Se sabe que la ley de corte es función de:

$$LC = f(\text{Costos de Operación}, \text{Recuperación}, \text{Precio Metal}) \quad (1)$$

Donde:

Costos de operación:

- ❖ Costos Mina (US\$/ton Material).
- ❖ Costos Planta (US\$/ton Mineral).
- ❖ Costos Fundición / Refinación (US\$/lb).

$$LC = \frac{CM\left(\frac{US\$}{ton}\right) + CP\left(\frac{US\$}{ton}\right)}{\frac{2204.6(lb)}{1(ton)} \cdot \frac{Rec(\%)}{100} \cdot (P_{Me} - C_{FR})} \cdot 100 \quad (2)$$

El desarrollo de la ecuación (2) se encuentra en el Anexo A.1.

3.1.3 Ley de Corte de Molibdeno, consecuente con proceso selectivo

Si bien se ha hecho un alcance bibliográfico sobre cómo se calcula la ley de corte para yacimientos mineros, donde en el caso de yacimientos polimetálicos es posible llevar el estudio a la totalidad de los metales, no correspondería en el caso de este estudio, asignar costos de la mina y de la fundición y/o refinación, al cálculo de la ley de corte de molibdeno, ya que como subproducto del cobre, sería ilógico que este metal lograra financiar la totalidad de los costos. Por lo tanto, se tomó la decisión para hacer lo más consecuentemente posible la obtención de los resultados, considerar solamente los costos planta, producto del funcionamiento de la planta selectiva.

Por lo tanto de la ecuación de ley de corte se puede deducir que las variables a perseguir son los costos de la Planta de Moly, la Recuperación y el Precio del concentrado de Molibdeno, durante el período de estudio.

Las principales tareas serán reunir los costos asociados al proceso planta de Moly y trabajar con las recuperaciones que se involucran en el proceso. Para que la ley de alimentación, pase a ser una ley de concentrado comercial, debe recorrer dos plantas, la colectiva y la selectiva, con comportamientos totalmente diferentes, por lo tanto sus recuperaciones en relación al molibdeno también lo serán.

3.2 METODOLOGÍA DE LA OBTENCIÓN DEL MODELO ESTADÍSTICO DE LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO

3.2.1 Análisis de Regresión Lineal Múltiple [2]

Se define como un procedimiento mediante el cual se trata de determinar si existe o no relación de dependencia entre dos o más variables. Es decir, conociendo los valores de una variable independiente, se trata de estimar los valores de una o más variables dependientes. La regresión en forma gráfica, trata de lograr que una dispersión de las frecuencias sea ajustada a una línea recta o curva.

Este análisis nos entrega entre los valores más relevantes el coeficiente de determinación (R^2), que nos da cuenta de que tan representativo es el modelo. Normalmente se espera que este valor sea lo más cercano a uno, pero en modelos llevados a variables de flotación generalmente no se supera el 0.6.

Además nos entrega el Anova o Análisis de Varianza, desde el cual se observa si hay vinculación o no entre las variables. El valor más significativo es la prueba F, esta prueba tiene como hipótesis que no hay relación entre la variable independiente y las variables dependientes, por lo que para validar esta suposición el valor de F debe ser menor que el “valor crítico de F”, es decir se necesita que el “valor crítico de F” sea menor que F, para que se rechace la hipótesis de que no hay vinculación entre las variables, y de esta forma se valida la hipótesis alternativa de que si hay vinculación.

Posteriormente se entrega el límite de confianza que se utilizará como criterio de selección o desecho de variables. El límite que se utilizará será del 95%, lo que significa que se acepta un 5% de azar en los resultados. El criterio de descarte será que si los límites de confianza superior e inferior tienen distinto signo, la variable se desecha.

Una vez que se desechan las variables que presenten conflicto, el análisis de regresión se vuelve a realizar hasta que todas las variables se ajusten. Posteriormente se pasa a analizar los residuos, calculando las diferencias entre

las mediciones reales y las pronosticadas por el modelo. Al graficar los residuos, estos deberían distribuirse de forma simétrica a ambos planos del eje X, a lo largo de la cantidad de datos. Como esta forma de aceptar el modelo pareciera ser bastante subjetiva, el criterio utilizado será definir que si el 75% de las predicciones tienen un error menor al $\pm 5\%$, el modelo se valida.

Por último, con el modelo ya validado, se realiza el análisis de sensibilidad de cada variable, para determinar cuál de ellas posee el mayor impacto sobre la variable independiente. Esto se determina mediante el producto de la desviación estándar y el coeficiente de regresión de cada variable. Al tener el producto de cada variable, la que en valor absoluto tenga el mayor valor, será la que tenga mayor predominancia en el modelo.

3.3 FLOTACIÓN COLECTIVA DE CONCENTRADOS Cu-Mo.

3.3.1 Reactivos Flotación Colectiva ^[3]

La flotación es un proceso fisicoquímico que tiene como objetivo la separación selectiva de partículas minerales valiosas, las que son colectadas en forma de concentrado, mientras que las partículas no valiosas o ganga, son eliminadas como cola de flotación. Es así como los mecanismos de cómo se adsorben los colectores sobre la superficie de los minerales sulfurados; y cómo se logra la hidrofobización, constituyen los objetivos básicos y fundamentales de la teoría de la flotación. Es por esto que a continuación se dará hincapié en los colectores más utilizados en la flotación colectiva, para la producción de concentrados mixtos.

Los colectores usados en la flotación de cobre son conocidos como tiólicos o sulfidrílicos. Los principales son los xantatos, ditiofosfatos, tionocarbamatos y xantoforiatos; a continuación se revisa brevemente cada uno de estos.

Xantatos: Es de relevancia la longitud de la cadena hidrocarbonada, al aumentar su longitud, disminuye la solubilidad de la sal, pero el colector se hace más poderoso, sin embargo, se pierde selectividad. Los Xantatos forman sales poco

solubles con los metales pesados. Estos compuestos son hidrofóbicos lo que permite flotar sulfuros de cobre, su mecanismo de acción se ve en la Fig 3.1.

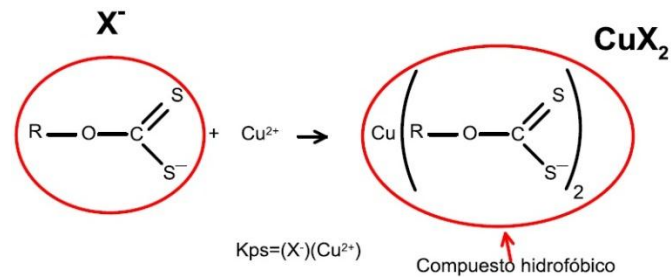


Figura 3.1: Mecanismo de acción de colector Xantato.

Tinocarbamatos: Colector derivado del xantato se utiliza para flotar calcopirita (CuFeS_2) y otras especies primarias como bornita (Cu_5FeS_4). Su estructura se muestra en Fig. 3.2.

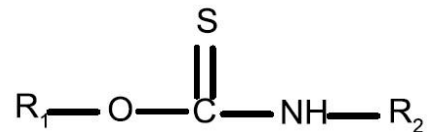


Figura 3.2: Estructura molecular de Colector Tinocarbamato.

Ditiofosfato: Colector, representado en Fig. 3.3, derivado del xantato que se utiliza para flotar calcosina (Cu_2S), covelina (CuS) y digenita (Cu_9S_5). Se usan en conjunto con los xantatos y requieren un tiempo de acondicionamiento mayor por lo cual se agregan en etapas anteriores a la flotación.

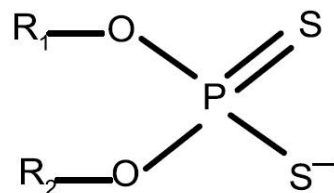


Figura 3.3: Estructura molecular de colector Ditiofosfato.

3.3.2 Flotación Columnar [4]

El funcionamiento de las celdas columnares, presenta los mismos principios fisicoquímicos de las celdas convencionales, siendo lo distinto la cinética, que es mucho más rápida. A diferencia de las convencionales no utilizan agitadores mecánicos, la pulpa ingresa a unas $2/3$ partes de la zona inferior de la celda, donde se encuentra con una corriente de aire ascendente, que atrapa las partículas de interés en las burbujas. Al llegar a la superficie, el rebose se limpia con agua, removiendo la ganga o estéril, que se descarga por la parte inferior de la celda. En la Fig. 3.4 se detallan las distintas zonas que existen en la columna:

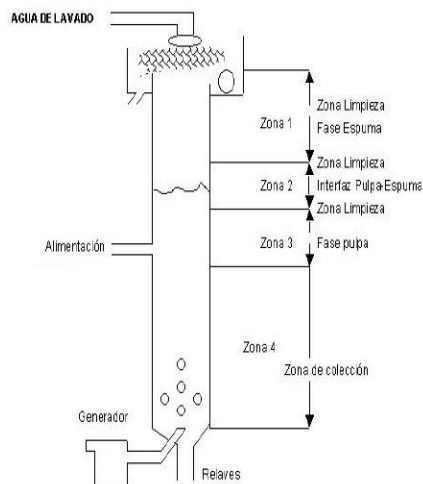


Figura 3.4: Zonas Columna de Limpieza.

Zona 1: Zona de limpieza, fase de espuma, desde interfaz hasta rebalse columna.

Zona 2: Zona de limpieza, interfaz pulpa- espuma, longitud arbitraria.

Zona 3: Zona de limpieza, fase pulpa, desde interfaz hasta tobera de alimentación.

Zona 4: Zona de colección, fase pulpa, desde tobera de alimentación hasta difusores.

El objetivo en la flotación columnar es aumentar la concentración del mineral obtenido en la etapa rougher para llevarlo a valores comerciales, manteniendo la

máxima recuperación posible. Es necesario recibir una alimentación estable a las columnas con flujos con bordeen los 2000 m³/h.

Como conceptos, es importante revisar los siguientes:

Holdup: Se define como el porcentaje de volumen en la columna usada por el aire en cualquier momento, el límite es 15%. Industrialmente se mide, instalando dos sensores de presión en la zona de colección de la columna, y conociendo la distancia a la que están instalados estos sensores, además del delta presión y la densidad de la pulpa, se puede calcular el Holdup. En la Fig 3.5 se infieren las variables determinantes del Holdup. [3]

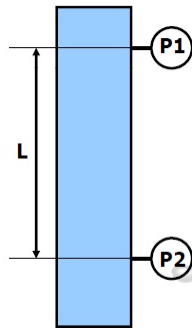


Figura 3.5: Esquema explicativo del Holdup y representación gráfica de columna.

$$\epsilon_g = 1 - \frac{(P_2 - P_1)}{\rho_{pulpa} \cdot L} \quad (3)$$

El desarrollo de la fórmula de Holdup se explica en el Anexo A.1.

Bias: Variable de control que representa la fracción de agua que fluye a través de la espuma y asegura una acción de limpieza. El Bias es positivo cuando el agua de lavado es superior al agua recuperada en el concentrado.

Coalescencia: Período de tiempo en el cual no puede extenderse el holdup en una columna, las burbujas colapsan y se crea una caída en la recuperación.

Las variables de estudio son las siguientes:

Flujo de Aire: este debe asegurar el transporte eficiente de las burbujas hasta la superficie de las columnas. Flujos excesivos, si bien pueden mejorar la recuperación, perjudican la ley del concentrado, que es el principal objetivo de la flotación columnar.

Los factores físicos que afectan la dispersión del gas en la celda de flotación son, principalmente, la velocidad del impeler, el tipo de impeler y el flujo de gas. A continuación en las Fig. 3.6 - 3.7 se presentan los comportamientos de los tamaños de burbuja a diferentes flujos de aire inyectado a las celdas. Se observa que a medida que aumenta el flujo de aire, también aumenta el diámetro de burbuja. [3]

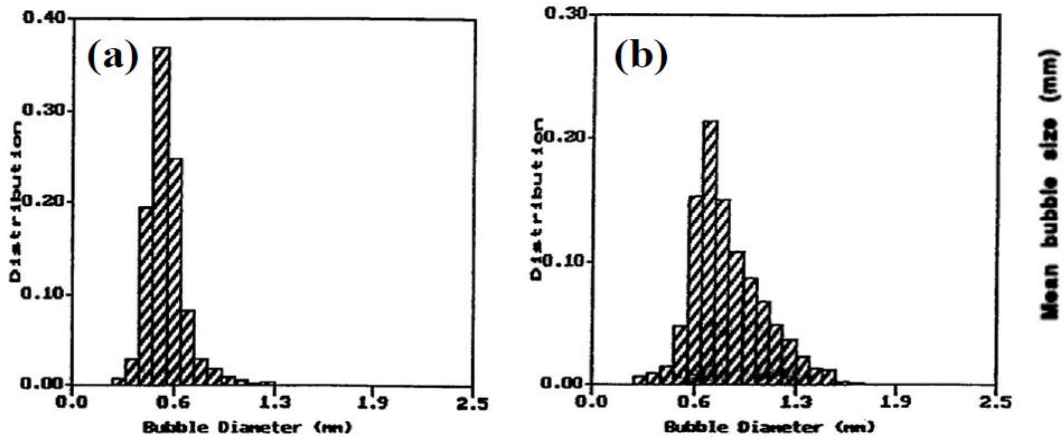


Figura 3.6: Distribución de tamaños de burbuja para (a) flujo bajo de aire (17 l/s) y (b) flujo alto de aire (57 l/s).

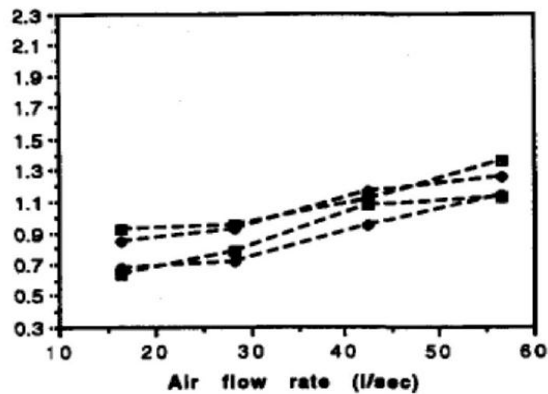


Figura 3.7: Variación del tamaño medio de burbuja (d_{10}) con el flujo de aire.

Nivel de Espuma: Es la Zona entre el rebose de la columna y la interfase espuma-pulpa. Variar su altura permite controlar la selectividad del proceso, normalmente las columnas operan con rangos entre 0.5-1.5 m.

Agua de Lavado: Lava las burbujas de la espuma para remover las partículas estériles atrapadas en ella y estabiliza la capa de espuma reponiendo el agua que pierde por efecto de la gravedad.

pH: Debe ajustarse a un valor tal que aumente la efectividad de los reactivos y deprima la pirita, con el objetivo de maximizar la ley de concentrado final. Debe buscarse el valor óptimo de pH, normalmente en el orden entre 9-12, que asegure los mejores resultados con el mínimo consumo de cal.

3.3.3 Flotación Selectiva de Concentrados Cu-Mo ^[5]

La molibdenita es un mineral cristalográfico laminar, dentro del cristal presenta dos tipos de enlace: los enlaces covalentes Mo-S, que al romperse generan sitios de alta reactividad llamados bordes o “edges”; y los enlaces de tipo Van der Waals S-S, que al romperse generan sitios de baja reactividad llamados caras o “faces”, como se puede observar en la Fig. 3.8. Es así como la hidrofobicidad y la flotabilidad natural de la molibdenita es atribuida al predominio de los sitios cara.

Estas superficies están determinadas por el hábito de fractura durante la molienda, siendo la fractura más probable en los bordes que en las caras.

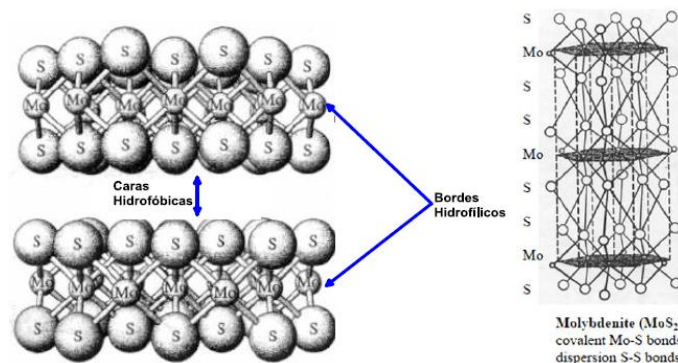


Figura 3.8: Estructura cristalina de la molibdenita

La separación de la Molibdenita de minerales como Calcosita, Bismutita, Pirita, Bornita y Calcopirita, entre otros, desde concentrados de cobre, ocurre a través del proceso de Flotación Selectiva o Diferencial.

El mineral debe ser acondicionado a un pH de 7.5 a 9.0, además del uso de reactivos como colectores y depresantes para llevar a cabo la flotación selectiva, tales como:

Modificadores: Para manipular los diferentes pH que tiene el proceso, se utilizan reactivos como Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), para modificar la acidez e Hidróxido de Calcio ($Ca(OH)_2$) para regular la alcalinidad en la pulpa.

La lechada de cal, como es conocida industrialmente, tiene un doble efecto en la flotación bulk, ya que en la flotación colectiva es necesario trabajar a pH básico para fomentar la depresión de la pirita y así no perjudicar la recuperación de cobre, pero está comprobado que para altas concentraciones de Calcio, la recuperación de molibdeno disminuye, como se muestra en la Fig. 3.9:

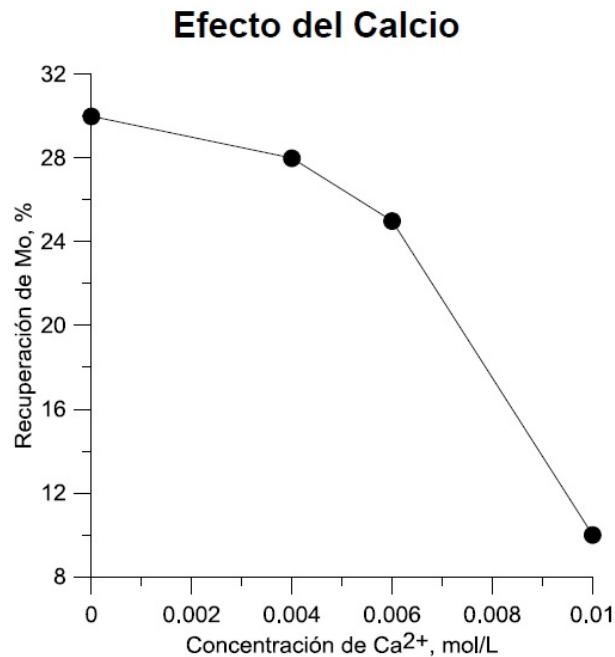


Figura 3.9: Efecto de la concentración del ion Ca^{2+} en la Recuperación de Mo.

La recuperación de Mo disminuye al aumentar la concentración de Ca^{2+} ya que la adsorción del compuesto hidrolizado de calcio sobre los bordes aumenta la capa de hidratación de éstos y a su vez el tiempo de inducción, provocando disminución de la recuperación. Como medida de solución en el acondicionamiento a la planta selectiva se adiciona ácido sulfúrico, que además de bajar el pH propicio de la depresión del Cu, limpia los bordes de la molibdenita, restaurando su flotabilidad natural.

Colector: A pesar de que las caras de las partículas de molibdenita tienen hidrofobicidad natural, la superficie no es perfectamente hidrofóbica, presentando sectores de inclusiones de minerales más afines al agua, para estos casos se ocupa colectores no polares como el Diesel, que cubren estas zonas de baja hidrofobicidad y así mejorarla globalmente en las partículas de molibdenita.

Depresante: Los depresantes de cobre son en relación al ión sulfhidrato (HS^-). Este ión produce desorción del colector y reducción del dixantógeno u otro disulfuro orgánico, lo que se traduce en una completa destrucción del recubrimiento de colector y en consecuencia, pérdida de la flotabilidad. El control del reactivo depresante se realiza por métodos electroquímicos, utilizando la técnica potenciométrica con electrodos de Pt, dado que los depresantes empleados son reductores y bajan el potencial de óxido reducción de la pulpa. De esta forma, se realiza un control de Eh en distintos puntos de la planta. En la Fig. 3.10 se muestra el diagrama que representa la hidrólisis del ácido sulfhídrico, donde se observa que el gas sulfhídrico está presente en solución a pH sobre 7, siendo esta la zona de trabajo, para depresar el Cu, donde además se debe trabajar a potenciales del orden de entre -450, -475 mV.

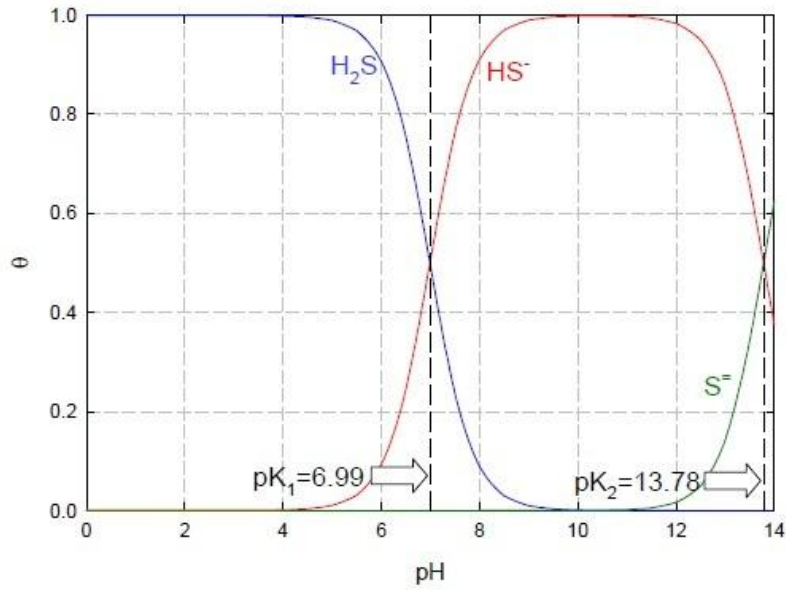
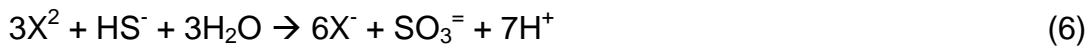
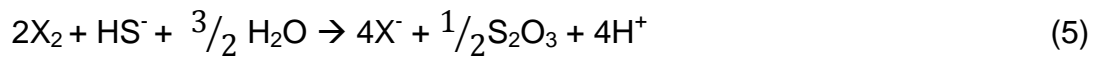
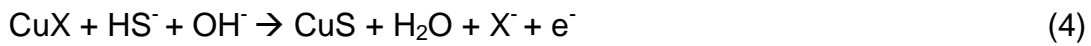


Figura 3.10: Hidrólisis del ácido sulfhídrico.

A continuación se explica el mecanismo de acción del depresante:



Estos efectos se traducen en una completa destrucción del recubrimiento de colector y en consecuencia, pérdida de la flotabilidad de los minerales de Cu y Fe.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DEL TRABAJO

4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En el desarrollo del trabajo se observan claramente cuatro etapas; en primer lugar la recopilación de información que se llevó a cabo principalmente a través del software, que funciona como complemento de Excel llamado PIDataLink; de él se extrajo toda la base de datos necesaria, ya que en esta plataforma se archivan los valores de las distintas mediciones que se realizan en planta, desde valores de leyes, niveles de celdas, pH, etc. Posteriormente estos datos fueron filtrados, eliminando errores de lectura, por parte de los analizadores en línea o de señal de los controladores, además para el análisis estadístico es de vital importancia que todas las variables a utilizar se contengan en la misma unidad de tiempo, por lo tanto si una de ellas no estaba presente se eliminaba del análisis, para reducir de mayor forma el error en las correlaciones buscadas. Por otro lado, otra fuente de información fue la plataforma Cubo, desde donde se extrajo todos los costos asociados a la Planta de Moly durante el periodo julio 2012 – diciembre 2013, en esta plataforma, el orden lo marcan las llamadas “naturalezas” que son códigos correspondientes a una cuenta de cargo, estas últimas cumplen como función almacenar de forma organizada cada egreso asociado a un proceso productivo de la división. Por ejemplo dentro de la planta II existe la subdivisión “RC_0421” que corresponde a la planta de moly, donde “RE_0075” corresponde a los costos asociados a materiales utilizados en ella, donde finalmente la “naturaleza 330”, hace alusión al costo asociado en gasto por el reactivo Sulfhidrato de Sodio.

4.2 LEY DE CORTE ASOCIADA A LEYES DE ALIMENTACIÓN

En segundo lugar utilizando estos datos, se procederá a realizar el cálculo de la ley de alimentación mínima de Mo a la Planta Colectiva, para producir utilidad cero en la Planta de Moly. Es importante destacar que en esta etapa, pese a que las recuperaciones de la planta dependen de más variables y no tan sólo de la ley de alimentación de Mo, el análisis es necesario hacerlo tomando en cuenta sólo este factor, ya que para pronósticos futuros, lo que se maneja en plan minero son las leyes del mineral en las fases existentes en la mina y estas no pueden ser manipuladas en gran medida, no así las variables de proceso. Por lo que a partir de los costos asociados al proceso selectivo, al precio del concentrado de molibdeno y las recuperaciones asociadas al circuito colectivo y selectivo se lleva a cabo el cálculo de la ley de corte y un modelo estadístico que asocia las leyes de alimentación con las recuperaciones, ley de concentrado y utilidades que se percibirían en el proceso.

4.3 MODELO ESTADÍSTICO ASOCIADO A LA LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO

En Tercer lugar una vez calculada la ley mínima de Mo de alimentación a la Planta Colectiva, mediante las correlaciones resultantes, se encontrará la ley de alimentación a la Planta Selectiva correspondiente al alimentar esta ley. A partir de esta ley que nos entrega el fino mínimo que se debe filtrar, para producir cero dólares de utilidad, se toma la oportunidad de mejorar la ley de alimentación a la Planta de Moly, analizando las variables más significativas de la flotación columnar de la Planta Colectiva. Para esto se realizará un modelo estadístico multivariable de la ley de Mo en el concentrado mixto, a través del método de regresión lineal multivariable, posteriormente se efectuará un análisis de sensibilidad hallando las variables de mayor incidencia en la ley de Mo en el concentrado mixto, enfocándose por lo tanto en el circuito de limpieza y rougher de la planta colectiva.

4.4 MEJORAS ASOCIADAS A PRUEBAS EXPERIMENTALES

Por último, una vez conocidas estas variables, se realizarán pruebas y muestreos en terreno, tratando de abarcar la mayor cantidad de muestras posibles, de esta forma se obtendrá una mayor fuente de datos y resultados representativos que ayuden a optimizar la ley que se alimenta a la Planta de Moly y así asegurar concentrados de calidad comercial y mejores recuperaciones. Estas variables serán: Ley de Mo en concentrado rougher, Flujo de aire, Flujo de agua de lavado y altura de espuma en columnas de limpieza, planta colectiva.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se resolverán los resultados obtenidos, en las distintas áreas de ésta investigación. En primer lugar se dará cuenta del paso a paso realizado para obtener la ley de corte de la planta selectiva y con esto las leyes de alimentación asociadas al circuito del molibdeno en planta de flotación Las Tórtolas II, que nos entregan la utilidad cero asociada a la data estadística desde la puesta en marcha hasta diciembre de 2013. En una segunda instancia se desarrollará el trabajo realizado para obtener el modelo que representa, bajo el mismo periodo de estudio, la ley de Mo que se alimenta a la planta selectiva, con el objetivo de, a partir del análisis de sensibilidad, en una tercera etapa, manipular estas variables en planta para hallar puntos óptimos de operación, que permitan mejorar, en su condición de variables dependientes, la ley alimentada a la planta selectiva y así optimizar el proceso productivo, tanto en calidad de concentrado como en recuperación.

5.1 OBTENCIÓN DE LA LEY DE CORTE

En el capítulo III se mencionó que en yacimientos donde la ley decrece gradualmente, los límites de extracción del yacimiento, así como extrapolándolo al continuo procesamiento de una planta selectiva, dependen totalmente de consideraciones económicas y no a características geológicas o funcionales de la planta. Por lo tanto, en función al precio del metal, su recuperación y los costos, se determina la viabilidad de operar o no la planta. Es por esto que se inicia el análisis con los costos del proceso, ya que el precio del concentrado lo fija el mercado y la recuperación se basa en estudios posteriores a encontrar el fino necesario para generar utilidad cero.

5.1.1 Análisis de Costos Planta Moly

A continuación se presentan los costos de la planta selectiva en áreas generales:

- ❖ Mano de Obra Supervisión
- ❖ Mano de Obra Empleados
- ❖ Electricidad / Agua Industrial
- ❖ Combustible y Lubricantes
 - ❖ Combustibles Gaseosos: Nitrógeno
 - ❖ Lubricantes, grasas y otros.
- ❖ Servicios Contratados
 - ❖ Servicios Contratados de Mantenimiento
 - ❖ Contratos de mantenimiento eléctrica operaciones.
 - ❖ Contratos de mantenimiento mecánica planta.
 - ❖ Arriendos
 - ❖ Transporte de materiales y suministros.
 - ❖ Servicios al Personal
 - ❖ Trabajos realizados por contratistas para mantenimiento.
 - ❖ Trabajos realizados por contratistas para operaciones.
 - ❖ Otros Servicios Contratados
 - ❖ Estudios y asesorías de contratos
- ❖ Materiales
 - ❖ Aceros
 - ❖ Reactivos
 - ❖ Ácido Sulfúrico
 - ❖ Sulfhidrato de Sodio
 - ❖ Diesel
 - ❖ Otros Reactivos: Soda, Antiespumante y Flotamín.
 - ❖ Repuestos
 - ❖ Equipos, repuestos y sistemas electrónicos.
 - ❖ Accesorios llaves y válvulas.
 - ❖ Repuestos para bombas.
 - ❖ Ítems Reparados.
 - ❖ Otros Materiales.
- ❖ Otros Costos Operacionales.

Los costos fueron obtenidos de la plataforma Cubo, donde se almacenan los costos de las distintas faenas de la empresa, desde julio de 2012 hasta diciembre de 2013, fecha de puesta en marcha de la planta hasta diciembre 2013. En el caso de los reactivos el costo informado, se confirmo en este trabajo de tesis, estudiando los consumos en planta de cada uno de ellos.

En la Fig. 5.1 se presentan los gastos mensuales percibidos por la planta de flotación selectiva:

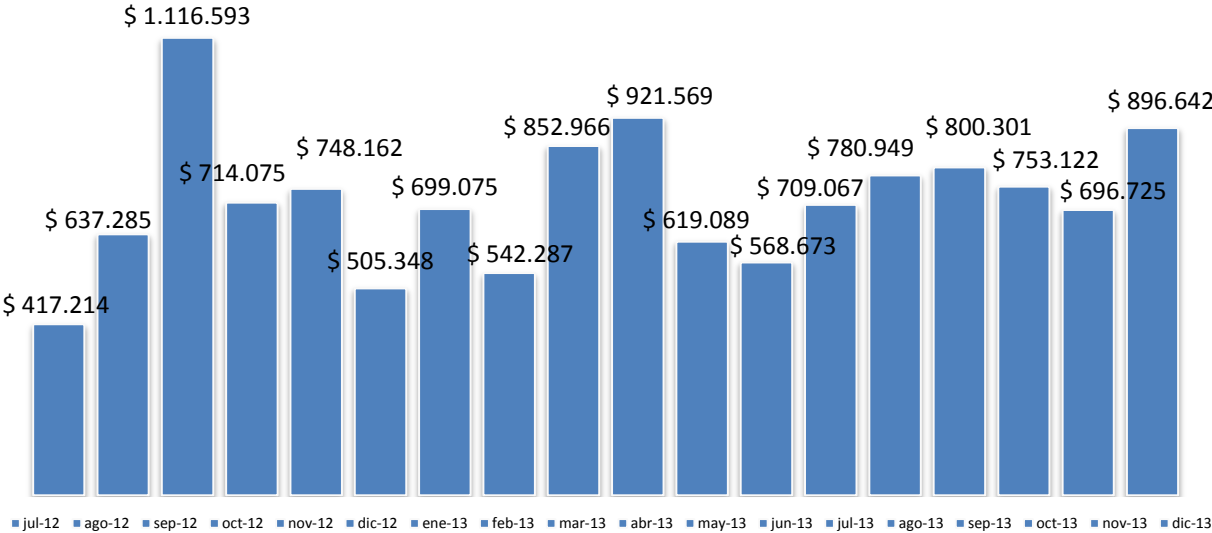


Figura 5.1: Gastos mensuales Planta Selectiva II en USD, Las Tórtolas.

Los egresos se pueden distribuir como se muestra en la Fig. 5.2:

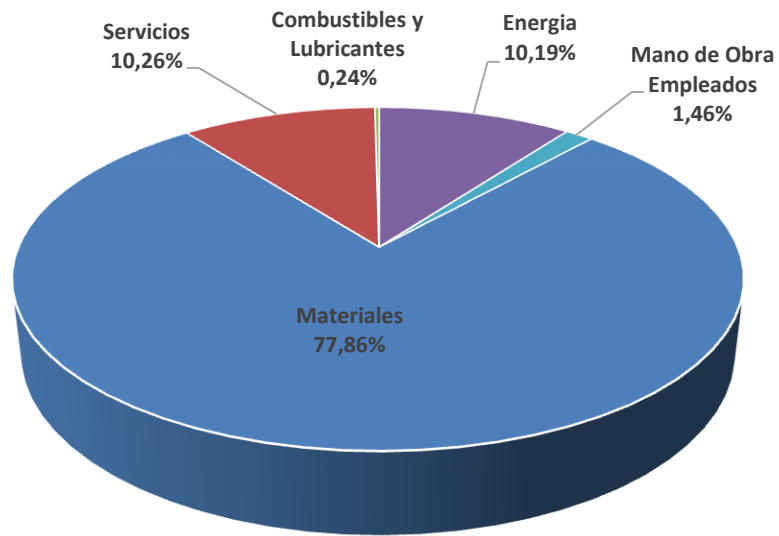


Figura 5.2: Distribución de los egresos en planta selectiva II, Las Tórtolas.

Cabe destacar que Mano de obra supervisión no se contabiliza ya que es un costo que no pertenece a Anglo American Sur, si no a Anglo American Chile. Por otro lado se puede observar que de USD\$8691888 (total egresos 2013), el 77.86% de los gastos de la planta están asociados a la compra de materiales, a continuación en Fig. 5.3 se detalla en qué consiste este total.

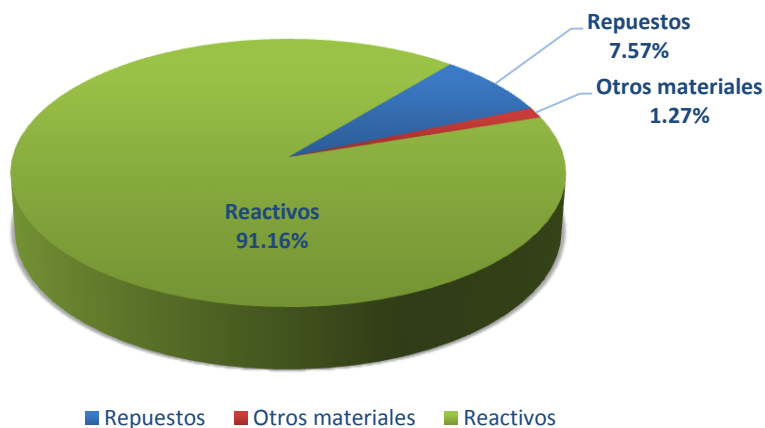


Figura 5.3: Distribución de gastos de los materiales en planta selectiva.

Con un gasto de USD\$6767097 en materiales la mayor cantidad de estos está asociados a reactivos, con un 91.16%, es decir el 70.97% de los gastos totales de la planta sólo corresponde a los reactivos utilizados en ella.

En la Fig. 5.4 se muestra el detalle de los reactivos utilizados en la flotación selectiva, y el costo asociado en el total.

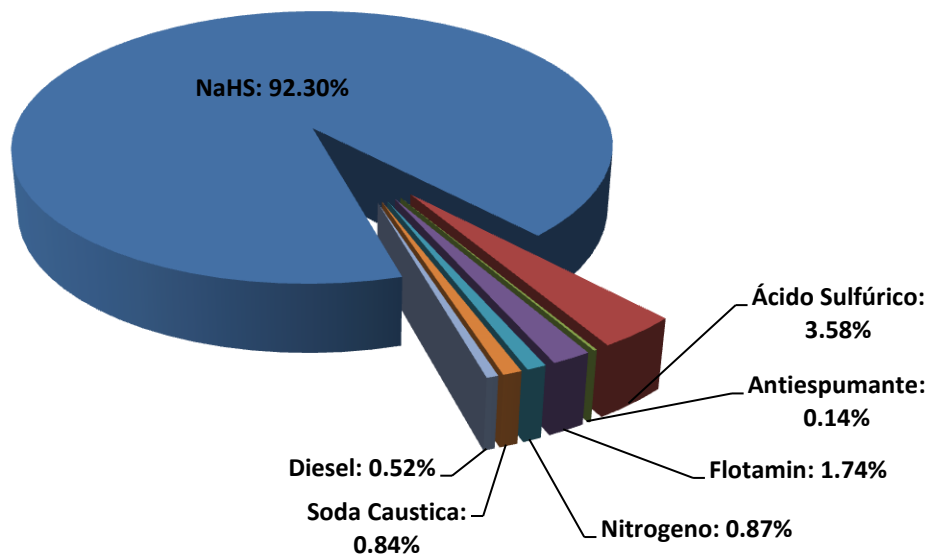


Figura 5.4: Distribución de los gastos de los reactivos en planta selectiva.

De los costos de los reactivos vistos en la Fig. 5.4, se puede observar que el Sulfhidrato de Sodio supera significativamente al resto de los reactivos, cabe destacar que el diesel, como colector primario de molibdeno aún no se lleva a dosificaciones de diseño, por lo que los consumos son muy bajos y puntales en lo que respecta del tiempo en operación de la planta.

Resumiendo, el Sulfhidrato corresponde al 65.51% de los egresos totales de la planta selectiva, por lo que cualquier mejora en la disminución de su consumo, reduciría de forma considerable los costos de la planta de moly.

Por razones operacionales, se puede deducir que los primeros meses no son muy representativos de los gastos reales de la planta, ya que la cantidad de finos

producidos, por concepto de puesta en marcha fueron muy reducidos, recién a partir del año 2013, la producción de molibdeno aumento hasta alcanzar valores de presupuesto.

En la Fig. 5.5 se muestran los ingresos de la planta, considerando que el valor del concentrado de Mo es de 11.5 USD/lb y un castigo metalúrgico de 97.75%, en el mismo periodo de estudio. Anexo A.3.1

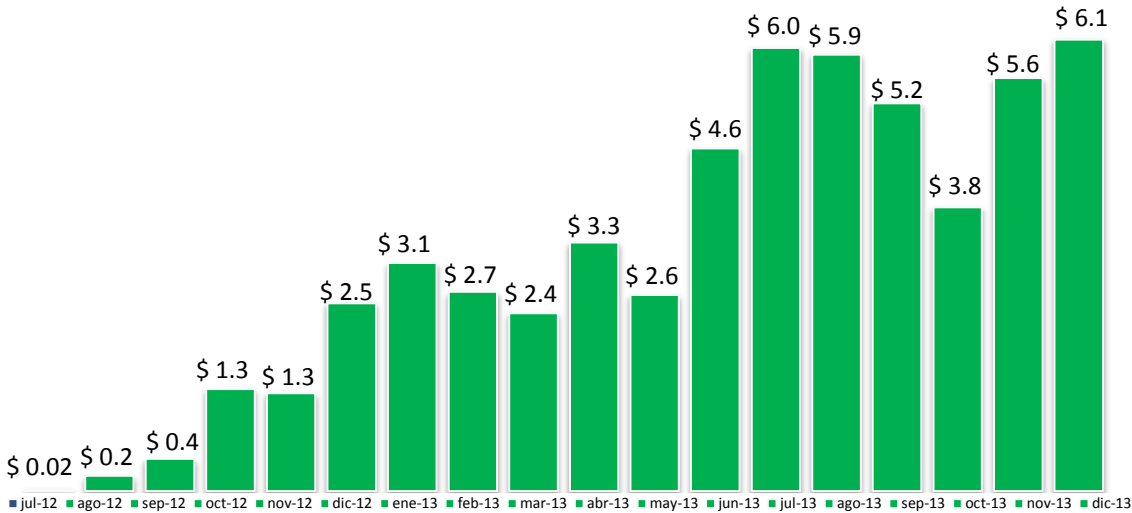


Figura 5.5: Ingresos mensuales Planta Selectiva II en MUSD, Las Tórtolas.

Finalmente, una vez calculados los ingresos de la planta y demostrados los costos, es posible obtener las utilidades históricas mensuales. Estas se presentan en la Fig. 5.6:

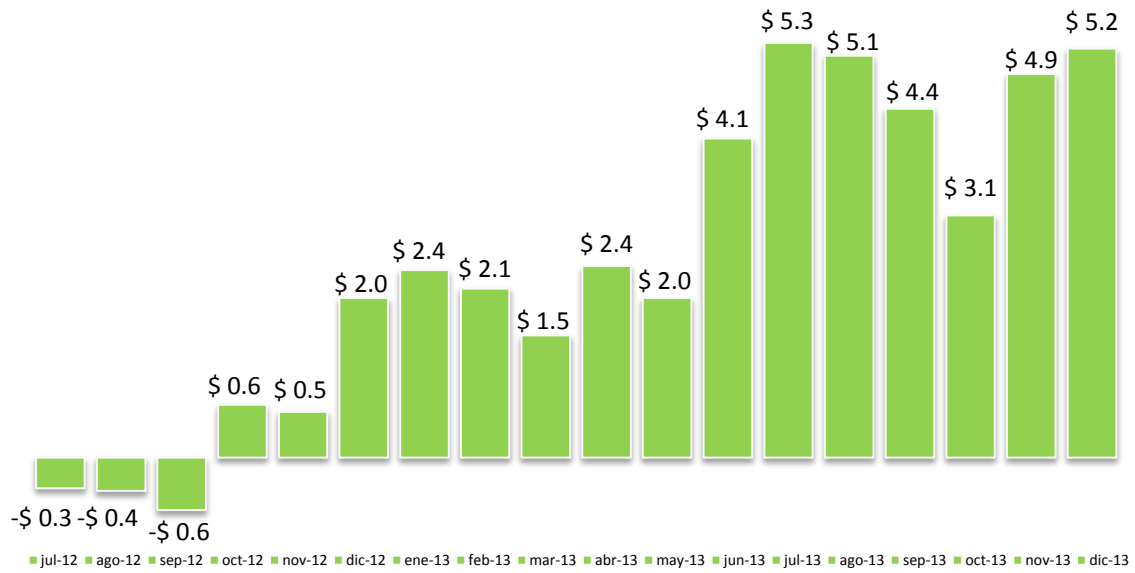


Figura 5.6: Utilidades históricas Planta Selectiva II en MUSD, Las Tórtolas.

Cabe destacar que en diciembre de 2013, se alcanzó una de las utilidades más altas, debido a una recuperación en la planta selectiva que alcanzó el 86%, logrando una recuperación global del 50%, Parámetro que es el presupuesto para el año 2014. Utilidades en Anexo A.3.2.

5.1.2 Fino Mínimo Requerido Para Utilidad Cero

En el capítulo 4, se mencionó que para tener una buena base de datos, estos debían pertenecer al mismo periodo de tiempo, por lo tanto al obtener los datos de PiDataLink, se filtraron todos los datos por turno, es decir cada ocho horas, ya que las leyes químicas de la planta se preparan armando un compósito durante las ocho horas del turno y luego se ingresan al sistema. Es por esto que los costos asociados a la planta selectiva, se tradujeron en costos por turno, como se indica en la tabla 5.1:

Tabla 5.1: Costos por turno planta selectiva, de julio 2012 a diciembre 2013.

Costos Por Turno	
Fecha	\$USD / Turno
jul-2012	5886
ago-2012	8252
sep-2012	13406
oct-2012	9078
nov-2012	8045
dic-2012	6834
ene-2013	8649
feb-2013	6456
mar-2013	9500
abr-2013	10403
may-2013	7190
jun-2013	6606
jul-2013	8390
ago-2013	9273
sep-2013	9916
oct-2013	9282
nov-2013	8503
dic-2013	10642
Máximo	13406
Mínimo	5886
Media	8684

Los meses con altos costos de procesamiento por turno se clasifican en meses con gastos de mantención programada y el mes que cae en el mínimo costo que es julio 2012, lo está, por concepto de puesto en marcha.

Por consiguiente, la media del periodo en estudio tiene un valor de 8684 USD/turno, por lo tanto de la ecuación vista en ingresos, detallada en el Anexo A.2.1, despejando los Finos de Mo (ton), se obtiene los puntos de inflexión asociados a los costos, mostrados en la tabla 5.2:

Tabla 5.2: Finos de Mo/turno para alcanzar Costo/turno mensual.

	Puntos de Inflexión	
	Fino por Turno (ton)	Fino por día
jul-2012	0.238	0.713
ago-2012	0.333	0.999
sep-2012	0.541	1.623
oct-2012	0.366	1.099
nov-2012	0.325	0.974
dic-2012	0.276	0.827
ene-2013	0.349	1.047
feb-2013	0.261	0.782
mar-2013	0.383	1.150
abr-2013	0.420	1.259
may-2013	0.290	0.870
jun-2013	0.267	0.800
jul-2013	0.339	1.016
ago-2013	0.374	1.123
sep-2013	0.400	1.200
oct-2013	0.375	1.124
nov-2013	0.343	1.029
dic-2013	0.429	1.288
Máximo	0.541	1.623
Mínimo	0.238	0.713
Media	0.350	1.051

Es así como la tabla nos indica los valores de fino por turno que debieron ser filtrados, para alcanzar a cubrir los costos de operación de la planta selectiva. La media nos muestra que para un costo de operación de USD\$8684/turno, se deben producir 0.350 toneladas de fino de molibdeno, esto llevado al día, es un poco más de una tonelada y considerando que la ley de concentrado debiese ser del orden

del 48%, el gasto operacional de la planta se costea con un poco más de dos maxisacos de una tonelada al día.

Revisando estos valores con Control de procesos se decidió dar un margen de contingencia del 15%, es decir aumentar los USD\$8684 en USD\$10000 y de esta forma acercarse más al valor del gasto en meses donde se tenga mantenciones programadas u ocurra cualquier imprevisto.

Con el nuevo escenario, se obtuvo la condición mostrada en la tabla 5.3:

Tabla 5.3: Finos de Mo de acuerdo a nueva condición.

Nueva Condición	
Con USD\$10000 por turno	
404	Kg Fino/Turno
1211	Kg Fino/Día
1.21	Ton Fino/Día
36.32	Ton/Mes

Basado en la nueva condición se fija el costo operacional de la planta selectiva en USD\$10000 por turno, siendo necesario producir 0.404 t/turno para alcanzar la utilidad cero.

5.1.3 Polinomio Ley Alim. Selectiva – Recuperación Selectiva

Como se mencionó en el capítulo III, de la ecuación de ley de corte utilizada para yacimientos mineros y llevada al contexto planta, se dedujo que las variables a encontrar eran los costos asociados a la Planta Selectiva, el valor de venta del concentrado de Molibdeno y la Recuperación. Una vez que ya se ha trabajado en los primeros ítems, queda por ver la recuperación global.

Bien se sabe que la recuperación global en sistemas de flotación Cu-Mo depende de la recuperación colectiva y la selectiva. Por lo tanto, en esta sección se revisará la relación existente entre la Ley de alimentación a la planta de Moly y la Recuperación Selectiva.

Los rangos de alimentación a la planta selectiva, producto de la planta colectiva, fluctúan entre 0.02 y 1.00%, puntualmente alcanzando valores superiores al 1.00%. Es así, desde la data obtenida del sistema, se filtraron los valores correspondientes a fallas operacionales de los flujos de alimentación, concentrado y relave de la planta selectiva y se calculó la recuperación metalúrgica a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Recuperación Selectiva} = \frac{\text{Ley Conc Columna} \cdot (\text{Ley Alim Pta Moly} - \text{Ley Relave Moly})}{\text{Ley Alim} \cdot (\text{Ley Conc Columna} - \text{Ley Relave Moly})} \quad (7)$$

Cabe destacar que pese a que la ley de concentrado columna, no corresponde a la ley de concentrado final, ya que difiere entre 1 y 2 puntos porcentuales de esta, se utiliza esta medición como concentrado final, por la razón de que a continuación de la columna se alimenta el concentrado al espesador de relave y posteriormente a tres estanques de almacenamiento a la espera del filtrado y esto ocurre cada 12 horas o según la exigencia operacional. Por lo tanto, se pierde el seguimiento de la ley de alimentación a la planta de moly, que es la variable independiente que se busca relacionar con la recuperación selectiva, no así la ley en el concentrado columna que se obtiene continuamente.

Una vez calculadas las recuperaciones para el periodo de estudio, se ordenan las leyes de alimentación a la Planta de Moly, se grafican y se obtiene la tendencia, presentada en la Fig. 5.7:

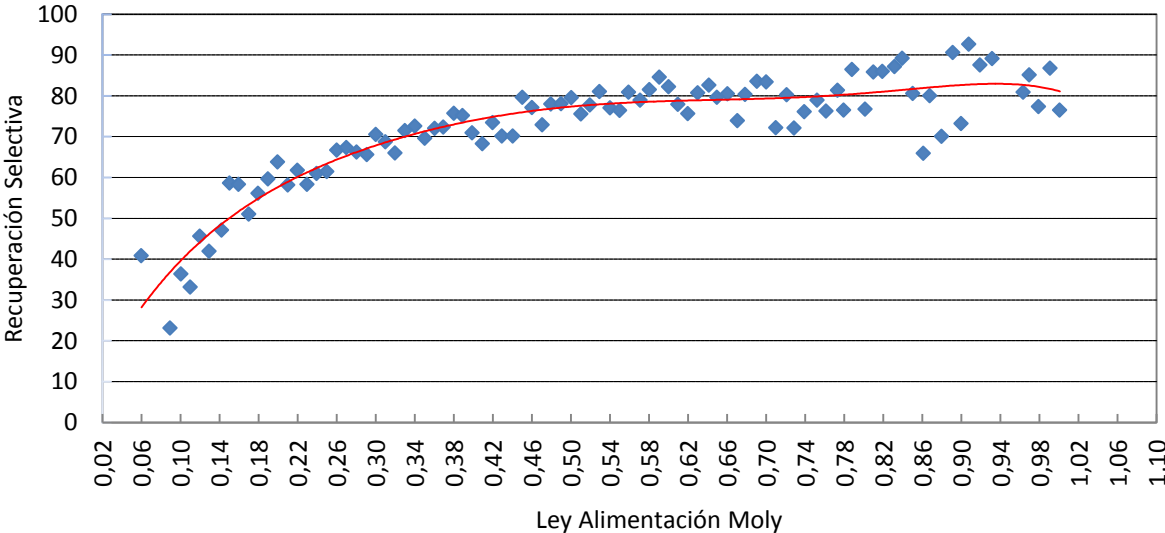


Figura 5.7: Ley Alimentación Selectiva v/s Recuperación Selectiva.

Como se puede observar en la Fig. 5.7, los datos experimentales se ajustan bastante bien a la línea de tendencia, con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.86. Es así como el objetivo operacional de este año es obtener recuperaciones sobre el 80% en planta selectiva, se puede observar que estos valores se comienzan a alcanzar cerca de la ley de alimentación de diseño.

El polinomio encontrado que mejor se adecua al comportamiento de la recuperación selectiva es el siguiente:

$$y = -1767.3x^6 + 5570.2x^5 - 7004.4x^4 + 4656.8x^3 - 1887.8x^2 + 510.17x + 3.4353$$

Siendo:

Y: Recuperación Selectiva.

X: Ley de Alimentación Planta Selectiva.

5.1.4 Polinomio Ley de Alim. Planta Selectiva – Ley de Concentrado.

Según lo visto en el apartado anterior, el objetivo en la planta selectiva es superar el 80% de recuperación, para de esta forma obtener el 50% de recuperación global que se tiene por presupuesto. Sin embargo, esta condición se cumple para leyes de alimentación sobre la ley de alimentación de diseño (0.4% MoT); el grado de dificultad se evidencia cuando se debe responder en términos de calidad y es aquí donde la Ley de Concentrado cumple su rol.

El presupuesto se fijó en un 48% y se redujo la cantidad de concentrado que se puede comercializar con menor ley, encontrándose, operaciones y control de procesos, en la obligación de reprocesar o stockear, concentrados sin ley comercial. Es por esto que dentro del estudio se agregó la búsqueda del polinomio que mejor representara la ley de concentrado.

El proceder fue parecido al utilizado anteriormente, pero esta vez sólo utilizando la ley de concentrado de la columna de la planta de Moly, obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 5.8:

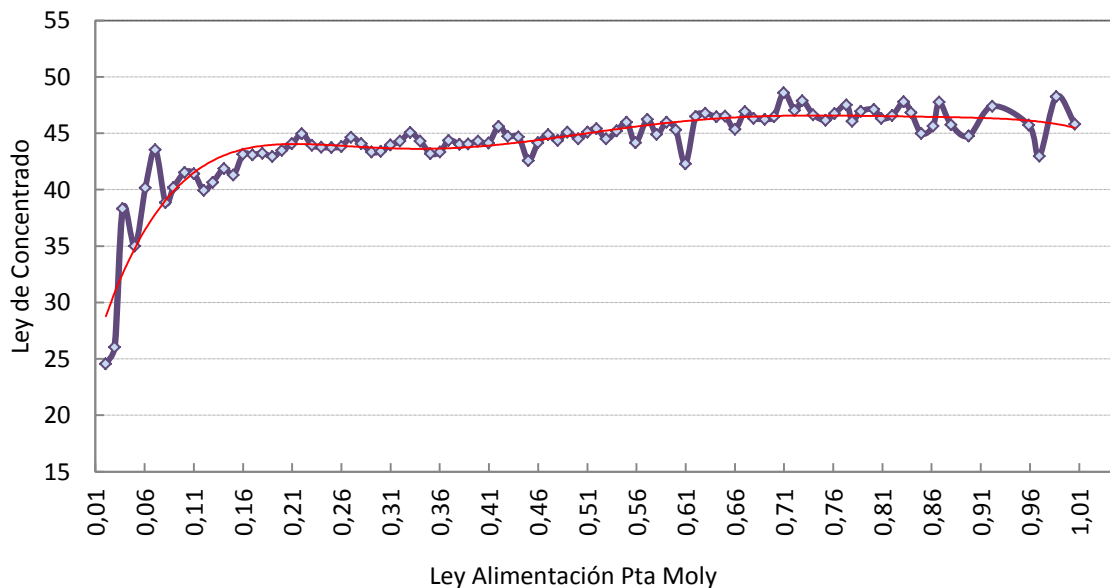


Figura 5.8: Ley de alimentación Pta Moly v/s Ley de Concentrado.

Finalmente el polinomio de grado 6 obtenido es el siguiente:

$$Y = -1348.9x^6 + 4908.7x^5 - 7042.3x^4 + 5017.5x^3 - 1836.1x^2 + 325.58x + 21.922$$

Con un coeficiente de determinación R^2 de 0.91, aquí, “y” corresponde a la ley de concentrado y “x” a la ley de alimentación a la planta de Moly. Por lo tanto, con leyes superiores a 0.21% se podría comenzar a obtener concentrados con ley comercial y sobre 0.6% concentrados comerciales sin problemas.

5.1.5 Polinomio Ley de Alim. Colectiva – Recuperación Colectiva

Una vez que en planta selectiva, las relaciones entre variables están hechas, se hace necesario realizar el mismo ejercicio en planta colectiva, esto con miras a establecer relaciones entre los polinomios encontrados.

En este apartado, se estudiará la relación existente entre la ley de alimentación a la planta colectiva y su recuperación. Para cálculos de recuperación, se efectuaron los mismos utilizados en la recuperación selectiva (ec.7), sólo que esta vez las leyes de Mo en alimentación, concentrado y relave pertenecen a la planta colectiva. Para la alimentación, la ley utilizada es la que ingresa a las celdas rougher, en el caso del concentrado, la ley de Mo corresponde al producto de las columnas, es decir al concentrado mixto y finalmente la ley de relave corresponde al compuesto entre el relave de las tres líneas Rougher y el relave de la línea Scavenger, que convergen en el relave final de la planta.

El resultado de esta compilación de datos, durante el periodo de estudio entregó los resultados mostrados en la Fig. 5.9:

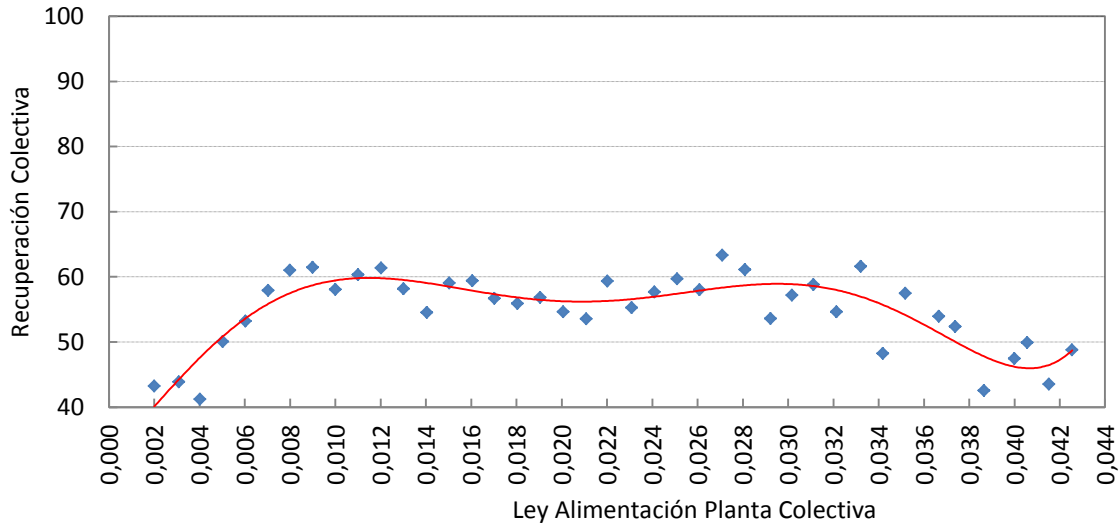


Figura 5.9: Ley de Alimentación Planta Colectiva v/s Recuperación Colectiva.

A través de la gráfica anterior se obtuvo el polinomio correspondiente y su coeficiente de distribución, además se logró afirmar que para parámetros de diseño, es decir, entre 0.01 y 0.03, la recuperación colectiva no supera los valores del 60%, es sólo en los extremos de estos límites, es decir menores a 0.01 y mayores a 0.03, donde ésta disminuye y se aleja de los parámetros establecidos. Por otro lado, estos valores deberían ser mayores, presentándose una oportunidad de mejora próxima a evaluar.

El Polinomio obtenido es el siguiente:

$$y = 717459500896x^6 - 85919605321.682x^5 + 3690367039.727x^4 - 65200289.832x^3 + 288519.061x^2 + 3424.079x + 32.542$$

Siendo:

Y: Recuperación Colectiva.

X: Ley de Alimentación a Planta Colectiva.

El coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.74.

5.1.6 Método de elección correlación final para Leyes de Alimentación Plantas

Como se mencionó en un comienzo, es de real importancia encontrar la recuperación global de la planta de flotación, para hallar la ley de corte. Esta recuperación tiene una dependencia directamente proporcional, tanto de la recuperación de la planta colectiva como selectiva. Si bien mediante el sistema que se ha ido empleando es posible obtener los polinomios que representen ambas plantas, se necesita un vínculo que las una, para de esta forma facilitar el cálculo.

Es aquí, donde el parámetro más importante y decisivo en las recuperaciones de ambas plantas corresponde a las leyes de alimentación, por lo tanto, la tarea es encontrar la correlación que mejor represente ambas leyes de cabeza.

En primer lugar obtuvo cinco polinomios, que en adelante se llamarán P(1), P(2), P(3), P(4) y P(5), donde estos difieren en el grado. Su variable independiente corresponde a la ley de alimentación Planta de Moly, mientras que la dependiente a la ley de alimentación a la Planta Colectiva.

Los polinomios obtenidos son los siguientes con sus respectivos coeficientes de distribución:

$P1 = 0.065x - 0.0048$	$R^2: 0.85$
$P2 = 0.0463x^2 + 0.0334x - 0.0007$	$R^2: 0.86$
$P3 = -0.3726x^3 + 0.434x^2 - 0.081x + 0.0074$	$R^2: 0.88$
$P4 = -2.0553x^4 + 2.5419x^3 - 0.9439x^2 + 0.1605x - 0.004$	$R^2: 0.90$
$P5 = -1.9281x^5 + 1.3805x^4 + 0.3016x^3 - 0.2961x^2 + 0.0819x - 0.0011$	$R^2: 0.90$

Para escoger el polinomio que mejor se adecúe a la realidad se podría pensar que es el que tiene el mejor coeficiente de distribución y si bien no es un mal acercamiento, todos los polinomios gozan de un buen coeficiente.

Para tomar la decisión se fijaron parámetros que tienen relación con la operación, específicamente con los tratamientos alimentados a ambas plantas. En el caso del

tratamiento alimentado a la planta de Moly, el parámetro fijado es límite inferior alimentado por turno, que no debe ser menor a 150 toneladas secas, mientras que el tratamiento alimentado a la planta colectiva no debe ser superior a 35000 toneladas secas, esto por motivos de diseño del mineroducto que alimenta la planta.

En primera instancia se analizó los tonelajes alimentados a la planta selectiva, cabe dejar en claro que el espesador mixto alimenta por gravedad al acondicionador 1, por lo que el control de este tonelaje sólo se efectúa por cierre o apertura de válvula. Realizando un histograma de frecuencia de tonelajes alimentados, se obtuvo el siguiente gráfico:

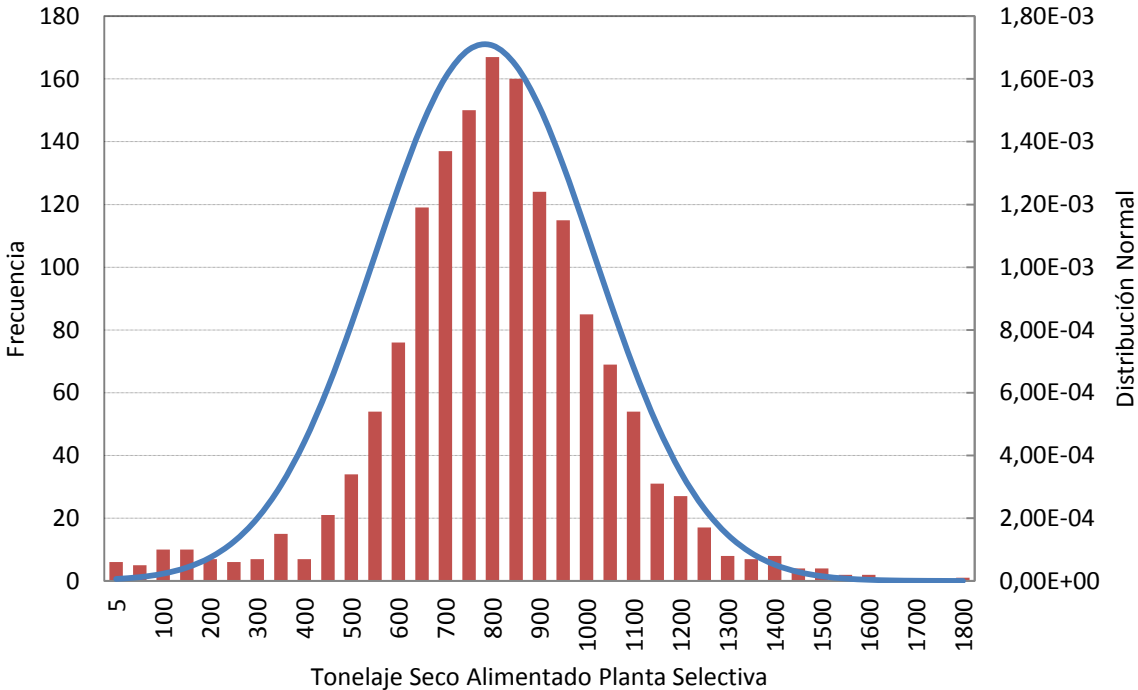


Figura 5.10: Distribución normal del tonelaje alimentado a la planta selectiva.

Desde la Fig. 5.10. Se puede observar la frecuencia con la que se alimentan los distintos tonelajes a la planta selectiva. Destacando que la mayor frecuencia es alimentar entre 750-800 toneladas secas por turno, que corresponde a la alimentación de diseño de la planta selectiva.

A continuación, a través de cinco parámetros, se fija uno que es el fino mínimo requerido para la utilidad cero, calculado en la sección 5.1.2, correspondiente a los

404 kg de Mo. Por otro lado se conoce el polinomio que nos entrega la recuperación de la planta selectiva y finalmente se conocen los tonelajes que se alimentan con mayor frecuencia a la planta de Moly. Por lo tanto, se fija una función objetivo y a través de la herramienta de Microsoft Excel Solver, se itera hasta encontrar la ley de alimentación a la planta de Moly necesaria para obtener los 404 kg de fino. Finalmente se realiza lo anterior para todos los tonelajes frecuentes alimentados a la planta selectiva, obteniendo los datos de la Tabla 5.4:

Tabla 5.4: Iteración Leyes de Alimentación Pta Moly según fino utilidad cero.

Bajo Correlación de Recuperación Planta Selectiva				
Ton Alim	Ley Alim Moly	Fino Alim	Rec	Fino Rec
800	0.113	901	44.83	404
850	0.109	925	43.67	404
750	0.117	876	46.11	404
700	0.121	850	47.54	404
900	0.105	948	42.61	404
650	0.126	822	49.15	404
950	0.102	970	41.63	404
1000	0.099	992	40.74	404
600	0.132	793	50.97	404
1050	0.096	1012	39.90	404
550	0.138	761	53.07	404
1100	0.094	1033	39.13	404
500	0.146	728	55.53	404
1150	0.091	1052	38.40	404
1200	0.089	1071	37.72	404
450	0.154	691	58.47	404
1250	0.087	1090	37.08	404
350	0.173	607	66.57	404
100	0.276	276	146.60	404
150	0.242	364	111.07	404
1300	0.085	1108	36.47	404
1400	0.082	1143	35.36	404
200	0.219	438	92.24	404
300	0.186	558	72.46	404
400	0.163	651	62.06	404
1350	0.083	1125	35.90	404
5	0.559	28	1442.52	404
250	0.201	502	80251	404
50	0.333	167	242.56	404
1450	0.080	1159	34.84	404
1500	0.078	1176	34.35	404
1550	0.077	1192	33.89	404
1600	0.076	1208	33.44	404
1800	0,071	1269	31.83	404
1650	0.074	1224	33.01	404
1700	0.073	1239	32.60	404
1750	0.072	1254	32.21	404

El Tonelaje alimentado se presenta en el orden de mayor a menor frecuencia obtenido en la Fig. 5.10. De la tabla 5.4 se puede concluir que se debe alimentar más de 150 toneladas secas por turno a la planta de Moly, ya que el fino alimentado a estos valores de tonelaje es muy reducido y no alcanza el fino mínimo de utilidad cero, obteniendo un 100% de recuperación en la planta selectiva.

Una vez obtenidas las leyes de alimentación a la planta de Moly, se deben encontrar las de alimentación a la planta colectiva, para esto se trabaja con los cinco polinomios nombrados anteriormente. Se obtendrá cada ley de alimentación a la planta colectiva según cada ley de alimentación a la planta selectiva obtenida recientemente; los resultados se indican en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Leyes Alimentación Planta Colectiva según cada Polinomio.

Ley Alimentación Planta Colectiva				
P1	P2	P3	P4	P5
0.003	0.004	0.003	0.005	0.005
0.002	0.003	0.003	0.005	0.005
0.003	0.004	0.003	0.006	0.005
0.003	0.004	0.003	0.006	0.005
0.002	0.003	0.003	0.005	0.005
0.003	0.004	0.003	0.006	0.005
0.002	0.003	0.003	0.005	0.005
0.002	0.003	0.003	0.005	0.004
0.004	0.005	0.003	0.006	0.005
0.001	0.003	0.003	0.005	0.004
0.004	0.005	0.004	0.006	0.006
0.001	0.003	0.003	0.005	0.004
0.005	0.005	0.004	0.006	0.006
0.001	0.003	0.003	0.005	0.004
0.001	0.003	0.003	0.004	0.004
0.005	0.006	0.004	0.006	0.006
0.001	0.003	0.003	0.004	0.004
0.006	0.006	0.004	0.007	0.006
0.013	0.012	0.010	0.010	0.009
0.011	0.010	0.008	0.009	0.008
0.001	0.002	0.003	0.004	0.004
0.001	0.002	0.003	0.004	0.004

0.009	0.009	0.007	0.008	0.007
0.007	0.007	0.005	0.007	0.007
0.006	0.006	0.004	0.007	0.006
0.001	0.002	0.003	0.004	0.004
-	-	-	-	-
0.008	0.008	0.006	0.007	0.007
0.017	0.016	0.015	0.013	0.012
0.000	0.002	0.004	0.004	0.004
0.000	0.002	0.004	0.004	0.004
0.000	0.002	0.004	0.004	0.004
0.000	0.002	0.004	0.004	0.004
0.000	0.002	0.004	0.003	0.003
0.000	0.002	0.004	0.004	0.003
0.000	0.002	0.004	0.004	0.003
0.000	0.002	0.004	0.004	0.003
0.003	0.004	0.004	0.006	0.005

De este último ejercicio, se puede deducir que observando la última fila en donde están las medias de cada columna de polinomios, basándonos en que cada uno de ellos tiene un aceptable R^2 , la ley de corte de Mo debe encontrarse entre los rangos de 0.003 y 0.006%. Por otro lado, P(1) tiene leyes catalogadas en rojo que dan cuenta de valores negativos, como las leyes no pueden ser negativas, se descarta este polinomio para su uso. Una vez eliminado el primer polinomio, para hallar el adecuado se utilizará el parámetro nombrado anteriormente acerca del tratamiento máximo que se puede alimentar por turno a la planta. Este límite se fijó en 35000 toneladas secas, de acuerdo a un tonelaje promedio de 4375 t/h. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 5.6:

Tabla 5.6: Tratamientos alimentados a planta Colectiva según cada polinomio.

Recuperación Colectiva (%)					Tratamiento Alim a Colectiva (ton)				
Rec 1	Rec 2	Rec 3	Rec 4	Rec 5	Trat 1	Trat 2	Trat 3	Trat 4	Trat 5
42.11	46.31	44.86	51.95	50.47	84860	53311	61805	32093	36454
41.15	45.72	44.84	51.59	50.11	98837	58088	63584	33989	38617
43.15	46.96	44.92	52.32	50.84	72706	48666	59710	30237	34317
44.27	47.67	45.03	52.70	51.23	62104	44158	57251	28417	32202

40.27	45.17	44.85	51.23	49.76	114981	62992	65090	35929	40804
45.49	48.44	45.21	53.07	51.62	52836	39795	54381	26628	30107
39.45	44.66	44.89	50.87	49.42	133732	68019	66364	37915	43017
38.70	44.18	44.94	50.52	49.09	155662	73165	67442	39950	45256
46.80	49.28	45.46	53.45	52.04	44726	35584	51058	24864	28031
38.00	43.75	45.01	50.17	48.78	181533	78427	68355	42034	47522
48.21	50.19	45.83	53.83	52.46	37626	31532	47255	23115	25967
37.35	43.34	45.09	49.83	48.48	212379	83801	69130	44170	49814
49.72	51.19	46.33	54.22	52.90	31417	27649	42965	21371	23909
36.76	42.96	45.18	49.49	48.18	249636	89285	69788	46360	52133
36.20	42.60	45.28	49.16	47.90	295364	94877	70349	48604	54478
51.31	52.27	47.01	54.61	53.35	25993	23945	38217	19616	21848
35.68	42.27	45.38	48.83	47.63	352625	100574	70829	50904	56849
54.66	54.69	49.09	55.47	54.33	17159	17116	27715	15985	17659
59.49	59.79	59.58	59.40	58.55	3533	3834	4517	4690	5327
59.79	59.53	57.45	58.24	57.16	5549	6037	7948	7301	8188
35.20	41.95	45.48	48.51	47.36	426169	106376	71241	53262	59247
34.34	41.38	45.69	47.89	46.86	659231	118287	71903	58154	64119
59.10	58.55	54.86	57.28	56.20	7856	8467	12166	9741	10803
56.32	55.99	50.61	55.96	54.87	13598	14011	22280	14048	15486
52.97	53.44	47.91	55.03	53.83	21267	20430	33090	17829	19771
34.75	41.66	45.59	48.20	47.10	523791	112281	71596	55678	61670
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57.85	57.31	52.53	56.55	55.47	10518	11126	17016	11981	13216
57.43	58.19	58.64	59.38	59.79	1721	1839	1919	2097	2316
33.94	41.12	45.80	47.59	46.62	859160	124394	72171	60691	66593
33.58	40.87	45.91	47.30	46.38	1183130	130600	72406	63290	69093
33.24	40.64	46.02	47.01	46.16	1796672	136905	72613	65953	71618
32.92	40.41	46.13	46.72	45.94	3396235	143307	72797	68680	74168
31.81	39.63	46.55	45.64	45.13	-1836024	169889	73368	80264	84615
32.61	40.20	46.23	46.44	45.73	17945560	149807	72961	71474	76743
32.33	40.00	46.34	46.17	45.52	-6164483	156405	73109	74335	79342
32.06	39.81	46.45	45.91	45.32	-2764831	163098	73244	77264	81966
42.75	47.00	47.42	51.46	50.35	508690	72447	54101	38859	42869

A partir del Polinomio Recuperación Colectiva, se obtiene el tratamiento que se debe alimentar a la planta en un turno, para satisfacer las leyes de alimentación colectiva necesarias para la utilidad cero. Como estas leyes son muy bajas ya que se está solicitando la utilidad mínima, el tratamiento necesario a veces es excesivo para contrarrestar estas bajas leyes. Es así como los tratamientos 2, 3 y 5 son los que tienen mayor cantidad de datos que superan los límites permitidos, por lo tanto, se rechazan. Es así como se selecciona el polinomio de ley de alimentación a la planta colectiva correspondiente al tratamiento 4 y pese a que también contiene tratamientos que superan los márgenes dispuestos, analizando estos datos, esto ocurre por los altos tratamientos de alimentación a la planta selectiva a los que corresponden, derivando en bajas leyes de alimentación a la misma, lo que interpretado en el polinomio de recuperación en planta colectiva, nos entrega valores bajos. Por último, cabe destacar que este polinomio nos entrega los valores que más frecuentemente se alimentan a la planta selectiva dentro de los márgenes permitidos.

Finalmente el Polinomio a utilizar, como correlación entre las leyes de alimentación entre ambas plantas será el siguiente:

$$P(4) = -2.0553x^4 + 2.5419x^3 - 0.9439x^2 + 0.1605x - 0.004 \quad R^2: 0.90$$

Con:

P (4): Ley Alimentación Planta Colectiva.

X: Ley Alimentación Planta Selectiva.

5.1.7 Polinomio Ley Alim. Planta Selectiva – Ley Alim. Planta Colectiva.

Una vez hallado el polinomio que representa el vínculo entre ambas plantas, se puede observar en la Fig. 5.11 que a partir del 0.5% de alimentación a la planta selectiva se produce una mayor cantidad de perturbaciones en la predicción, a raíz de la escasa cantidad de veces que se alimenta a la planta leyes superiores, con la necesaria por diseño.

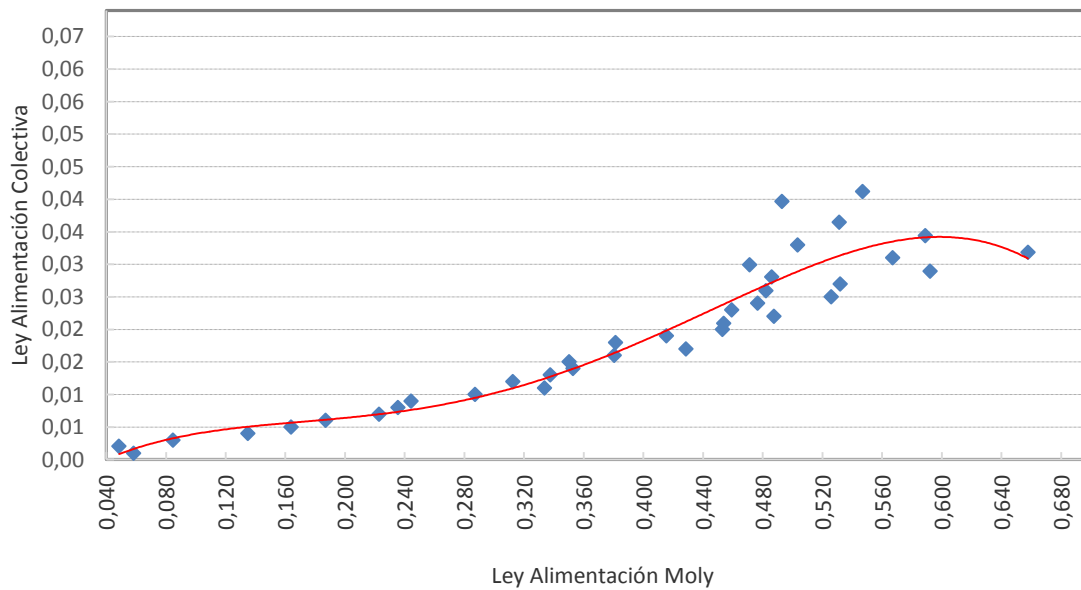


Figura 5.11: Ley de Alimentación Planta de Moly v/s Ley de Alimentación Planta Colectiva.

Pese a que en el desarrollo del cálculo de la ley de corte de la planta selectiva, el paso a paso realizado ha sido desde el producto hacia la materia prima, es necesario para efectos de facilitar la interfaz del usuario, invertir el procedimiento y dejar como variable independiente la ley de alimentación a la planta colectiva. De esta forma, a partir de su valor se formará un árbol de funciones que dependen de ella, obteniendo los resultados requeridos.

Es así como a partir de P (4), dejando la ley de alimentación a la planta colectiva como variable independiente y la de alimentación a la planta de Moly como dependiente, se obtiene la Fig. 5.12:

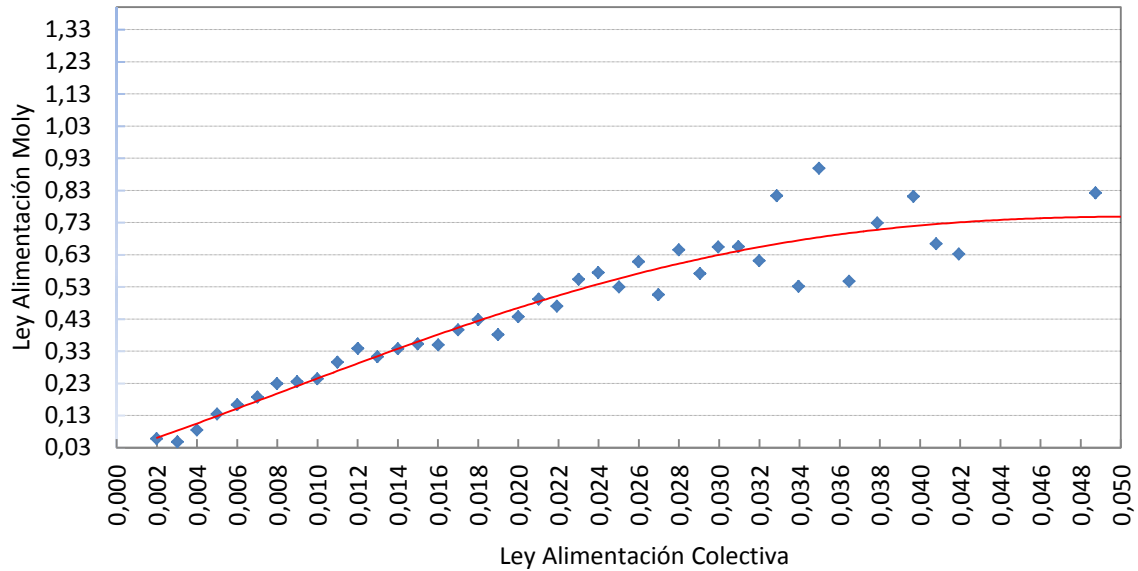


Figura 5.12: Leyes de alimentación planta con colectiva como variable independiente.

Se puede observar que la nueva línea de tendencia representa de buena forma, leyes de alimentación a la planta de hasta 0.032% lo que se traduce en leyes de alimentación a la planta selectiva de 0.655% dejándonos un amplio rango de operación para futuras predicciones.

El polinomio obtenido se comporta de la siguiente forma:

$$y = 115516x^4 - 14611x^3 + 313.61x^2 + 21.036x + 0.0171$$

Donde:

y: Ley Alimentación Moly.

x: Ley Alimentación Colectiva.

Con un coeficiente de distribución (R^2) igual a 0.94.

5.1.8 Polinomio Ley de Alim. Planta Colectiva – Recuperación Global

Finalmente, una vez encontrados los polinomios correspondientes a cada recuperación en ambas plantas, es posible obtener el polinomio que representa la recuperación global de Tórtolas II. La gráfica obtenida se muestra en la Fig. 5.13:

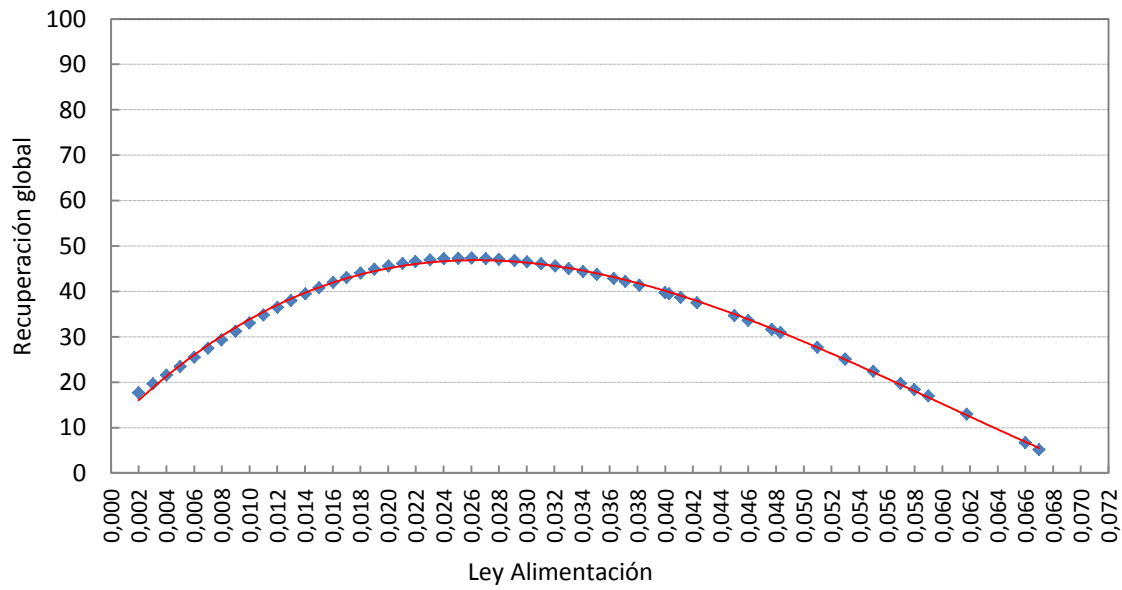


Figura 5.13: Recuperación global v/s Ley de alimentación a planta colectiva.

Como se puede apreciar, el valor de recuperación global del 50% que se necesita cumplir por presupuesto, según la curva no se alcanza y es debido a que en la historia de la planta en sólo dos meses del 2014 se logró alcanzar esta cifra. Es aquí donde según el comportamiento del polinomio la idea sería elevar las recuperaciones según las leyes de alimentación. Para esto, el análisis se debe hacer por separado y como ya se ha estudiado, la planta selectiva es capaz de llegar a buenas recuperaciones y concentrados de calidad comercial, siempre y cuando obtenga buenas leyes de alimentación. Mientras que la planta colectiva obtiene un polinomio que se mueve pasivamente en recuperaciones cercanas al 60%, por un amplio rango de leyes de alimentación.

El polinomio obtenido es el siguiente con su respectivo R^2 :

$$y = 414908x^3 - 74712x^2 + 3073.2x + 10.178$$

$$R^2 = 0.99$$

5.1.9 Ley de Corte Planta de Molibdeno

Una vez establecidas las correlaciones sobre recuperación, los costos asociados a la planta selectiva y contando con el precio del concentrado en cuestión (según lo visto en el capítulo III), ya es posible calcular la ley de corte de la planta.

Para clarificar los valores que se presentarán en la planilla de Microsoft Excel, se muestra a continuación el árbol funcional, que tiene como intención representar el método de análisis, que bajo ninguna circunstancia es la única forma de resolverlo sino más bien, se presenta como una guía o propuesta del caso en cuestión.

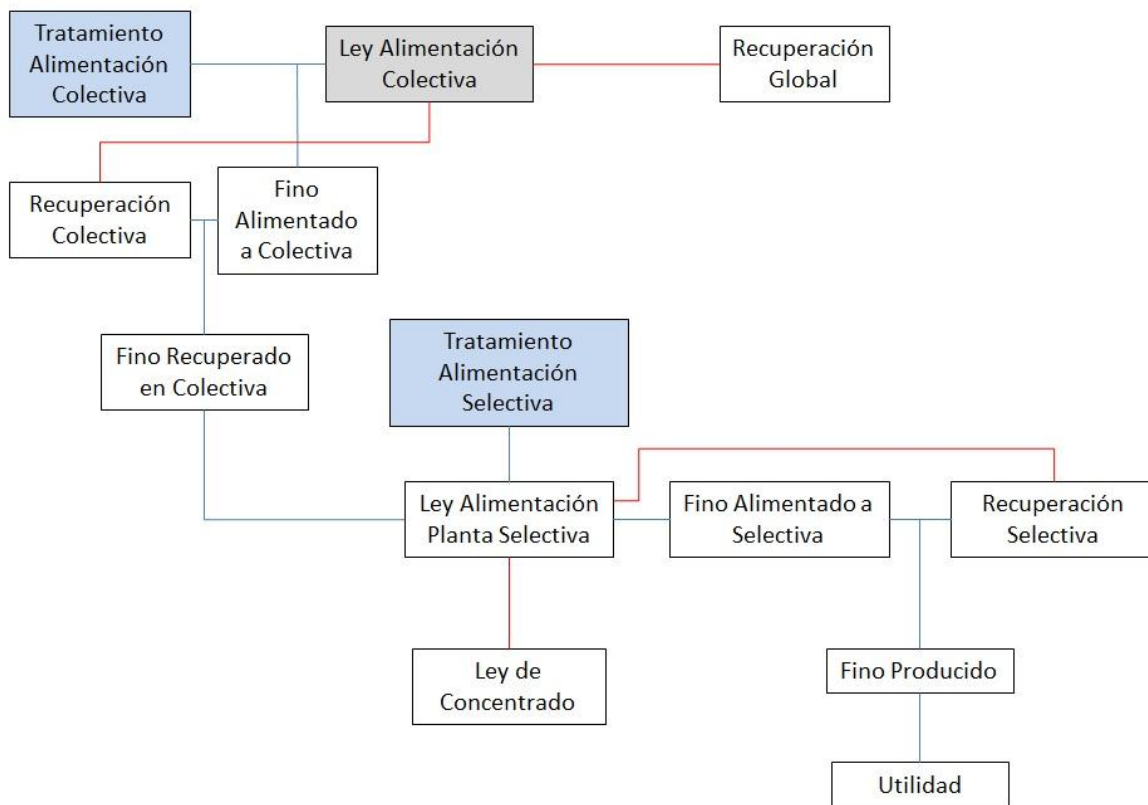


Figura 5.14: Árbol funcional del cálculo de la utilidad producida en planta.

La ley de Alimentación colectiva es ingresada por el usuario, el Tratamiento de esta misma, y el de la planta selectiva se obtiene de la plataforma PI y finalmente los conectores rojos representan la linealidad dependiente entre las correlaciones.

A continuación en la Fig. 5.15 se puede observar un ejemplo de cálculo entregado por la planilla:

		Planta II			
		Turno		Día	
	Unidad	Anterior	What If	Anterior	What If
Tratamiento	Ton	1510	29696	80787	89088
Ley Alimentación MoT	%	0,006	0,015	0,006	0,005
Fino Alimentado	Kg	84	4454	4472	4454
Recuperación Colectiva	%	50,80	59,21	51,51	58,12
Fino Recuperado Colectiva	Kg	42	2637	2304	2589
Razón Concentración Colectiva	-	-0,552	0,393	-0,552	0,455
Tratamiento Pta Moly	Ton	700	800	2100	2400
Ley Alim Pta Moly	%	0,10	0,35	0,10	0,13
Fino Alimentado	Kg	735	2795	2205	3172
Recuperación Selectiva	%	40,80%	71,26%	42,04%	45,83%
Fino Producido	Kg	300	1992	927	1454
Ley de Concentrado	%	41,16	43,62	41,16	42,70
Recuperación Global	%	24,97	40,87	24,97	23,73
Razón Concentración Selectiva	-	424	175	424	705
Utilidad \$US		-2569	39365	-7025	6031

Valores Modificables

Figura 5.15: Ejemplo de cálculo, obtención utilidad turno y día.

De lo anterior se puede deducir que para una alimentación a la planta de 0.015% de Mo, se obtendrá 59% de recuperación colectiva, 0.35% de Mo de alimentación a la planta selectiva, un 71.26% de recuperación selectiva, una ley de concentrado del 46%, una recuperación global del 41% y una utilidad para el turno de USD\$39365. (Memoria de cálculo en Anexo A.3.3.)

Realizando un ejercicio similar, con la ayuda de la herramienta Solver se utiliza la celda correspondiente a "Utilidad" como función objetivo, indicándole que llegue a valor cero, señalando que la celda que debe iterar es la de "Ley de Alimentación MoT". Con esto se obtiene la ley de corte de planta selectiva que nos indica los siguientes valores:

		Planta II			
		Turno		Día	
	Unidad	Anterior	What If	Anterior	What If
Tratamiento	Ton	1510	29696	80787	89088
Ley Alimentación MoT	%	0,025	0,0045	0,021	0,005
Fino Alimentado	Kg	377	1330	17156	4454
Recuperación Colectiva	%	58,47	49,14	57,94	50,24
Fino Recuperado Colectiva	Kg	221	653	9941	2238
Razón Concentración Colectiva	-	-0,844	0,528	-0,786	0,526
Tratamiento Pta Moly	Ton	700	800	2100	2400
Ley Alim Pta Moly	%	0,08	0,12	0,09	0,13
Fino Alimentado	Kg	553	930	1891	3172
Recuperación Selectiva	%	34,00%	43,38%	39,86%	45,83%
Fino Producido	Kg	188	404	754	1454
Ley de Concentrado	%	38,80	41,89	39,92	42,70
Recuperación Global	%	46,80	22,48	45,72	23,73
Razón Concentración Selectiva	-	1123	831	1764	705
Utilidad \$US		-5341	0	-11323	6031

Valores Modificables

 Ley Alim Utilidad 0
0,0045

Figura 5.16: Iteración Ley de Corte, según utilidad cero.

De esta forma se ve en la Fig. 5.16 que para una utilidad cero de la planta de Moly, se necesita una ley de alimentación MoT de 0.0045%. Siendo esta última la ley de corte de la planta.

5.1.10 Validación del modelo de cálculo

De tal forma de evaluar los resultados obtenidos por el modelo de cálculo, según las correlaciones encontradas en los anteriores apartados, se decidió trabajar en base al mes de diciembre de 2013, ya que es el mes en que se obtuvo menor cantidad de error de lectura en leyes de alimentación, dato básico para realizar las estimaciones.

Según lo explicado en la sección 1.1 acerca de la planta de flotación selectiva, la utilización efectiva de los filtros no corresponde necesariamente al de planta, por diseño estos deberían filtrar cada 12 horas. No obstante, esto no siempre se

cumple y más bien está sujeto a la disponibilidad de personal y el stock en los estanques de almacenamiento.

En el análisis por turno del mes de diciembre de 2013, existen turnos que tienen cero fino filtrado, mientras que el estimado asume que se filtra en todos los turnos, siempre y cuando exista el dato “ley de alimentación”. Es por esto y por lo mencionado del stock en los estanques, que se decidió trabajar con la utilidad acumulada durante los 93 turnos del mes, los resultados se observan la Fig. 5.17.

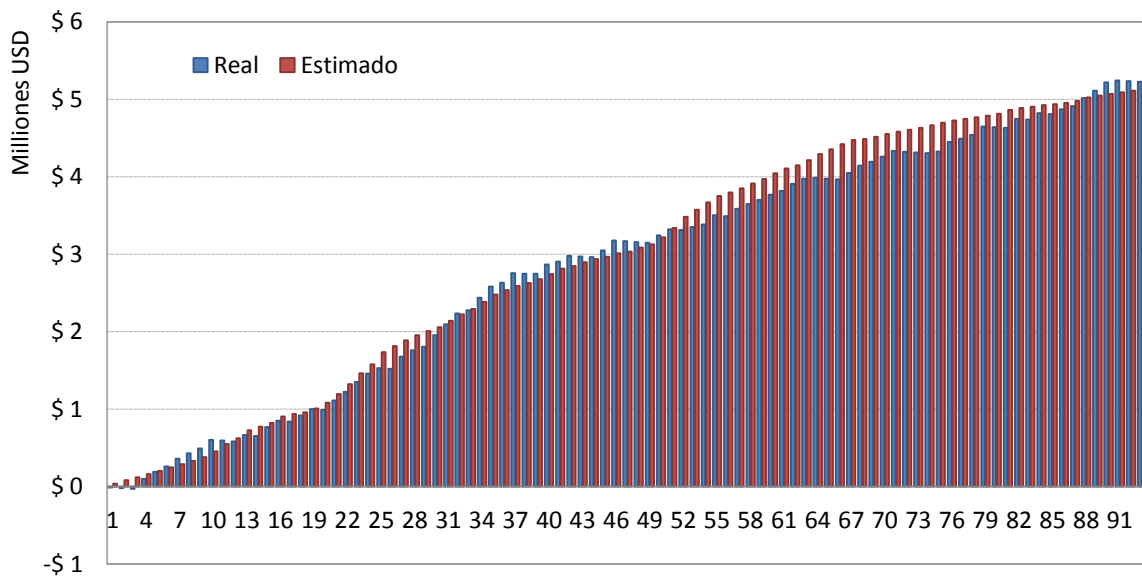


Figura 5.17: Utilidad Acumulada Real y Estimada de diciembre 2013, Pta Moly.

La utilidad de diciembre 2013 es de USD\$5257849 y se esperaría llegar a un valor similar al obtener el acumulado a través de las utilidades por turno del estimado según la Fig. 5.15. Es así como del gráfico se puede observar que la tendencia de los acumulados tiende a asimilarse llegando al turno 93, es decir, al final del mes. Por otro lado, entre los turnos 54 y 77 se ve un notorio aumento en el valor acumulado del estimado, esto debido a un incremento de leyes de alimentación a la planta, además el eje de las utilidades comienza con valor negativo y esto se debe a que los tres primeros días de diciembre no se filtro, asumiéndose de igual forma los costos operativos de la planta, llevando a una utilidad negativa estos turnos.

Finalmente, el acumulado obtenido con el estimado, es de USD\$ 5135305, lo que se traduce en USD\$122544 bajo el valor real, o un 2.33% de error en este valor final.

Pese a que se comentó en el capítulo II (2.3.1), que para la validación del modelo se utilizaría el método donde el 75% de los residuos graficados en torno al eje de las abscisas debiesen tener un error menor a un $\pm 5\%$, esto no es posible realizarlo por el hecho de que se está trabajando con valores acumulados en el tiempo.

Por lo tanto entendiendo que en primera instancia el valor acumulado final dista del original en un 2.33% se valida el modelo.

5.1.11 Costos por Reproceso

A través del modelo estadístico de cálculo, donde se utiliza como variable de entrada la ley de alimentación a la planta, se obtuvo una estimación de recuperación y ley de concentrado final que permite establecer los costos asociados al reprocesamiento de concentrados de baja ley para distintos escenarios. Se utilizaron los polinomios referentes a ley de alimentación planta moly, recuperación selectiva y ley de concentrado, anteriormente estudiados.

A partir de los costos en planta II durante el año 2013, se obtuvo la media del año, para calcular el costo normal de procesamiento de la planta. El valor alcanzado fue de 2.11 USD/lb. Los datos se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Costos de producción 2013

Mes	US/ton	US/lb
Enero	5567	2.53
Febrero	4948	2.24
Marzo	8717	3.95
Abril	6741	3.06
Mayo	5541	2.51
Junio	3017	1.37
Julio	2908	1.32
Agosto	3252	1.48
Septiembre	3751	1.70
Octubre	4823	2.19

Noviembre	3066	1.39
Diciembre	3611	1.64
Media		2.11

Según lo visto en el presente capítulo, el costo fijo por día de la planta selectiva es de USD\$30000, además frente al escenario de reproceso el costo asociado asumiría sólo reactivos alcanzando un valor de USD\$21291 por día.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos en 2013 (Tabla 5.8), se estableció que el 29.86% de la producción de moly fino presentó leyes de concentrado inferiores al 46%, lo cual no estaba considerado dentro del contrato de ventas, por lo que debían ser reprocesadas. Los datos se muestran en la Tabla 5.7 y la frecuencia de las leyes de concentrado producidas en la Fig. 5.18.

Tabla 5.8 Leyes de Concentrado v/s Acumulado, 2013

Leyes de Concentrado	Acumulado
38	0.29%
39	0.87%
40	1.45%
41	1.74%
42	3.19%
43	4.93%
44	11.30%
45	18.26%
46	29.86%
47	41.45%
48	57.10%
49	71.01%
49	84.64%
50	93.62%
51	96.81%
52	98.84%
53	99.13%
54	99.42%
More	100.00%

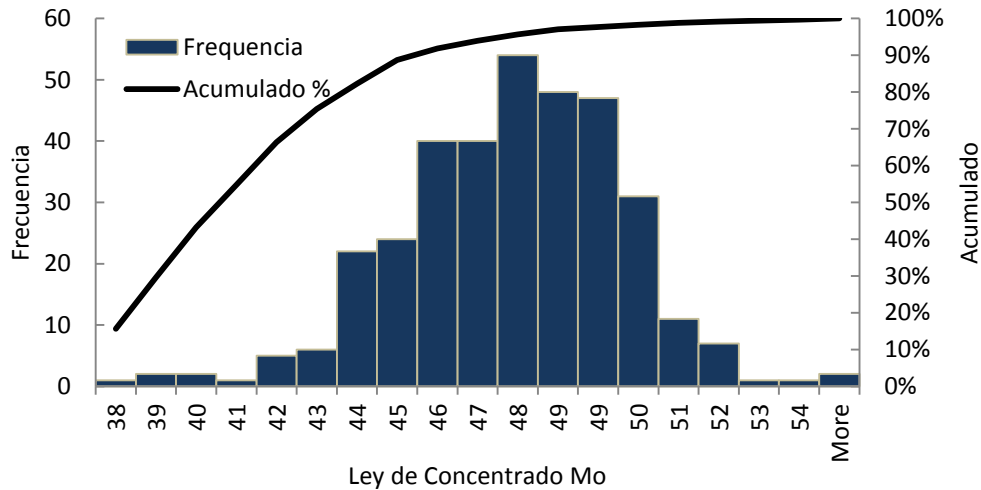


Figura 5.18: Histograma Leyes de concentrado, Planta II 2013

Al mes esto equivale a 9 días de leyes de concentrado inferiores a 46%, esto nos lleva a asumir un escenario con costos de reproceso.

Para establecer los costos por reproceso se realiza el ejercicio asumiendo el escenario indicado anteriormente (reprocesar 9 días) y definiendo un segundo escenario de 10 días asumiendo una contingencia del proceso. Se calcula el aumento de los costos del mes para cada escenario, asumiendo distintas leyes de concentrado que están dentro de los rangos reales obtenidos el año 2013.

Tabla 5.9: Costos asociados a 9 días de reproceso

Escenario 1: 9 días de Reproceso						
Días	Ley Conc (%)	Finos (lb/mes)	Costo (Us/mes)	Costo (Us/lb)	Costo Incluyendo Reproceso (Us/lb)	Incremento del Costo Por Reproceso (Us/lb)
21	45.77	298666	630172	2.11		
9	35.27	4911	185598	37.79	2.69	0.58
9	38.22	8632	185598	21.50	2.65	0.54
9	40.03	11964	185598	15.51	2.63	0.52
9	43.08	21234	185598	8.74	2.55	0.44
9	44.09	26514	185598	7.00	2.51	0.40
						0.50

Tabla 5.10: Costos asociados a 10 días de reproceso

Escenario 2: 10 días de Reproceso						
Días	Ley Conc (%)	Finos (lb/mes)	Costo (Us/mes)	Costo (Us/lb)	Costo Incluyendo Reproceso (Us/lb)	Incremento del Costo Por Reproceso (Us/lb)
20	45.77	284444	600163	2.11		
10	35.27	5457	206220	37.79	2.78	0.67
10	38.22	9591	206220	21.50	2.74	0.63
10	40.03	13293	206220	15.51	2.71	0.60
10	43.08	23593	206220	8.74	2.62	0.51
10	44.09	29460	206220	7.00	2.57	0.46
						0.57

De las Tablas 5.9-5.10 se obtiene que el incremento de los costos asociado al reproceso para el escenario de 9 días es de 0.50 USD/lb y para el de 10 días fue de 0.57 USD/lb. Cabe destacar que estos valores no consideran costos por pérdidas asociadas al reproceso.

Por lo tanto a continuación para calcular las pérdidas asociadas al reproceso, se realiza el balance por nodos correspondiente al circuito de limpieza de la planta II, Fig. 5.19, que tiene por equipos la celda columnar 3era limpieza, celdas 2da limpieza y acondicionador 2. Se calculó la recuperación según los siguientes datos de diseño:

- ❖ Recuperación 2da limpieza: 70%
- ❖ Recuperación 3era limpieza: 33.2%

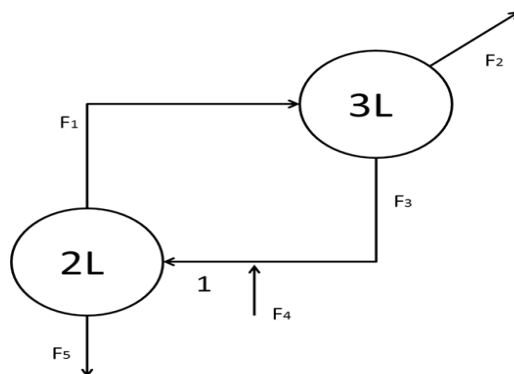


Figura 5.19: Circuito de Limpieza Planta Selectiva II

Realizando el balance, cuyo desarrollo se realiza en el Anexo A.2, se obtiene la siguiente fórmula para la recuperación del circuito:

$$Rec = \frac{R_{2L} \cdot R_{3L}}{1 - [R_{2L} \cdot (1 - R_{3L})]} \quad (8)$$

Reemplazando los valores mencionados se obtiene una recuperación para el reproceso del 43.65%.

Una vez que se han calculado los costos de reproceso y por balance las pérdidas asociadas a este, se procede a calcular el costo final que para el escenario de 9 días resultó en un incremento de 1.30 USD/lb y para 10 días en 1.51 USD/lb. Los valores mencionados se muestran en las Tablas 5.11 - 5.12.

Tabla 5.11: Costos por reproceso con pérdidas para 9 días

Días	Ley Conc (%)	Finos (lb/mes)	Costo (Us/mes)	Costo (Us/lb)	Costo Incluyendo Reproceso (Us/lb)	Incremento del Costo Por Reproceso (Us/lb)	Pérdida por Reproceso (Ton)
21	45.77	298666	630172	2.11			
9	35.27	4911	438990	89.39	3.52	1.41	1.26
9	38.22	8632	438990	50.86	3.48	1.37	2.21
9	40.03	11964	438990	36.69	3.44	1.33	3.06
9	43.08	21234	438990	20.67	3.34	1.23	5.43
9	44.09	26514	438990	16.56	3.29	1.18	6.78
						1.30	

Tabla 5.12: Costos por reproceso con pérdidas para 10 días

Días	Ley Conc (%)	Finos (lb/mes)	Costo (Us/mes)	Costo (Us/lb)	Costo Incluyendo Reproceso (Us/lb)	Incremento del Costo Por Reproceso (Us/lb)	Pérdida por Reproceso Ton
20	45.77	284444	600163	2.11			
10	35.27	5457	487766	89.39	3.75	1.64	1.39
10	38.22	9591	487766	50.86	3.70	1.59	2.45
10	40.03	13293	487766	36.69	3.65	1.54	3.40
10	43.08	23593	487766	20.67	3.53	1.42	6.03
10	44.09	29460	487766	16.56	3.47	1.36	7.53
						1.51	

5.2 MODELO ESTADISTICO DE LEY DE Mo EN CONCENTRADO MIXTO

5.2.1 Situación actual

La recuperación global de molibdeno en la planta de flotación Las Tórtolas, depende directamente de la recuperación colectiva y selectiva. Una vez vistos los polinomios de recuperación de ambas plantas, centrándonos en la selectiva se puede mencionar que existe una directa relación entre la ley de alimentación, su recuperación y su ley de concentrado. Es por esto que la excelencia operacional en planta selectiva no será suficiente sin una ley de alimentación que permita entrar en rangos óptimos de calidad y recuperación de concentrado.

Nace de esta manera la intención de hallar en la planta colectiva las variables manipulables que más inciden en la ley de Mo en el concentrado mixto y de esta forma encontrar según la data operacional de la planta, una correlación que permita la simulación de leyes de alimentación a la Moly y/o la búsqueda de rangos de operación de estas variables, para la obtención de mejores resultados que se verán expresados en el desempeño de la planta selectiva.

Es así como se menciona en el capítulo III, se utilizará el método de regresión lineal multivariable, utilizando la herramienta de Análisis de datos de Microsoft Excel. El análisis se efectuará tanto trimestral como anualmente, para finalmente comparar los coeficientes de las distintas variables seleccionadas, su coeficiente de distribución y finalmente la validación del modelo.

En la Fig. 5.20 se presenta un esquema explicativo del método utilizado:

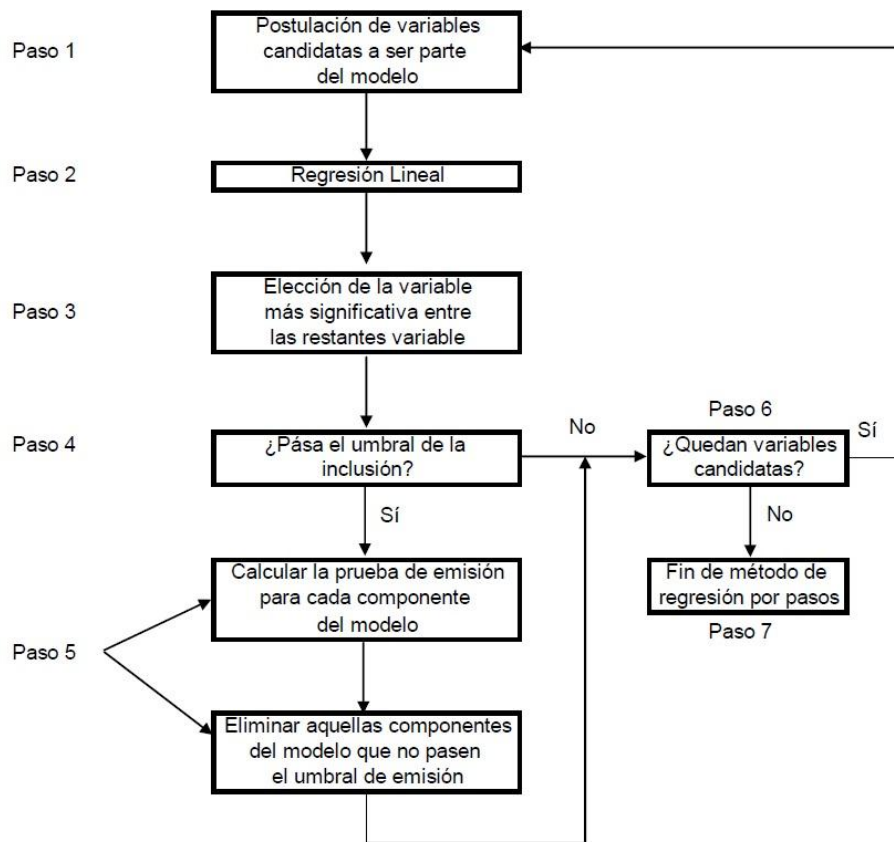


Figura 5.20: Esquema regresión lineal paso a paso.

A través de estos cinco pasos, se decide que variables formarán parte del proceso y cuáles no, según los criterios conversados en el capítulo III hasta la obtención del modelo final.

5.2.2 Regresión Primer Trimestre

De acuerdo a la Fig. 5.20, el primer paso corresponde a la postulación de variables candidatas a ser parte del modelo, que en todo el análisis serán 14. Además de la variable independiente correspondiente a la ley de Mo en el concentrado mixto. Cabe recordar que estas variables están centradas en la operación unitaria de las columnas, pertenecientes al circuito de limpieza de la planta colectiva.

Las variables en cuestión, con sus respectivas unidades y letra asociada son:

- A. Mo en Concentrado Rougher, %.
- B. pH en Columnas, pH
- C. Agua de lavado Columna 2, m³/h
- D. Agua de lavado Columna 3, m³/h
- E. Agua de lavado Columna 4, m³/h
- F. Agua de lavado Columna 5, m³/h
- G. Flujo de Aire Columna 2, m³/h
- H. Flujo de Aire Columna 3, m³/h
- I. Flujo de Aire Columna 4, m³/h
- J. Flujo de Aire Columna 5, m³/h
- K. Nivel de Espuma Columna 2, %
- L. Nivel de Espuma Columna 3, %
- M. Nivel de Espuma Columna 4, %
- N. Nivel de Espuma Columna 5, %

Con la información recaudada y filtrada según parámetros operacionales, desde enero a marzo de 2013, se realizó el análisis de regresión obteniendo los siguientes resultados, que se encuentran en las Tablas 5.13 a la 5.15:

Tabla 5.13: Estadísticas de la regresión Primer Trimestre 2013

Primera Prueba - Primer Trimestre	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9866
Coefficiente de determinación R ²	0.9735
R ² ajustado	0.9733
Error típico	0.1062
Observaciones	2062

Tabla 5.14 Análisis Anova Primer Trimestre 2013

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	847.51	60.54	5364.12	0
Residuos	2047	23.10	0.01		
Total	2061	870.62			

Tabla 5.15 Regresión Lineal Primer Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.1750	0.0619	2.8259	0.0048	0.0536	0.2965	0.0153	0.3347
Mo Conc Rou, %	1.1960	0.0044	272.68	0.0000	1.1874	1.2046	1.1847	1.2073
pH Col Cu	-0.0082	0.0045	-1.8254	0.0681	-0.0170	0.0006	-0.0197	0.0034
Agua Lav Col 2	-0.0004	0.0002	-2.4458	0.0145	-0.0008	-0.0001	-0.0009	0.0000
Agua Lav Col 3	0.0000	0.0001	-0.0986	0.9215	-0.0002	0.0002	-0.0003	0.0003
Agua Lav Col 4	-0.0004	0.0001	-3.1252	0.0018	-0.0007	-0.0002	-0.0007	-0.0001
Agua Lav Col 5	0.0008	0.0001	6.5998	0.0000	0.0006	0.0011	0.0005	0.0011
Flujo Aire Col 2	0.0005	0.0001	3.1759	0.0015	0.0002	0.0007	0.0001	0.0008
Flujo Aire Col 3	-0.0004	0.0001	-3.5505	0.0004	-0.0007	-0.0002	-0.0007	-0.0001
Flujo Aire Col 4	-0.0005	0.0001	-5.0643	0.0000	-0.0006	-0.0003	-0.0007	-0.0002
Flujo Aire Col 5	0.0006	0.0002	3.7143	0.0002	0.0003	0.0010	0.0002	0.0011
Nivel Col 2	0.0011	0.0003	3.0629	0.0022	0.0004	0.0017	0.0002	0.0019
Nivel Col 3	-0.0016	0.0003	-4.9180	0.0000	-0.0023	-0.0010	-0.0025	-0.0008
Nivel Col 4	-0.0007	0.0003	-2.3706	0.0179	-0.0013	-0.0001	-0.0015	0.0001
Nivel Col 5	0.0022	0.0004	6.0782	0.0000	0.0015	0.0029	0.0012	0.0031

Se puede observar desde la Tabla 5.13 de Estadísticas de la Regresión, información importante como el coeficiente de determinación que nos entrega un valor de 0.97, lo que se traduce en una muy buena representatividad, para el periodo en cuestión.

Desde al análisis de Varianza o ANOVA mostrado en la tabla 5.14, el valor de mayor importancia, es el de la prueba F, donde se tiene como hipótesis que no hay relación entre la variable dependiente y las variables independientes. Para validar esta suposición el valor de F debe ser menor que el “valor crítico de F”. Por lo tanto, en este caso el “valor crítico de F” es menor que F, por lo que se rechaza

la hipótesis de que no hay vinculación entre las variables, y de esta forma se valida la hipótesis alternativa de que si hay vinculación.

Por último, como medida de descarte de variables, en la tabla 5.15, se compara que el valor del signo entre el límite superior e inferior del 95% de confianza sea el mismo, de lo contrario se elimina la variable. En este caso se elimina la variable “pH Columnas” y “Agua de Lavado Columna 3”, volviendo a repetir el proceso hasta el ajuste de todas las variables.

Repitiendo el ejercicio, se obtiene el análisis final de la regresión que entrega los siguientes datos, mostrados en las tablas 5.16 a la 5.18:

Tabla 5.16: Estadísticas de la regresión corregida Primer Trimestre 2013

Segunda Prueba - Primer Trimestre	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9866
Coefficiente de determinación R ²	0.9734
R ² ajustado	0.9733
Error típico	0.1063
Observaciones	2062

Tabla 5.17 Análisis Anova corregida Primer Trimestre 2013

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	12	847.48	70.62	6253.74	0
Residuos	2049	23.14	0.01		
Total	2061	870.62			

Tabla 5.18 Regresión Lineal corregida Primer Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.0782	0.032	2.437	0.015	0.015	0.141	-0.005	0.161
Mo Conc Rou, %	1.1963	0.004	272.9	0.000	1.188	1.205	1.185	1.208
Agua Lav Col 2	-0.0005	0.000	-2.929	0.003	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Agua Lav Col 4	-0.0004	0.000	-3.447	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Agua Lav Col 5	0.0008	0.000	7.089	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Flujo Aire Col 2	0.0005	0.000	3.541	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Flujo Aire Col 3	-0.0004	0.000	-3.263	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Flujo Aire Col 4	-0.0005	0.000	-5.463	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Flujo Aire Col 5	0.0006	0.000	3.717	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Nivel Col 2	0.0012	0.000	3.417	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002
Nivel Col 3	-0.0015	0.000	-4.681	0.000	-0.002	-0.001	-0.002	-0.001
Nivel Col 4	-0.0008	0.000	-2.725	0.006	-0.001	0.000	-0.002	0.000
Nivel Col 5	0.0021	0.000	5.968	0.000	0.001	0.003	0.001	0.003

Finalmente se aceptan doce variables para este primer trimestre, destacando el coeficiente de determinación obtenido. Según la metodología vista en el capítulo III, se debe presentar el análisis de los residuos para observar su distribución en torno al eje de las abscisas que debe ser lo más simétrica en torno al eje x, esto se observa en la Fig. 5.21:

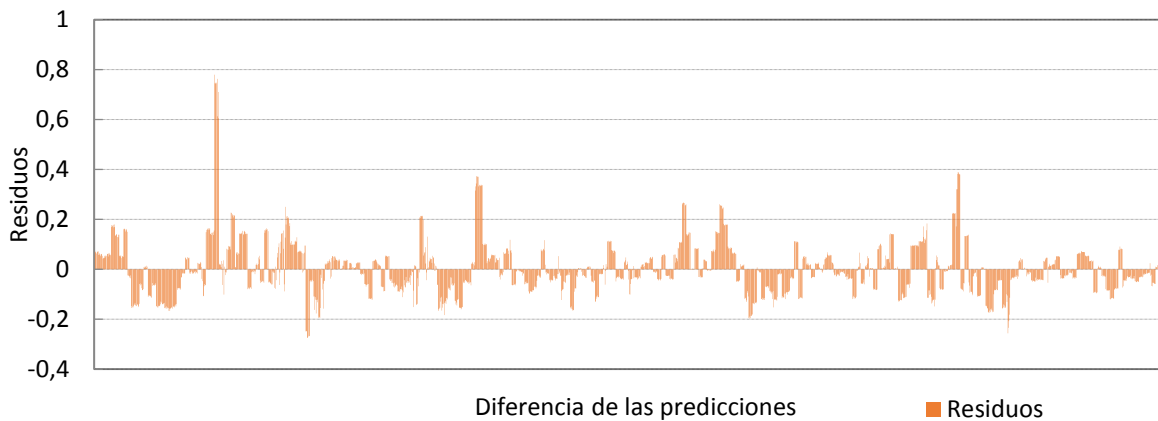


Figura 5.21: Distribución de residuos correspondientes al 1er trimestre 2013

Como esta forma de aceptar el modelo pareciera ser bastante subjetiva, el criterio utilizado será definir que si el 75% de las predicciones tienen un error menor al

±5%, el modelo se valida. En este caso se valida el modelo ya que el 100% de los pronósticos realizados tienen un error menor al ±5%, incluso menor al ±1%.

Por último, con el modelo ya validado para este trimestre, se presenta el comportamiento entre el valor real de la ley de Mo en el concentrado mixto y el pronóstico realizado por el modelo en la Fig. 5.22.

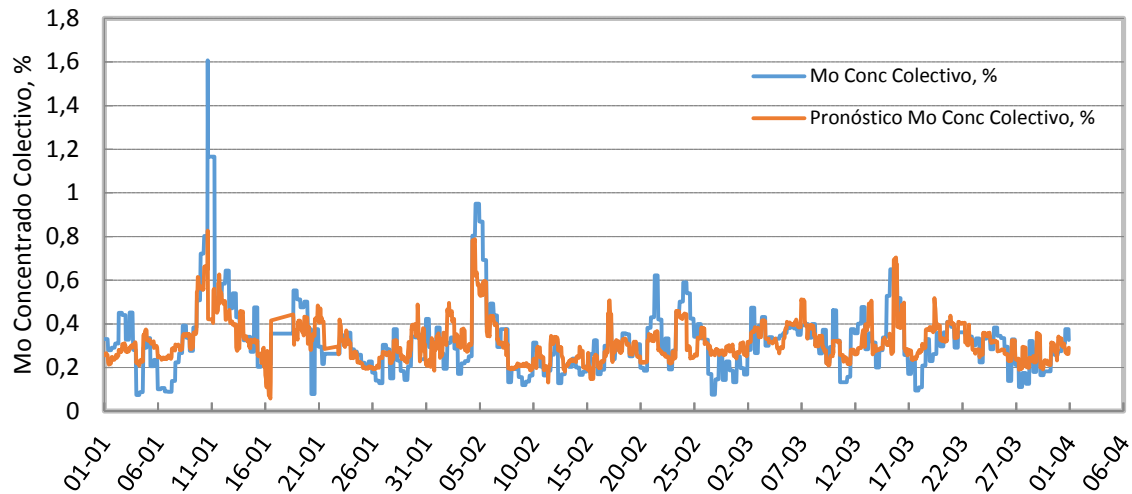


Figura 5.22: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 1er trimestre, Valor Modelo v/s Real.

A continuación se presenta el modelo encontrado:

$$\text{Ley Mo Conc Mixto} = 1.1963 \cdot A - 0.0005 \cdot C - 0.0004 \cdot E + 0.0008 \cdot F + 0.0005 \cdot G - 0.0004 \cdot H - 0.0005 \cdot I + 0.0006 \cdot J + 0.0012 \cdot K - 0.0015 \cdot L - 0.0008 \cdot M + 0.0021 \cdot N + 0.0782$$

5.2.3 Regresión Segundo Trimestre

Se realizó el mismo procedimiento, esta vez para el segundo trimestre de 2013, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en las Tablas 5.19 a la 5.21:

Tabla 5.19: Estadísticas de la regresión Segundo Trimestre 2013

Primera Prueba - Segundo Trimestre	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7960
Coefficiente de determinación R ²	0.6337
R ² ajustado	0.6313
Error típico	0.1453
Observaciones	2180

Tabla 5.20: Análisis Anova Segundo Trimestre 2013

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	14	79.0598	5.6471	267.4750	0
Residuos	2165	45.7091	0.0211		
Total	2179	124.7688			

Tabla 5.21: Regresión Lineal Segundo Trimestre 2013

Variables	Coef	Error típico	Estadístico t	Prob	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99%	Superior 99%
Intercepto	0.2830	0.0852	3.322	0.0009	0.1159	0.4501	0.0634	0.5027
Mo Conc Rou	1.7315	0.0321	53.965	0.0000	1.6686	1.7944	1.6488	1.8142
pH Col Cu	-0.0151	0.0080	-1.888	0.0591	-0.0308	0.0006	-0.0357	0.0055
Agua Lav Col 2	-0.0021	0.0003	-6.355	0.0000	-0.0027	-0.0015	-0.0030	-0.0012
Agua Lav Col 3	0.0007	0.0003	2.045	0.0410	0.0000	0.0013	-0.0002	0.0015
Agua Lav Col 4	0.0009	0.0003	2.535	0.0113	0.0002	0.0016	0.0000	0.0018
Agua Lav Col 5	0.0000	0.0002	0.150	0.8811	-0.0004	0.0005	-0.0006	0.0006
Flujo Aire Col 2	0.0000	0.0003	-0.136	0.8918	-0.0005	0.0005	-0.0007	0.0006
Flujo Aire Col 3	0.0002	0.0003	0.950	0.3424	-0.0003	0.0007	-0.0004	0.0009
Flujo Aire Col 4	0.0002	0.0003	0.664	0.5065	-0.0003	0.0007	-0.0005	0.0008
Flujo Aire Col 5	-0.0003	0.0002	-1.295	0.1954	-0.0007	0.0001	-0.0008	0.0003
Nivel Col 2	-0.0010	0.0007	-1.378	0.1682	-0.0025	0.0004	-0.0029	0.0009
Nivel Col 3	0.0011	0.0008	1.465	0.1432	-0.0004	0.0027	-0.0009	0.0032

Nivel Col 4	0.0015	0.0007	2.086	0.0371	0.0001	0.0030	-0.0004	0.0035
Nivel Col 5	-0.0009	0.0005	-1.857	0.0634	-0.0019	0.0001	-0.0022	0.0004

Para las catorce variables en cuestión, al realizar el procedimiento de descarte según los límites superior e inferior con el 95% de confianza, en una primera instancia se desechó las variables correspondientes a “pH”, “Agua de lavado columna 5”, Flujos de aire de las 4 columnas y nivel de columnas 2, 3 y 5. Al eliminar las variables, en la segunda ronda se eliminó la variable “Agua de lavado columna 3”, por no pasar el umbral de emisión. Al siguiente paso, no supero el nivel de confianza, la variable “Nivel de espuma Columna 3” y finalmente al cuarto paso se obtuvo las variables finales (el desarrollo de las regresiones se muestra en el Anexo B) con los siguientes resultados:

Tabla 5.22: Estadísticas de la regresión corregida Segundo Trimestre 2013

Cuarta Prueba - Segundo Trimestre	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7939
Coefficiente de determinación R ²	0.6303
R ² ajustado	0.6298
Error típico	0.1456
Observaciones	2180

Tabla 5.23: Análisis Anova corregida Segundo Trimestre 2013

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	78.6377	26.2126	1236	0
Residuos	2176	46.1312	0.0212		
Total	2179	124.7688			

Tabla 5.24: Regresión Lineal corregida Segundo Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.2143	0.0121	17.7	0.0000	0.1906	0.2380	0.1831	0.2455
Mo Conc Rou	1.7297	0.0296	58.36	0.0000	1.6716	1.7878	1.6533	1.8061
Agua Lav Col 2	-0.0020	0.0003	-8.01	0.0000	-0.0025	-0.0015	-0.0027	-0.0014
Agua Lav Col 4	0.0011	0.0003	3.97	0.0001	0.0006	0.0016	0.0004	0.0018

Desde las estadísticas de la regresión, Tabla 5.22, se obtuvo un coeficiente de distribución de 0.63, más bajo que el correspondiente al primer trimestre, pero aún dentro de los rangos establecidos en el capítulo III que era de 0.6.

La prueba F también cumple en el análisis de varianza, Tabla 5.23, ya que F es mayor que el “valor crítico de F”, rechazando la hipótesis de que no hay vinculación entre las variables, por lo tanto lo hay.

Finalmente las variables que quedan seleccionadas, Tabla 5.24, para este periodo de prueba son: “Mo en concentrado Rougher”, Agua de lavado en columna 2 y en la columna 4.

Para la validación del modelo en cuestión se pasa a analizar el error en el gráfico de residuos, que se muestra en la Fig.5.23:

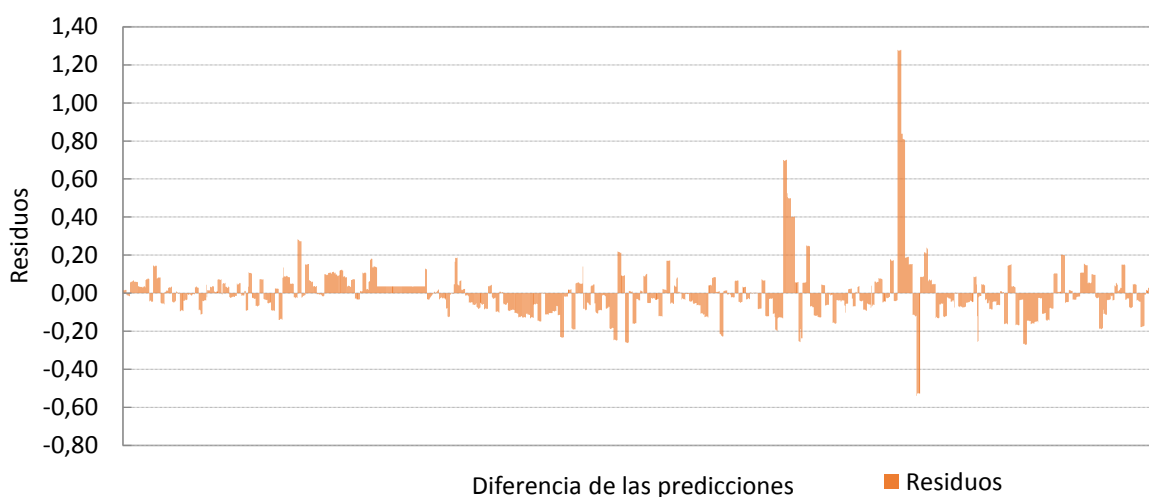


Figura 5.23: Distribución de residuos correspondientes a 2do trimestre 2013

Al realizar el análisis de los residuos, se concluye que se acepta el modelo para el periodo en cuestión, ya que el 100% de las predicciones no supera el $\pm 5\%$.

Graficando la ley de Mo en el concentrado mixto versus la predicción del modelo, se obtiene la siguiente Fig. 5.24:

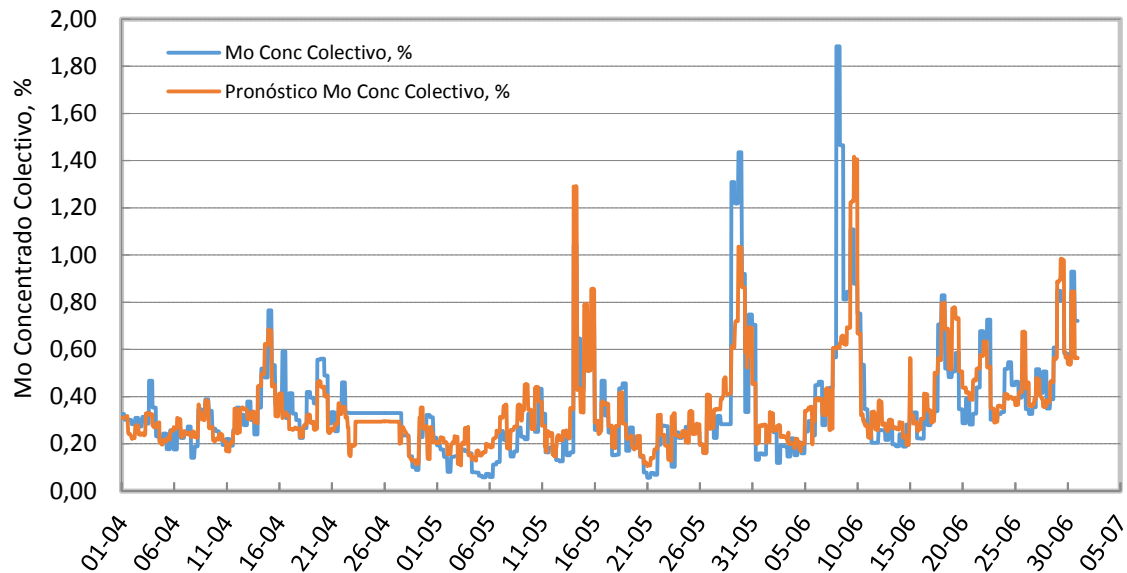


Figura 5.24: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 2do trimestre, Valor Modelo v/s Real.

El modelo encontrado que se representa con las tres variables finales es el siguiente:

$$\text{Ley Mo Conc Mixto} = 1.7297 \cdot A - 0.002 \cdot C - 0.0011 \cdot E + 0.2143$$

5.2.4 Regresión Tercer Trimestre

Continuando con el análisis, esta vez corresponde efectuar la regresión para el periodo entre julio y septiembre de 2013, cabe destacar que entre estas fechas se obtuvo el más bajo coeficiente de distribución y de eso da cuenta la gráfica entre el valor real y el entregado por el modelo, que se aleja bastante de los resultados que se han visto hasta el momento. Aún así la idea de segmentar el análisis por periodos trimestrales es dar cuenta de periodos que reúnan mayor cantidad de datos que sólo asimilar el resultado anual y de esta forma entender el comportamiento final del modelo en cuestión.

A continuación se presenta el análisis de regresión lineal para este trimestre, en las Tablas 5.25 a la 5.27:

Tabla 5.25: Estadísticas de la regresión Tercer Trimestre 2013

Primera Prueba - Tercer Trimestre	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.4388
Coeficiente de determinación R ²	0.1925
R ² ajustado	0.1873
Error típico	0.2362
Observaciones	2167

Tabla 5.26 Análisis Anova Tercer Trimestre 2013

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	28.6251	2.0446	37	0.0000
Residuos	2152	120.0402	0.0558		
Total	2166	148.6652			

Tabla 5.27 Regresión Lineal Tercer Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.4582	0.1825	2.5113	0.0121	0.1004	0.8160	-0.0122	0.9286
Mo Conc Rou	0.0481	0.0056	8.5314	0.0000	0.0371	0.0592	0.0336	0.0627
pH Col Cu	-0.0769	0.0151	-5.0872	0.0000	-0.1065	-0.0473	-0.1159	-0.0379
Agua Lav Col 2	-0.0002	0.0004	-0.4475	0.6546	-0.0009	0.0006	-0.0012	0.0008
Agua Lav Col 3	0.0003	0.0004	0.7930	0.4279	-0.0005	0.0012	-0.0008	0.0015
Agua Lav Col 4	0.0036	0.0004	8.9218	0.0000	0.0028	0.0044	0.0026	0.0047
Agua Lav Col 5	-0.0010	0.0003	-3.2247	0.0013	-0.0017	-0.0004	-0.0018	-0.0002
Flujo Aire Col 2	0.0021	0.0005	4.1245	0.0000	0.0011	0.0031	0.0008	0.0034
Flujo Aire Col 3	0.0027	0.0006	4.3192	0.0000	0.0015	0.0039	0.0011	0.0043
Flujo Aire Col 4	-0.0020	0.0007	-2.8810	0.0040	-0.0033	-0.0006	-0.0037	-0.0002
Flujo Aire Col 5	-0.0006	0.0004	-1.6110	0.1073	-0.0014	0.0001	-0.0016	0.0004
Nivel Col 2	0.0013	0.0009	1.4443	0.1488	-0.0005	0.0030	-0.0010	0.0035
Nivel Col 3	0.0042	0.0012	3.5384	0.0004	0.0019	0.0065	0.0011	0.0073
Nivel Col 4	0.0038	0.0011	3.5172	0.0004	0.0017	0.0060	0.0010	0.0067
Nivel Col 5	-0.0031	0.0006	-5.4406	0.0000	-0.0042	-0.0020	-0.0046	-0.0016

Se puede observar del cuadro de estadísticas de la regresión, Tabla 5.25, que el coeficiente de determinación corresponde al valor de 0.19, el más bajo hasta el momento y por lo mismo en la prueba F, Tabla 5.26, se rechaza la hipótesis de no vinculación entre las variables, pero con un valor mucho más distante que en las anteriores. Por otro lado en la Tabla 5.27, se observa que fueron cuatro las variables que no aprueban la prueba del límite de confianza por lo que se repite la prueba, obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 5.28 a la 5.30:

Tabla 5.28: Estadísticas de la regresión corregida Tercer Trimestre 2013

Segunda Prueba - Tercer Trimestre	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.4357
Coefficiente de determinación R ²	0.1898
R ² ajustado	0.1860
Error típico	0.2364
Observaciones	2167

Tabla 5.29 Análisis Anova corregida Tercer Trimestre 2013

ANOVA				
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	10	28.2176	2.8218	51
Residuos	2156	120.4477	0.0559	2.15E-91
Total	2166	148.6652		

Tabla 5.30 Regresión Lineal corregida Tercer Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.4947	0.1816	2.7237	0.0065	0.1385	0.8508	0.0264	0.9629
Mo Conc Rou	0.0483	0.0056	8.5939	0.0000	0.0373	0.0593	0.0338	0.0628
pH Col Cu	-0.0788	0.0151	-5.2321	0.0000	-0.1084	-0.0493	-0.1177	-0.0400
Agua Lav Col 4	0.0037	0.0003	12.2544	0.0000	0.0031	0.0043	0.0029	0.0045
Agua Lav Col 5	-0.0011	0.0003	-3.6821	0.0002	-0.0017	-0.0005	-0.0018	-0.0003
Flujo Aire Col 2	0.0018	0.0005	3.6334	0.0003	0.0008	0.0027	0.0005	0.0030
Flujo Aire Col 3	0.0026	0.0006	4.2402	0.0000	0.0014	0.0038	0.0010	0.0041
Flujo Aire Col 4	-0.0021	0.0007	-3.2521	0.0012	-0.0034	-0.0008	-0.0038	-0.0004
Nivel Col 3	0.0047	0.0010	4.9175	0.0000	0.0028	0.0066	0.0022	0.0072
Nivel Col 4	0.0041	0.0011	3.6893	0.0002	0.0019	0.0062	0.0012	0.0069
Nivel Col 5	-0.0027	0.0005	-4.9430	0.0000	-0.0037	-0.0016	-0.0041	-0.0013

Una vez que se han eliminado las variables que no pasaron la prueba del 95% de confianza, se grafican los residuos, los cual se indica en la Fig. 5.25:

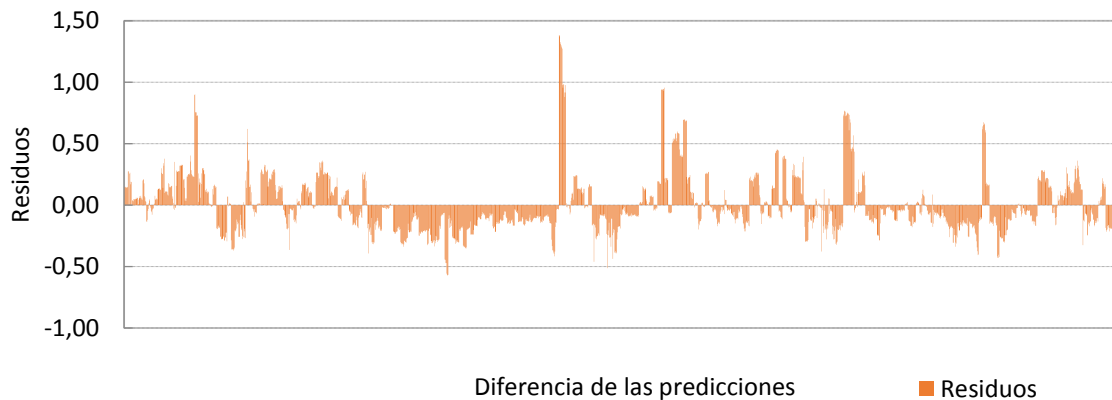


Figura 5.25: Distribución de residuos correspondientes al 3er trimestre 2013.

La gráfica de los residuos no es muy simétrica en torno al eje de las abscisas, por lo que se revisa la cantidad de errores menores al $\pm 5\%$, resultando ser el 100%. Por lo tanto, se valida el modelo para este tercer trimestre.

A continuación se presenta la gráfica correspondiente al periodo de estudio, para la ley de Mo en el concentrado mixto y los resultados del modelo.

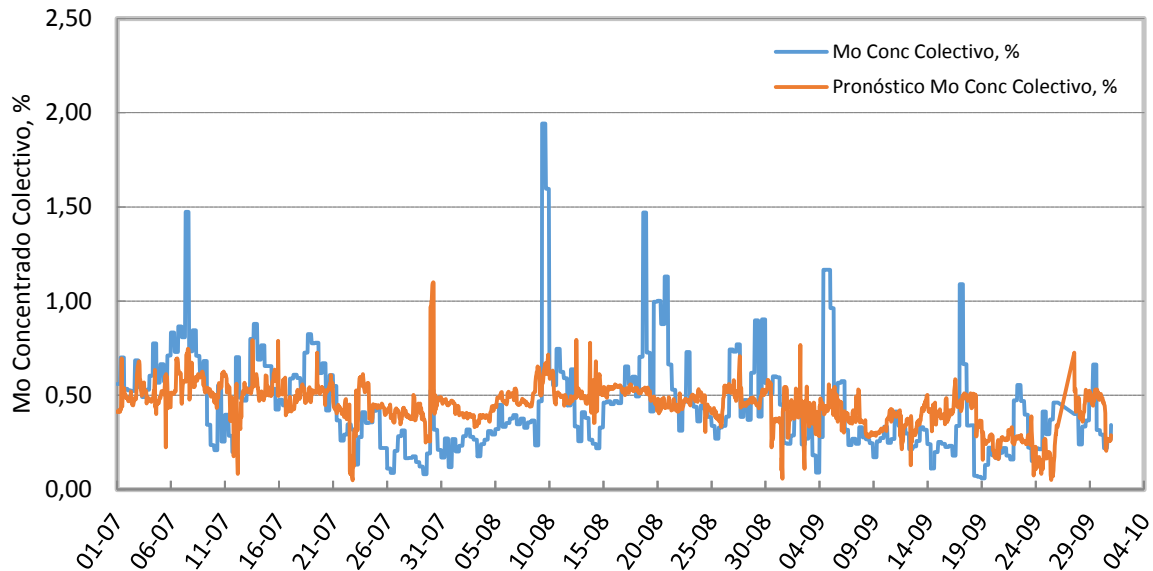


Figura 5.26: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 3er trimestre, Valor Modelo v/s Real.

Como se puede observar en la Fig. 5.26, los valores entregados según el modelo se alejan mucho más en comparación a los anteriores, esto se debe al bajo coeficiente de distribución.

Finalmente el modelo se comporta de la siguiente forma:

$$\text{Ley de Mo Conc Mixto} = 0.0483 \cdot A - 0.0788 \cdot B + 0.0037 \cdot E - 0.0011 \cdot F + 0.0018 \cdot G + 0.0026 \cdot H - 0.0021 \cdot H - 0.0021 \cdot I + 0.0047 \cdot L + 0.0041 \cdot M - 0.0027 \cdot N + 0.4947.$$

5.2.5 Regresión Cuarto Trimestre

Finalmente corresponde realizar el modelo para el periodo correspondiente entre octubre y diciembre de 2013, para esto se realizó la regresión obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 5.31 a la 5.33:

Tabla 5.31: Estadísticas de la regresión Cuarto Trimestre 2013

Primera Prueba - Cuarto Trimestre	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6685
Coefficiente de determinación R ²	0.4469
R ² ajustado	0.4433
Error típico	0.2165
Observaciones	2186

Tabla 5.32 Análisis Anova Tercer Cuarto 2013

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	14	8E+01	6E+00	1E+02	1E-266
Residuos	2171	1E+02	5E-02		
Total	2185	2E+02			

Tabla 5.33 Regresión Lineal Cuarto Trimestre 2013

Variables	Coef	Error típico	Estadístico t	Prob	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99%	Superior 99%
Intercepto	0.3147	0.1055	2.9838	0.0029	0.1079	0.5216	0.0428	0.5867
Mo Conc Rou	1.4669	0.0430	34.0892	0.0000	1.3825	1.5513	1.3560	1.5779
pH Col Cu	-0.0360	0.0080	-4.5303	0.0000	-0.0516	-0.0204	-0.0565	-0.0155
Agua Lav Col 2	0.0010	0.0003	3.1904	0.0014	0.0004	0.0015	0.0002	0.0017
Agua Lav Col 3	0.0011	0.0004	3.0228	0.0025	0.0004	0.0017	0.0002	0.0020
Agua Lav Col 4	0.0005	0.0004	1.2418	0.2145	-0.0003	0.0013	-0.0006	0.0016
Agua Lav Col 5	-0.0017	0.0003	-5.4793	0.0000	-0.0023	-0.0011	-0.0025	-0.0009
Flujo Aire Col 2	0.0014	0.0004	3.3095	0.0009	0.0006	0.0022	0.0003	0.0025
Flujo Aire Col 3	0.0013	0.0004	2.9106	0.0036	0.0004	0.0022	0.0001	0.0025
Flujo Aire Col 4	-0.0022	0.0005	-4.8229	0.0000	-0.0031	-0.0013	-0.0034	-0.0010
Flujo Aire Col 5	0.0007	0.0006	1.1862	0.2357	-0.0005	0.0019	-0.0008	0.0022

Nivel Col 2	-0.0016	0.0008	-1.9387	0.0527	-0.0032	0.0000	-0.0037	0.0005
Nivel Col 3	0.0029	0.0013	2.1984	0.0280	0.0003	0.0055	-0.0005	0.0063
Nivel Col 4	-0.0010	0.0008	-1.2684	0.2048	-0.0026	0.0006	-0.0031	0.0011
Nivel Col 5	-0.0001	0.0010	-0.1145	0.9088	-0.0021	0.0019	-0.0027	0.0025

Desde la Tabla 5.31, se puede observar que el coeficiente de determinación corresponde a un valor de 0.44, la prueba F del Anova, Tabla 5.32, rechaza la hipótesis de no vinculación entre variables. Por otro lado, desde la Tabla 5.33, Las variables que no pasan la prueba del límite de confianza son: “Agua de lavado Columna 4”, “Flujo de aire columna 5” y nivel de espuma en columnas 2, 4 y 5. Se repite la prueba eliminando las variables rechazadas y se obtiene una segunda prueba donde sale rechazada el “nivel de espuma de la columna 3”. Por lo tanto, se repite la prueba eliminando la variable mencionada y destacando que para este periodo los niveles de espuma, no tienen incidencia en el modelo, Los resultados en las Tablas 5.34 a la 5.36.

Tabla 5.34: Estadísticas de la regresión corregida Cuarto Trimestre 2013

Tercera Prueba - Cuarto Trimestre	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6663
Coefficiente de determinación R ²	0.4440
R ² ajustado	0.4420
Error típico	0.2168
Observaciones	2186

Tabla 5.35 Análisis Anova corregida Cuarto Trimestre 2013

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	8	8.17E+01	1.02E+01	2.17E+02	6.03E-271
Residuos	2177	1.02E+02	4.70E-02		
Total	2185	1.84E+02			

Tabla 5.36 Regresión Lineal corregida Cuarto Trimestre 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.3016	0.0719	4.1980	0.0000	0.1607	0.4425	0.1164	0.4869
Mo Conc Rou	1.4716	0.0424	34.6733	0.0000	1.3884	1.5548	1.3622	1.5810
pH Col Cu	-0.0324	0.0073	-4.4344	0.0000	-0.0467	-0.0181	-0.0512	-0.0136
Agua Lav Col 2	0.0011	0.0003	3.8222	0.0001	0.0005	0.0016	0.0004	0.0018
Agua Lav Col 3	0.0011	0.0003	4.2248	0.0000	0.0006	0.0017	0.0004	0.0018
Agua Lav Col 5	-0.0016	0.0003	-5.6161	0.0000	-0.0022	-0.0011	-0.0024	-0.0009
Flujo Aire Col 2	0.0017	0.0004	4.2165	0.0000	0.0009	0.0024	0.0006	0.0027
Flujo Aire Col 3	0.0015	0.0004	3.8022	0.0001	0.0007	0.0023	0.0005	0.0026
Flujo Aire Col 4	-0.0020	0.0004	-5.4439	0.0000	-0.0027	-0.0013	-0.0029	-0.0010

Con la regresión lineal corregida se obtiene un coeficiente de determinación del 0.44, se rechaza la hipótesis alternativa por la prueba F, por lo que las variables tienen relación entre sí. Por lo que se procede a graficar en la Fig. 5.24, los residuos entre las predicciones del modelo y los valores reales de la ley de Mo en el concentrado mixto.

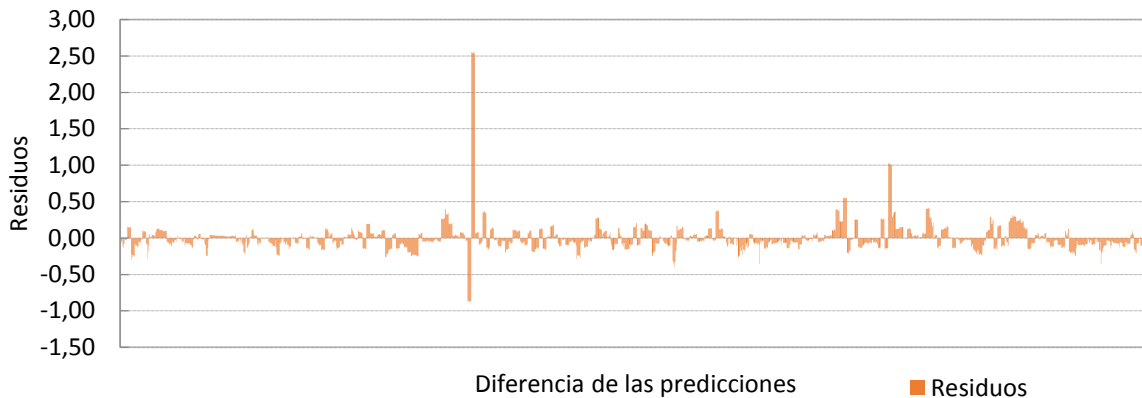


Figura 5.27: Distribución de residuos correspondientes a 4to trimestre 2013

Se analiza si al menos el 75% de la diferencia entre las predicciones y los valores reales no supera el $\pm 5\%$ y el 100% cumple. Cabe mencionar que existe un residuo que alcanza un valor de 2.5, esto debido a un alto valor de ley de Mo en concentrado mixto registrado, por un error operacional. Por lo tanto se acepta el modelo para el periodo en cuestión. Siendo representado de la siguiente forma:

$$\text{Ley Mo Conc Mixto} = 1.4716 \cdot A - 0.0324 \cdot B + 0.0011 \cdot C + 0.011 \cdot D - 0.0016 \cdot F + 0.0017 \cdot G + 0.0015 \cdot H - 0.0020 \cdot I + 0.3016$$

La Fig. 5.28 representa valores reales y los entregados por el modelo:

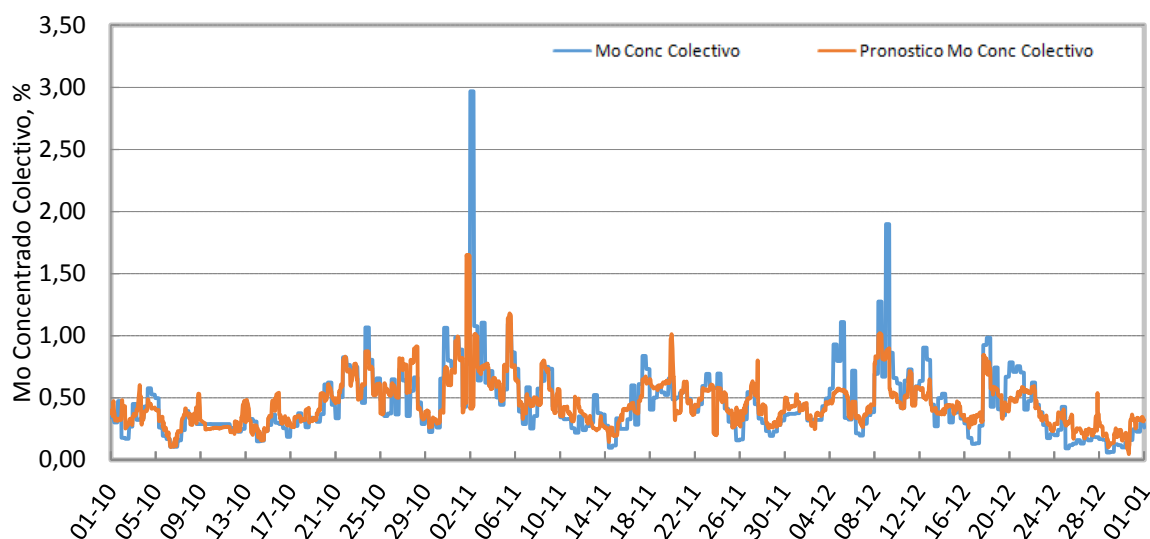


Figura 5.28: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto 4to trimestre, Valor Modelo v/s Real

5.2.6 Modelo Final

A través del procedimiento practicado con los trimestres de 2013, se efectuó el tratamiento para la totalidad del año 2013, debería encontrarse un modelo que se asemeje en coeficiente de distribución a la media entre los cuatro trimestres. A continuación en las Tablas 5.37 a la 5.39 se presenta el análisis de la regresión lineal para el año 2013:

Tabla 5.37: Estadísticas de la regresión Año 2013

Primera Prueba - Anual	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7660
Coefficiente de determinación R ²	0.5867
R ² ajustado	0.5860
Error típico	0.1626
Observaciones	8225

Tabla 5.38 Análisis Anova Año 2013

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	308.0529	22.0038	832.5923	0
Residuos	8210	216.9742	0.0264		
Total	8224	525.0271			

Tabla 5.39 Regresión Lineal Año 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.1499	0.0543	2.7608	0.0058	0.0435	0.2564	0.0100	0.2898
Mo Conc Rou	1.5623	0.0153	101.9920	0.0000	1.5323	1.5923	1.5229	1.6018
pH Col Cu	-0.0133	0.0045	-2.9237	0.0035	-0.0222	-0.0044	-0.0250	-0.0016
Flujo Aire Col 2	0.0004	0.0001	2.9527	0.0032	0.0001	0.0006	0.0000	0.0007
Flujo Aire Col 3	0.0002	0.0001	1.4342	0.1516	-0.0001	0.0004	-0.0001	0.0005
Flujo Aire Col 4	-0.0005	0.0001	-4.5271	0.0000	-0.0007	-0.0003	-0.0007	-0.0002
Flujo Aire Col 5	0.0003	0.0001	2.2245	0.0261	0.0000	0.0005	0.0000	0.0006
Agua Lav Col 2	-0.0001	0.0001	-1.0444	0.2963	-0.0004	0.0001	-0.0005	0.0002
Agua Lav Col 3	0.0005	0.0001	4.6487	0.0000	0.0003	0.0007	0.0002	0.0008
Agua Lav Col 4	-0.0001	0.0001	-0.5055	0.6132	-0.0003	0.0002	-0.0004	0.0002
Agua Lav Col 5	0.0001	0.0001	1.0159	0.3097	-0.0001	0.0003	-0.0002	0.0004
Nivel Col 2	0.0004	0.0003	1.3622	0.1732	-0.0002	0.0010	-0.0004	0.0012
Nivel Col 3	0.0006	0.0003	1.9557	0.0505	0.0000	0.0013	-0.0002	0.0015
Nivel Col 4	-0.0007	0.0003	-2.3437	0.0191	-0.0012	-0.0001	-0.0014	0.0001
Nivel Col 5	0.0003	0.0003	1.0771	0.2815	-0.0002	0.0008	-0.0004	0.0009

Se revisa las variables que no cumplen con el límite de confianza y en una segunda prueba se obtiene la prueba final, con los coeficientes y datos que se procederá a analizar en las Tablas 5.40 a la 5.42:

Tabla 5.40: Estadísticas de la regresión corregida Año 2013

Segunda Prueba - Anual	
Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7641
Coefficiente de determinación R ²	0.5838
R ² ajustado	0.5836
Error típico	0.1630
Observaciones	8225

Tabla 5.41 Análisis Anova corregida Año 2013

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	306.5328	61.3066	2306.1410	0
Residuos	8219	218.4943	0.0266		
Total	8224	525.0271			

Tabla 5.42 Regresión Lineal corregida Año 2013

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepción	0.2245	0.0524	4.2877	0.0000	0.1219	0.3271	0.0896	0.3594
Mo Conc Rou	1.5741	0.0151	104.1297	0.0000	1.5444	1.6037	1.5351	1.6130
Nivel Col 4	0.0004	0.0002	2.0512	0.0403	0.0000	0.0007	-0.0001	0.0008
pH Col Cu	-0.0159	0.0044	-3.5907	0.0003	-0.0246	-0.0072	-0.0274	-0.0045
Agua Lav Col 3	0.0004	0.0001	5.5271	0.0000	0.0003	0.0006	0.0002	0.0006
Flujo Aire Col 4	0.0002	0.0000	3.2781	0.0010	0.0001	0.0002	0.0000	0.0003

De la regresión lineal corregida se puede ver en la Tabla 5.40, de estadísticas de la regresión que el coeficiente de determinación tiene el valor de 0.58. En la prueba F, Tabla 5.41, rechazando la hipótesis de no vinculación entre variables, las variables dependientes tienen relación con la independiente. Por último, en la Tabla 5.42 se encuentran las variables analizadas con sus coeficientes respectivos.

Estas variables son:

- ❖ Ley de Mo en Concentrado Rougher.
- ❖ Nivel de espuma en Columna 4.
- ❖ pH de Columnas Colectivas.
- ❖ Flujo de Agua de Lavado en Columna 3.
- ❖ Flujo de Aire en Columna 4.

A continuación se presenta en la Tabla 5.43 un resumen con los coeficientes de los 4 periodos en cuestión, donde se puede observar que la media de estos mismos se acerca a los resultados finales del modelo anual.

Tabla 5.43: Resumen de coeficientes para cada tiempo estudiado.

Variables	Trimestres 2013				Media	Anual
	1er	2do	3er	4to		
Coefficiente de determinación R ²	0.9734	0.6303	0.1898	0.4440	0.5594	0.5838
Intercepto	0.0782	0.2143	0.4947	0.3016	0.2722	0.2245
Mo Conc Rougher	1.1963	1.7297	0.0483	1.4716	1.1115	1.5741
pH Columnas Cu			-0.0788	-0.0324	-0.0556	-0.0159
Agua Lavado Col 2	-0.0005	-0.0020		0.0011	-0.0005	
Agua Lavado Col 3				0.0011	0.0011	
Agua Lavado Col 4	-0.0004	0.0011	0.0037		0.0015	
Agua Lavado Col 5	0.0008		-0.0011	-0.0016	-0.0006	
Flujo Aire Col 2	0.0005		0.0018	0.0017	0.0013	
Flujo Aire Col 3	-0.0004		0.0026	0.0015	0.0012	0.0004
Flujo Aire Col 4	-0.0005		-0.0021	-0.0020	-0.0015	0.0002
Flujo Aire Col 5	0.0006				0.0006	
Nivel Col 2	0.0012				0.0012	
Nivel Col 3	-0.0015		0.0047		0.0016	
Nivel Col 4	-0.0008		0.0041		0.0016	0.0004
Nivel Col 5	0.0021		-0.0027		-0.0003	

Pese a que todo indicaría que el modelo según la base de datos anual también debiese aceptarse, se procederá a revisar el gráfico de los residuos y la cantidad de errores en las Fig. 5.29 y Fig. 5.30 que debe ser menor que al 25% para valores que escapen del $\pm 5\%$.

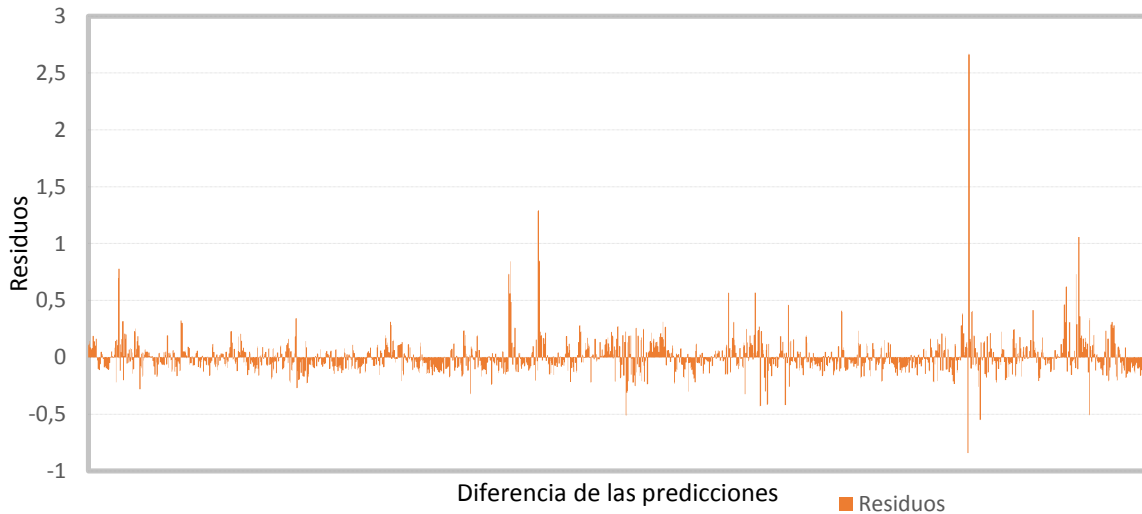


Figura 5.29: Distribución de residuos correspondientes al año 2013

Analizando los errores entre el valor entregado por el modelo versus los valores reales, el 100% de los errores percibidos es menor al $\pm 5\%$. Por lo tanto se acepta el modelo.

A continuación se presenta en la Fig. 5.30 ambos valores a través del tiempo:

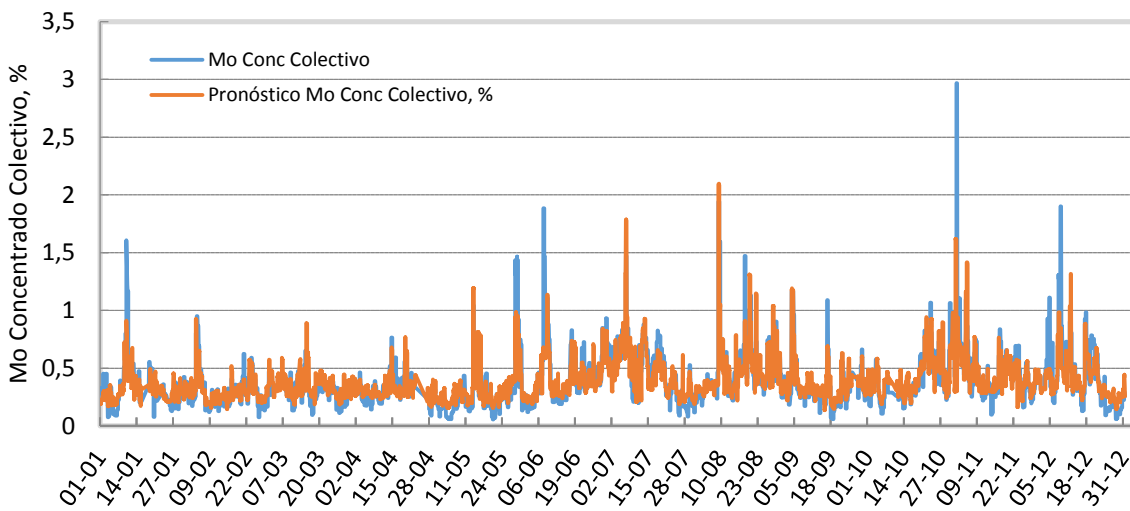


Figura 5.30: Comportamiento ley de Mo en el concentrado mixto Anual, Valor Modelo v/s Real

El modelo se representa de la siguiente forma:

$$\text{Ley Mo Conc Mixto} = 1.5741 \cdot A - 0.0159 \cdot B + 0.004 \cdot D + 0.002 \cdot I + 0.004 \cdot M + 0.2245.$$

Se observa que en el periodo octubre – noviembre existe un peak de ley de Mo en el concentrado mixto, debido a falla operacional.

5.2.7 Análisis de Sensibilidad

Una vez determinado el modelo final que representa la ley de Mo en el concentrado mixto, se procede a realizar el análisis de sensibilidad, para comprender el orden de implicancia, que tiene cada variable sobre la ley de concentrado.

De esta forma se realiza el análisis de la estadística descriptiva en la Tabla 5.44, que nos entrega una gran cantidad de información acerca de cada variable en cuestión, pero se centrará la atención en la desviación estándar de cada una.

Tabla 5.44: Estadística descriptiva de cada variable del modelo final

	<i>Mo Conc Rougher</i>	<i>Nivel Col 4</i>	<i>pH Columnas</i>	<i>Agua Lavado Col 3</i>	<i>Flujo Aire Col 4</i>
Media	0.1687	43.2211	11.0196	92.4961	162.1399
Error típico	0.0013	0.1345	0.0051	0.2939	0.5242
Mediana	0.1360	40.2496	11.0698	98.0400	165.7722
Moda	0.1180	100.2349	14.2800	0.0000	0.0000
Desviación estándar	0.1221	12.2019	0.4616	26.6551	47.5429
Varianza de la muestra	0.0149	148.8862	0.2131	710.4965	2260.3269
Curtosis	12.4700	7.0011	3.6344	1.8195	0.0036
Coefficiente de asimetría	2.6772	1.9836	-0.6222	-1.3078	-0.2193
Rango	1.2320	83.4680	5.2641	168.2789	274.5576
Mínimo	0.0130	19.5623	9.0159	0.0000	0.0000
Máximo	1.2450	103.0304	14.2800	168.2789	274.5576
Suma	1387	355493	90636	760780	1333600
Cuenta	8225	8225	8225	8225	8225

Una vez que se conoce la desviación estándar de cada variable se procede a realizar el análisis de sensibilidad, que en términos de cálculo corresponde al producto entre el coeficiente de cada variable con su desviación estándar. La implicancia de cada variable corresponde en valor absoluto al resultado mayor, es decir el que tenga mayor valor, será la variable que más influye en el modelo y así mismo en orden decreciente.

Tabla 5.45: Análisis de Sensibilidad de cada variable en el modelo final

	Desviación estándar	Coficiente	Sensibilidad
<i>Mo Conc Rougher</i>	0.1221	1.5741	0.1922
<i>Nivel Col 4</i>	12.2019	0.0004	0.0043
<i>pH Columnas</i>	0.4616	-0.0159	-0.0074
<i>Agua Lavado Col 3</i>	26.6551	0.0004	0.0111
<i>Flujo Aire Col 4</i>	47.5429	0.0002	0.0072

Desde el análisis de sensibilidad, Tabla 5.45, se determina que la influencia de cada variable según el valor absoluto de la columna Sensibilidad es el siguiente:

- ❖ Ley de Mo en Concentrado Rougher (Alimentación a etapa de limpieza)
- ❖ Flujo de Agua de Lavado Columna 3 (Variable manipulable en columnas)
- ❖ Flujo de Aire en Columna 4 (Variable manipulable en columnas)
- ❖ pH Columnas (Variable manipulable en columnas)
- ❖ Nivel de Espuma Columna 4 (Variable manipulable en columnas)

Por lo tanto, en este mismo orden, al manipular en terreno los parámetros usualmente utilizados por operaciones, se podría hallar mejores condiciones que colaboren en aumentar la ley de Mo en el concentrado mixto y por consiguiente la recuperación en planta selectiva.

5.3 MEJORAS EN LA LEY DE ALIMENTACIÓN A PLANTA SELECTIVA

Después de analizar los costos asociados a la planta selectiva, en conjunto con la ley de corte y el modelo que representa la ley de molibdeno en el concentrado mixto, se determinan las variables que producen mayor influencia en la variable independiente, las que corresponden a la ley de Mo en concentrado rougher, el flujo de agua de lavado, flujo de aire, nivel de espuma y pH en las columnas de la planta colectiva.

De estas cinco variables, se tomó como oportunidad de mejora trabajar con cada una de manera distinta, de tal forma de enriquecer la concentración de Mo en planta colectiva, para alimentar mejores leyes a la planta selectiva. A continuación se revisa cada estudio realizado.

5.3.1 Mejoras en Ley de Mo en Concentrado Rougher

La variable con mayor peso, según el análisis de sensibilidad corresponde a la ley de Mo en el concentrado rougher, que corresponde a la ley que se alimenta al circuito de limpieza de la planta colectiva correspondiente a las operaciones unitarias de: remolienda, columnas y línea scavenger.

Como se ha analizado, la ley de alimentación cumple un rol preponderante. Si la concentración alimentada al subproceso es baja, las mejores condiciones, ya sean cinética lenta o alta dosificación de reactivos, no serán suficientes para flotar el molibdeno, implicando mayor cantidad de costos asociados a reactivos y un tiempo de residencia superior, que en planta colectiva va relacionado con pérdida en la recuperación de cobre.

También es de importancia destacar que la ley de Mo en el concentrado rougher, no es una variable manipulable, sino más bien, una variable dependiente de factores asociados, como por ejemplo del nivel de espuma en celdas rougher, dosificación de reactivos, pH, etc.

A través de una serie de muestreos realizados en planta II, en una primera instancia se estudiará la cinética tanto para cobre como para molibdeno, analizando si los tiempos dedicados a flotación primaria son aptos para cumplir con las recuperaciones que se tienen por presupuesto para el molibdeno.^[6]

En una segunda instancia el muestreo se realizó celda por celda, para determinar el perfil de leyes existente en una de las tres líneas rougher, de esta forma se buscó comprender mejor la cinética del molibdeno que anteriormente había sido explicada a un nivel más general. Por último cabe destacar que la información disponible para la cinética del molibdeno en plantas de flotación colectiva, donde se trabaja con concentrados Cu-Mo es casi nula y aún está en desarrollo.

El primer estudio fue realizado en una totalidad de siete muestreos generales a la planta II, donde a partir de éstos, se realizó test de cinética en el laboratorio, tanto para Cu como para Mo.

A continuación en la Tabla 5.46 se presenta un resumen de los muestreos realizados en planta. A un costado de cada fecha en la cual se realizó el muestreo, se puede observar tanto para cobre como para molibdeno las leyes de alimentación, concentrado y relave obtenidas, seguidas de su recuperación metalúrgica que posteriormente servirán para encontrar los tiempos de flotación ideales al realizar las pruebas cinéticas en el laboratorio.

Tabla 5.46: Leyes y Recuperaciones de muestreos realizados en circuito rougher.

Fecha (Año 2013)	Metal	Ley Alimentación	Ley Concentrado	Ley Relave	Recuperación Planta
15-Oct	Cu	0.965	14.793	0.154	84.93
	Mo	0.015	0.177	0.006	64.88
21-Oct	Cu	1.037	11.86	0.092	91.84
	Mo	0.035	0.29	0.011	71.27
28-Oct	Cu	0.95	12.969	0.081	92.05
	Mo	0.025	0.221	0.01	62.84
04-Nov	Cu	0.747	11.957	0.07	91.13
	Mo	0.014	0.169	0.005	66.64
05-Nov	Cu	0.936	13.172	0.084	91.61
	Mo	0.053	0.558	0.018	68.62

11-Nov	Cu	1.118	10.631	0.077	91.94
	Mo	0.017	0.117	0.006	70.93
18-Nov	Cu	0.982	13.066	0.085	91.94
	Mo	0.032	0.326	0.01	70.93

A continuación lo que corresponde es realizar las pruebas cinéticas con el propósito de representar a escala de laboratorio cada muestreo realizado. Para esto se utiliza cada muestra de “alimentación rougher”, además de los reactivos que son alimentados al inicio del circuito, como lo son el ditiofosfato, diesel y MIBC.

Las pruebas se realizan en celdas de flotación Batch, llamadas así, ya que no se alimenta mineral continuamente, las celdas son agitadas mecánicamente y el aire se introduce a través de una tubería perforada que rodea al rotor. Las pruebas se realizan con agua industrial, se controla el pH y se toma muestra de concentrado a los 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 7.0, 9.0, 13.0 y 15.0 minutos, para posteriormente establecer los parámetros cinéticos k y R_{∞} de cada metal de interés contenido en el mineral.

Esto se realiza colectando los concentrados parciales a los tiempos mencionados, los que son pesados y caracterizados según la ley de cada elemento de interés. Con los resultados se calcula la recuperación para cada tiempo y su recuperación acumulada $[R(t)]$. La búsqueda de estos resultados a nivel de laboratorio tiene como objetivo disminuir las perturbaciones que ocurren en planta, para de esta manera evaluar el mineral y los reactivos y de esta forma hallar la máxima recuperación que se podría alcanzar a condiciones ideales.

En las Tablas 5.47 y 5.48 y en las Fig.5.31 y 5.32 se presentan los resultados de las pruebas de cinética rougher del muestreo realizado el 04-11-2013 a modo de ejemplo, el resto de los resultados se adjuntan en el Anexo C.1.

Tabla 5.47: Muestra Planta II, Cinética Flotación Rougher CuT, 04-11-2013 TB.

Muestra Planta II TB		04-11-13							
N° Prueba	Pesos [g]	Cu T (%)	% Recuperación Peso		Ley		Recuperación Fino		
			Parcial	Acumulada	Parcial	Acumulada	Parcial	Acumulada	
1446	0.25	24.5	22.13	1.53	1.53	22.13	22.13	42.64	42.64
1446	0.5	9.8	15.46	0.61	2.14	15.46	20.22	11.92	54.56
1446	1.0	12.9	13.65	0.81	2.95	13.65	18.43	13.85	68.41
1446	1.5	10.4	8.16	0.65	3.60	8.16	16.57	6.67	75.08
1446	3.0	20.8	5.23	1.30	4.89	5.23	13.56	8.56	83.64
1446	7.0	58.5	1.59	3.65	8.55	1.59	8.45	7.33	90.97
1446	9.0	13.0	0.59	0.81	9.36	0.59	7.77	0.60	91.57
1446	13.0	31.2	0.54	1.95	11.31	0.54	6.52	1.32	92.90
1446	15.0	15.9	0.56	0.99	12.30	0.56	6.04	0.70	93.59
1446	Relave Rgh.	1404.9	0.06	87.70		0.06		6.41	
Alimentación		1601.9	0.794	100.00				100.00	

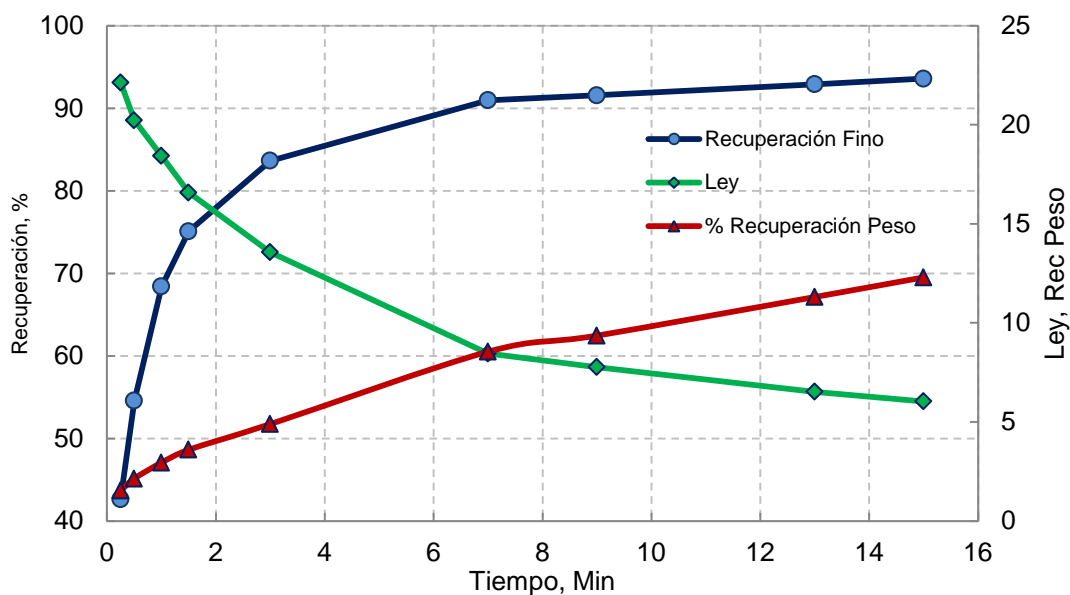


Figura 5.31: Cinética de Flotación Rougher, 04-11-2013, CuT

Tabla 5.48: Muestra Planta II, Cinética Flotación Rougher MoT, 04-11-2013 TB.

Muestra Planta II TB		04-11-13							
N° Prueba	Peso Minutos	Mo T [g]	% Recuperación Peso		Ley		Recuperación Fino		
			Parcial	Acumulada	Parcial	Acumulada	Parcial	Acumulada	
1446	0.25	24.5	0.21	1.53	1.53	0.21	0.21	20.67	20.67
1446	0.5	9.8	0.19	0.61	2.14	0.19	0.21	7.53	28.20
1446	1.0	12.9	0.19	0.81	2.95	0.19	0.20	9.70	37.90
1446	1.5	10.4	0.13	0.65	3.60	0.13	0.19	5.53	43.43
1446	3.0	20.8	0.11	1.30	4.89	0.11	0.17	9.32	52.75
1446	7.0	58.5	0.06	3.65	8.55	0.06	0.12	13.80	66.55
1446	9.0	13.0	0.03	0.81	9.36	0.03	0.11	1.40	67.95
1446	13.0	31.2	0.02	1.95	11.31	0.02	0.10	2.75	70.70
1446	15.0	15.9	0.02	0.99	12.30	0.02	0.09	1.21	71.91
1446	Relave Rgh.	1404.9	0.01	87.70			0.01	28.09	
	Alimentación	1601.9	0.016	100.00				100.00	

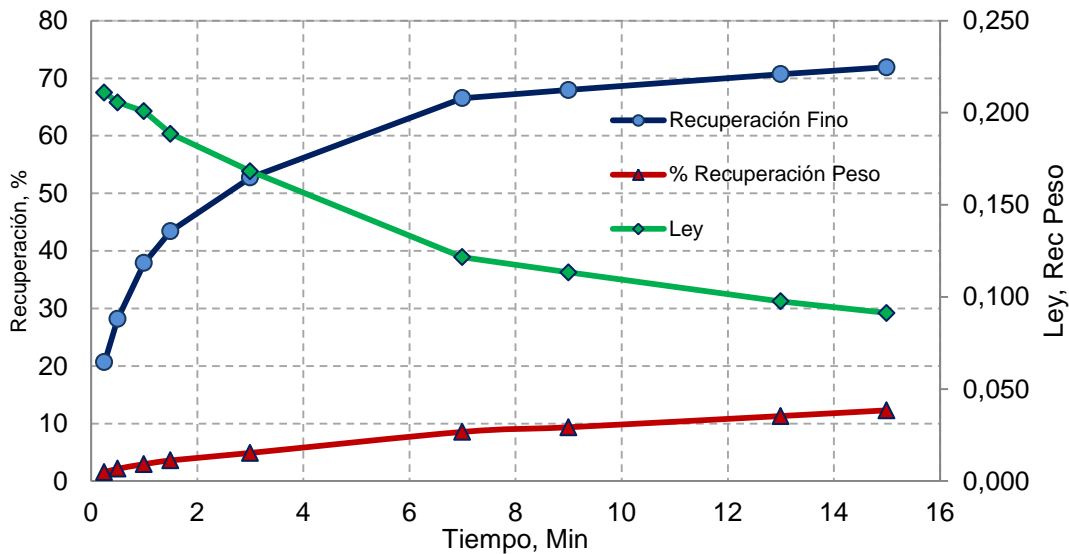


Figura 5.32: Cinética de Flotación Rougher, 04-11-2013, MoT

Basándose en los resultados presentados en las Tablas 5.47 y 5.48, se cuenta con las recuperaciones de Cu y Mo para el laboratorio y junto con los valores presentados en la Tabla 5.46 con un 91.13% para el Cu y 66.64% para el Mo se tienen las recuperaciones de la planta, para las mismas muestras. Con esta información se procede a realizar la estimación de los tiempos de flotación aptos para la flotación primaria, encontrando el valor de la recuperación infinita. Se

reconoce que la condición de flotación Batch es más ideal que la de planta, por lo que las recuperaciones obtenidas en laboratorio debiesen generalmente ser mejores. Con esa información de las tablas 5.47 y 5.48 en conjunto con las Fig.5.31 y 5.32 se obtienen las recuperaciones de flotación a nivel laboratorio.

La estimación de los tiempos se efectuó por medio de tres métodos de cálculo, dos estimando la recuperación infinita (R_{∞}) y la constante cinética k , a través del modelo de García y Zúñiga y el modelo de Klimpel y el tercero por intermedio de interpolación logarítmica. Las fórmulas correspondientes se presentan a continuación:

Para García y Zúñiga:

$$R = R_{\infty} \cdot [1 - \exp(-k \cdot t)] \quad (9)$$

Utilizado en casos donde el suministro de aire es constante y los cambios en la concentración de las burbujas es despreciable, se considera cinética de primer orden ($n=1$).^[3]

Para Klimpel:

$$R = R_{\infty} \left[1 - \left(\frac{1}{k \cdot t} \right) \cdot (1 - \exp(-k \cdot t)) \right] \quad (10)$$

Klimpel extiende las dos fracciones, cinética lenta y rápida de flotación a infinitas fracciones flotables, todas de igual magnitud, cada una con su propia constante cinética. El modelo es muy usado ya que ajusta bien los datos experimentales en la parte final de la curva, por otro lado la constante cinética de Klimpel no puede ser determinada gráficamente, se debe utilizar un método de ajuste de parámetros.^[3]

Para Interpolación Logarítmica:

$$Y(x) = y_1 \cdot \left(\frac{x}{x_1} \right) \cdot \exp \left(\frac{\log \left(\frac{y_2}{y_1} \right)}{\log \left(\frac{x_2}{x_1} \right)} \right) \quad (11)$$

Entendiendo que las curvas de recuperación acumulada corresponden a comportamientos semi-logarítmicos, la interpolación entre las recuperaciones de planta y laboratorio para obtener los tiempos, corresponde realizarlo de esta forma.

Es así como por intermedio del trabajo en laboratorio, se realizó la estimación de parámetros, tanto para el modelo de García y Zúñiga, como para el de Klimpel obteniendo los resultados para el día 04-nov mostrados en la Tabla 5.49. Además se representa en las Fig. 5.33-5.34 las curvas de recuperación tanto para Mo como para Cu respectivamente, correspondiente a cada modelo además de la recuperación obtenida en flotación batch.

Tabla 5.49: Resultados Estimación de parámetros para García y Zúñiga, Klimpel.

	García y Zúñiga		Klimpel	
	Cu	Mo	Cu	Mo
Error 2	383.3	291.6	82.0	117.7
k [1/min]	1.58	0.69	4.30	1.80
R_{∞} [%]	93.59	71.91	93.59	71.94
R^2	0.9420	0.9660	0.9756	0.9692
Tiempo [min]	2.30	3.81	8.84	7.55
Rec en Planta [%]	91.13	66.64	91.13	66.64

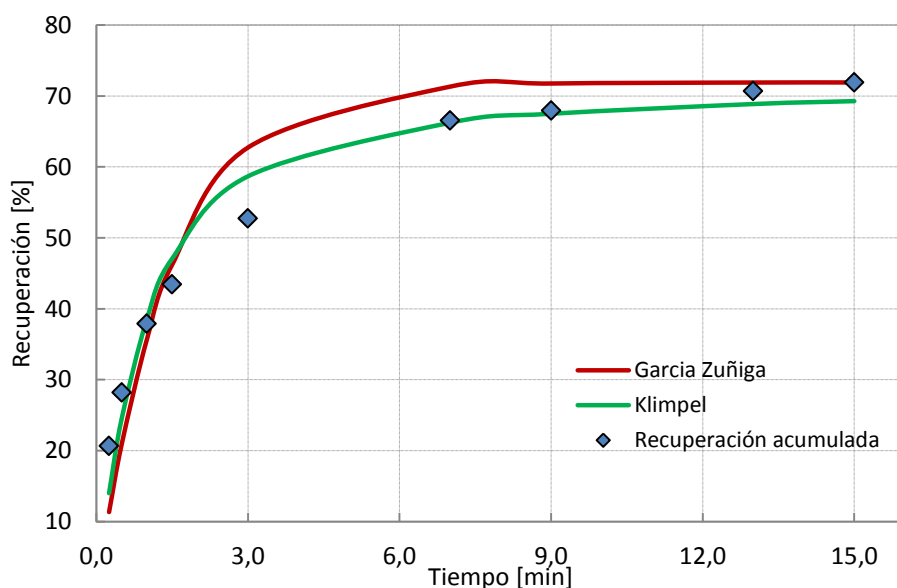


Figura 5.33: Estimación de parámetros para García Zúñiga y Klimpel, 04-11-2013, MoT.

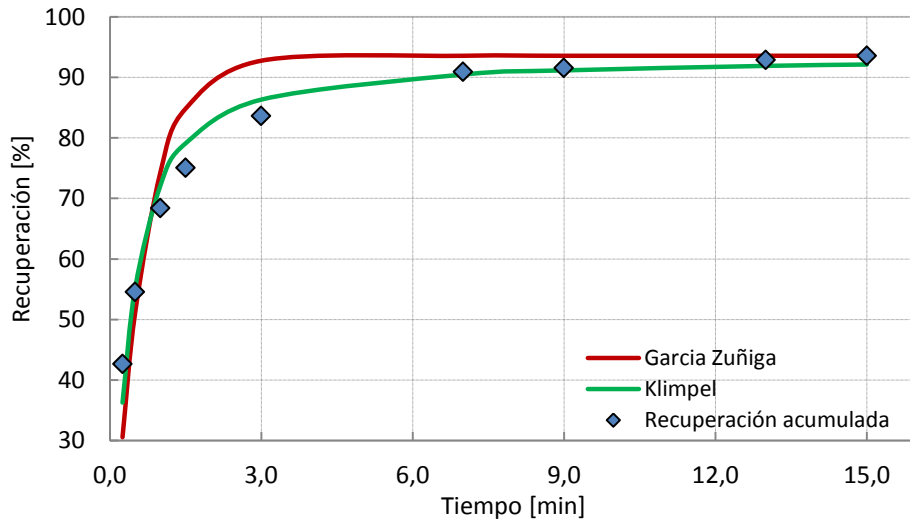


Figura 5.34: Estimación de parámetros para García Zúñiga y Klimpel, 04-11-2013, CuT.

En las Fig 5.33-5.34 se puede observar la recuperación acumulada en el tiempo tanto para Cu como para Mo además de las recuperaciones obtenidas según el modelo de García y Zúñiga y el modelo de Klimpel. De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo de Klimpel es el que mejor se ajusta a los valores obtenidos en laboratorio. Estos valores se ven representados por un 0.97 y 0.96 de coeficiente de distribución, superior a los valores de 0.94 y 0.96 obtenidos por García y Zúñiga (Tabla 5.49).

A continuación se presenta en las Tablas 5.50-5.51 los tiempos de residencia obtenidos para cada uno de los muestreos realizados, tanto para cobre como para molibdeno, utilizando los métodos según las Ec.9-10-11.

Tabla 5.50: Tiempos de Flotación García y Zúñiga, Klimpel e Interpolación Logarítmica para Cobre.

	Cobre		
	García	Klimpel	Log
15-oct	2.13	3.85	3.93
21-oct	2.23	8.55	6.29

28-oct	2.66	14.40	8.66
04-nov	2.30	8.84	7.49
05-nov	2.87	6.83	6.47
11-nov	6.04	15.36	15.00
18-nov	2.38	5.49	5.62
	2.94	9.05	7.64

Tabla 5.51: Tiempos de Flotación García y Zúñiga, Klimpel e Interpolación Logarítmica para Molibdeno.

Molibdeno			
	García	Klimpel	Log
15-oct	13.04	14.85	15.00
21-oct	14.68	13.39	15.00
28-oct	13.22	14.91	15.00
04-nov	3.81	7.55	7.11
05-nov	12.58	14.57	15.00
11-nov	14.30	14.50	15.00
18-nov	12.44	14.03	15.00
	12.01	13.40	13.87

Finalmente según lo expuesto en las Tablas 5.50 – 5.51, por García y Zúñiga se obtiene que los tiempos requeridos en laboratorio para alcanzar la recuperación en planta corresponden a 2.94 min para el Cu y 12.01 min para el Mo. Por Klimpel se obtiene 9.05 min para Cu y 13.40 min para Mo y por último según interpolación logarítmica se obtiene 7.64 min para Cu y 13.87 min para Mo.

Para decidir qué tiempos utilizar para el futuro escalamiento, se decide descartar los valores entregados por García y Zúñiga, ya que el “error 2” observado en Tabla 5.49, que corresponde a la diferencia de cuadrados minimizada por función objetivo, es mayor que la resultante por Klimpel. Además los coeficientes de distribución son menores a los obtenidos por Klimpel (Tabla 5.49), infiriendo en valores más cercanos al real (valores de planta) al calcular por Klimpel. De esta forma los tiempos medios obtenidos para Cobre entregan un valor de 8.34 min y los de Molibdeno 13.64 min en flotación a escala de laboratorio.

En la Tabla 5.52 se observa los datos de diseño de la planta II para realizar el escalamiento, seguido de la Tabla 5.53 donde se presentan los valores de Q_p (Flujo volumétrico de pulpa), V_c (Volumen circuito de flotación) y el número de celdas obtenido, donde este último valor no debe ser mayor a 21 que es el número total de celdas disponibles en el circuito rougher. Previo a Tabla 5.53 se presentan las formulas utilizadas.

Tabla 5.52: Datos según diseño para Escalamiento tiempos laboratorio a Planta

	Diseño Cu	Diseño Mo
Tratamiento [tpd]	105360	105360
Porcentaje Sólidos [%]	32	32
Tiempo Lab [min]	8.34	13.64
Factor Escalamiento	2.32	2.32
Tiempo Planta [min]	19.35	31.64
Densidad pulpa [lb/pt^3]	2.8	2.8
Volumen celda [pt^3]	9075	9075
Factor espuma	0.85	0.85

$$Q_p = \frac{TMD}{40.78} \cdot \left(\frac{L}{S} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (12)$$

$$V_c = Q_p \cdot \text{Tiempo Planta} \quad (13)$$

$$N^{\circ} \text{celdas} = \frac{V_c}{\text{Volumen Celda}} \cdot \text{factor espuma} \quad (14)$$

Tabla 5.53: Resultados para Q_p , V_c y Número de Celdas.

Cálculos	Cu	Mo
Q_p [pt^3/min]	6413	6413
V_c [pt^3]	124104	202878
N° celdas	11.62	19.00

En la Tabla 5.54 se observa los resultados del escalamiento de los tiempos de laboratorio a planta para cada muestreo realizado seguido de la media obtenida tanto para Cu, como para Mo.

Tabla 5.54: Escalamiento tiempos laboratorio a Planta

	Cobre	Molibdeno
15-oct	9.02	34.63
21-oct	17.22	32.93
28-oct	26.76	34.70
04-nov	18.94	17.01
05-nov	15.43	34.30
11-nov	35.22	34.22
18-nov	12.89	33.67
	19.35	31.64

Finalmente los resultados obtenidos indican tiempos de residencia de 19.35 min de flotación rougher en planta para el Cu y 31.64 min para el Mo. De esta forma se hace evidente que la cinética de flotación para Cu y Mo es muy diferente, necesitando el Mo un mayor tiempo de residencia, atribuido esencialmente a problemáticas asociadas a falta de liberación, molibdenita depresada por exceso de cal o molibdenita muy fina, expresándose en velocidades de flotación más lenta que la del cobre debido a problemas hidrodinámicos, especialmente relativos al tamaño de burbuja ^[5], tema que se analizará más adelante.

En consecuencia, se decide muestrear celda por celda la línea centro del circuito rougher para comprender el perfil de leyes de cada metal de interés y así tomar decisiones que manifiesten mejoras en la recuperación y concentración de Mo en la planta colectiva, entregando un indicio de las tareas a realizar en futuros estudios.

En la Fig. 5.35 se puede observar las leyes de alimentación a la línea rougher centro, acompañada de los resultados obtenidos al muestreo celda por celda, siete en total, tanto para concentrado como para relave referente al Mo, mientras que los resultados para Cu se presentan en el Anexo C.2.

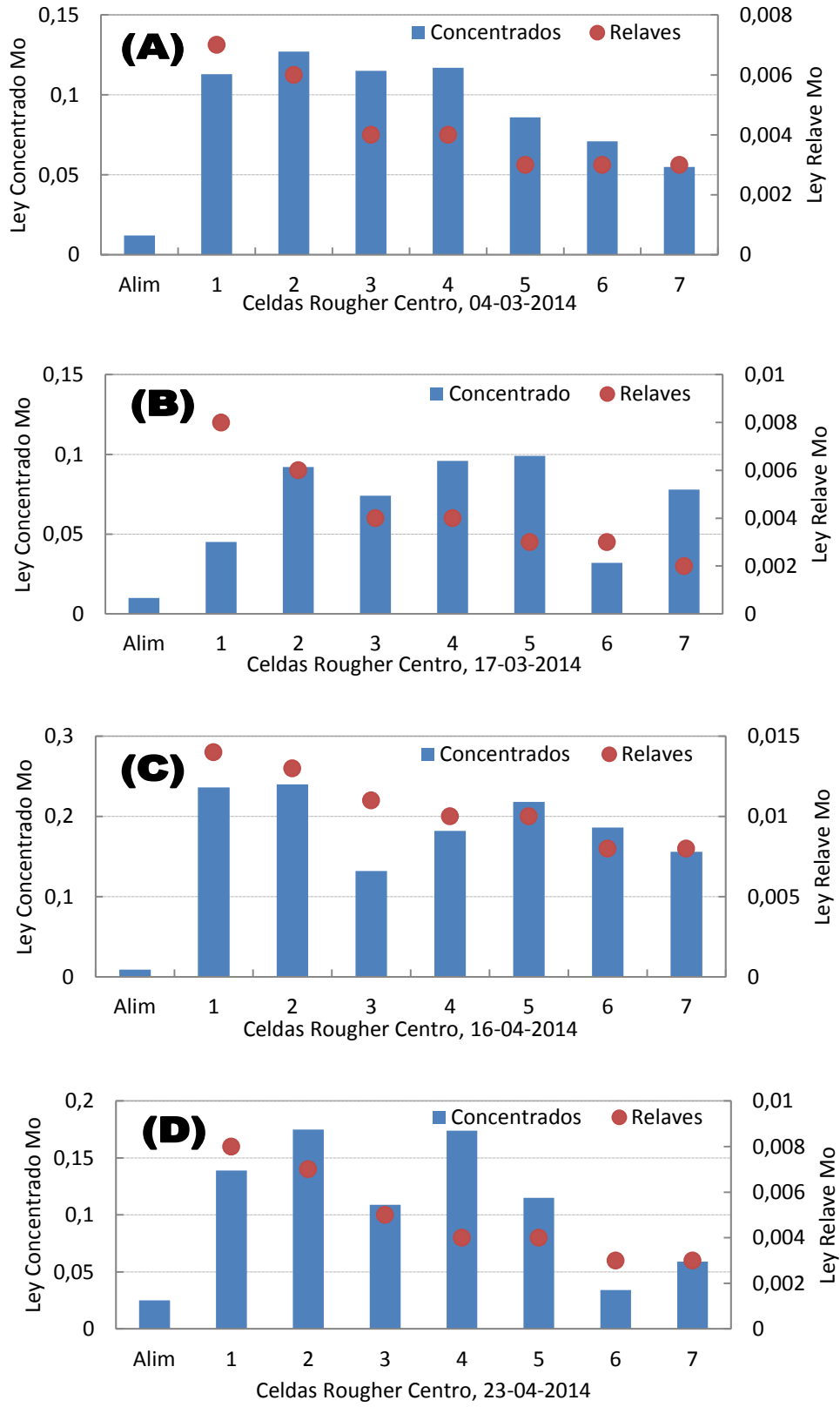


Figura 5.35: A, B, C y D Perfiles de leyes Mo de Flotación Rougher.

En base a la Fig. 5.25 se observa los perfiles de Mo siendo consecuente en los cuatro casos, que la mayor ley de concentrado se alcanza en la segunda celda, tomando como valores promedio, un 0.025 puntos porcentuales superior a la celda anterior, posteriormente a esto en la celda número tres las leyes decaen en un 0.051 puntos porcentuales, para volver a incrementar su valor en la cuarta celda en 0.034 puntos porcentuales. A continuación de este comportamiento las leyes comienzan a disminuir hasta su agotamiento.

Para los perfiles de Cu, se observa que en la primera celda es donde se alcanza la mayor ley de concentrado superior en 18.17 unidades de la ley de alimentación, consecuente con que la adición de reactivos ocurre en el cajón de acondicionamiento anterior. Posterior a esto, tanto leyes de concentrado como de relave disminuyen a través del paso de las etapas hasta alcanzar la recuperación acumulada calculada en el presente capítulo.

A partir de esto, se confirma que las cinéticas para los metales de interés tienen comportamientos distintos, en primer lugar el Mo necesitaría un mayor tiempo de acondicionamiento en una primera etapa y luego, se debería estudiar la adición de reactivo por avance posterior a la segunda celda para obtener mejores leyes de concentrado en la celda número cuatro, finalmente una mayor velocidad de flotación en esta celda y en la segunda, beneficiaría la recuperación de Mo en el circuito.

5.3.2 Mejoras según Flujo de Agua de Lavado en Columna

Según el análisis de sensibilidad, el flujo del agua de lavado es la segunda variable de mayor influencia en el modelo. Por lo tanto, se decidió manipular esta variable en la columna 3 de la planta colectiva, con el objetivo de estudiar su efecto sobre el contenido de Cobre y Molibdeno en el concentrado mixto.

Las muestras fueron tomadas durante el Turno B, a condiciones de operación constantes, para las variables: Flujo de alimentación columna, Flujo de Aire, Nivel de Espuma y pH, los rangos de operación se muestran en la Tabla 5.55.

Tabla 5.55: Rangos de operación Columna, muestreos flujos de agua de lavado.

Rango	Flujo Alimentación Columna (m ³ /h)	Flujo de Aire (m ³ /h)	Nivel Espuma (%)	pH
Mínimo	344	93	25	10.38
Máximo	595	208	70	11.41

A continuación en las Fig. 5.36-5.37 se presenta a modo de ejemplo los resultados obtenidos para los muestreos de los días 17 y 19 de febrero del presente año (el resto de las gráficas se encuentran en el Anexo C.3).

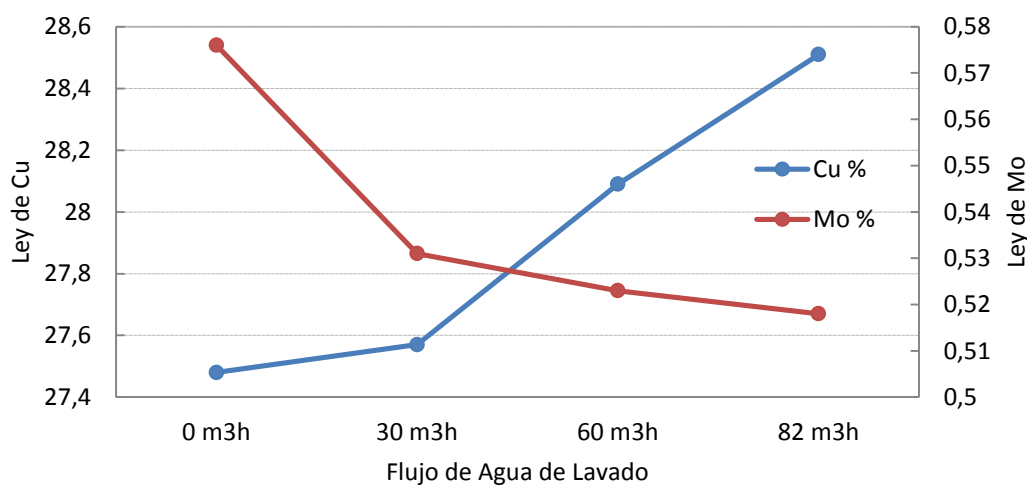


Figura 5.36: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Agua de Lavado. 19-02-2014 TB.

En la Fig. 5.36 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 19 de febrero de 2014, durante el turno B. Para este día, la ley de concentrado mixto tuvo una ley para el Cu de 28.79% y de 0.555% para el Mo, es decir la ley de Cu fue mayor en las tres columnas restantes.

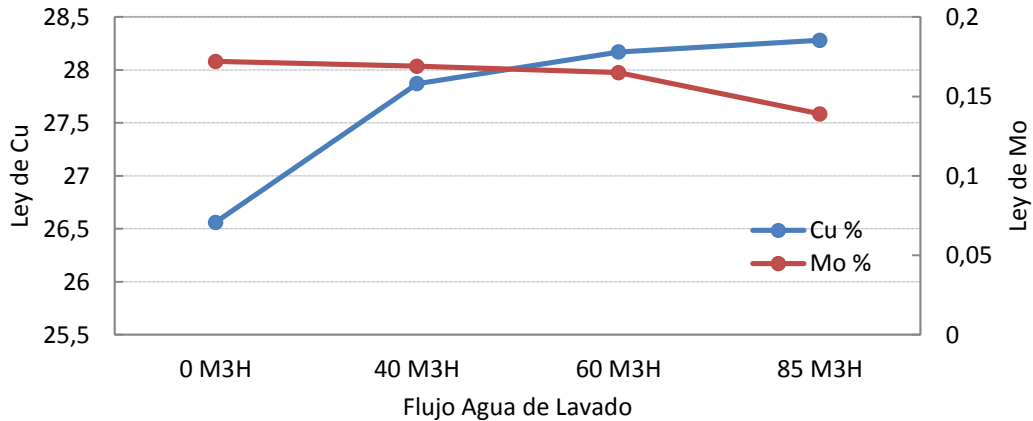


Figura 5.37: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Agua de Lavado. 17-02-2014 TB.

En la Fig. 5.37 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 17 de febrero de 2014, durante el turno B. Para este día, la ley de concentrado mixto tuvo una ley para el Cu de 28.80% y de 0.155% para el Mo, siendo mayor la ley de Cu en el resto de las columnas.

Del total de los muestreos realizados se puede interpretar que el comportamiento de las curvas de Cu y Mo es inversamente proporcional, es decir, a medida que aumenta el flujo de agua de lavado también lo hace la ley de Cu mientras que la de Mo disminuye.

El efecto de la calidad del agua en la flotabilidad de molibdenita esta actualmente reconocido. El constante crecimiento del consumo de agua y el mayor uso de aguas recirculadas, constituyen importantes problemas, como lo son el efecto dañino de las impurezas del agua, Hidróxidos coloidales precipitados, especialmente de Al y Fe, que tienen una fuerte acción depresante sobre la MoS_2 , debido principalmente al llamado fenómeno “recubrimiento por lamas”.

Por lo tanto trabajar con agua de mejor calidad, es decir, agua fresca como agua de lavado o en un comienzo trabajar a flujos de agua de lavado menores, colaboraría con el enriquecimiento de Mo en la flotación columnar, que sin descuidar los valores comerciales del concentrado de Cu, compensaría económicamente estos cambios.

A continuación en las Tablas 5.56 a la 5.58 se presenta un ejercicio del beneficio económico que significaría trabajar a menores flujos de agua de lavado:

Tabla 5.56: Diferencia de enriquecimiento para el Agua, a Bajas leyes de Alim. Mo

Bajas Leyes Alim. Mo 0.033 - 0.073%					
H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
70	30.54	0.046	60	31.37	0.352
111	30.55	0.046	90	32.84	0.328
Enriquecimiento	0.01	0	Enriquecimiento	1.47	-0.024

Tabla 5.57: Diferencia de enriquecimiento para el Agua, a leyes Medias de Alim Mo

Leyes Medias Alim. Mo 0.085 – 0.133%					
H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
60	28.17	0.165	60	28.09	0.523
85	28.28	0.139	82	28.51	0.518
Enriquecimiento	0.11	-0.026	Enriquecimiento	0.42	-0.005

Tabla 5.58: Diferencia de enriquecimiento para el Agua, a leyes Altas de Alim Mo

Leyes Altas Alim. Mo 0.174 – 0.305%					
H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
60	30.24	0.152	60	32.73	0.558
76	30.62	0.147	78	33.01	0.55
Enriquecimiento	0.38	-0.005	Enriquecimiento	0.28	-0.008

Como se observa en las tres tablas anteriores, se tomaron como casos a analizar los dos flujos de agua de lavado más altos de cada muestreo, debido a que si bien el Mo se ve mayormente enriquecido cuando no existe agua de lavado, esto no es posible llevarlo a cabo en la práctica, ya que es necesario mantener un flujo constante para el control de los insolubles.

Trabajando a 60 m³/h de flujo, el enriquecimiento para el Mo varía entre los valores de 0.026 y 0.005 (máximo y mínimo respectivamente), correspondiendo el primero a “diferencia 1” y “diferencia 2” el segundo en la Tabla 5.59. Por lo tanto estos serán los dos casos a analizar, obteniendo las utilidades mostradas en la Tabla 5.59.

Tabla 5.59: Utilidad para enriquecimiento de 0.026 y 0.005 de Mo.

Variables	Ley Inicial	Ley + Diferencia 1	Ley Inicial	Ley + Diferencia 2
	0.328	0.353	0.152	0.158
Fino Alimentado (kg)	2624	2824	1216	1264
Recuperación Selectiva (%)	69.88	71.48	50.41	51.44
Fino Producido (kg)	1834	2019	613	650
Utilidad \$USD	35091	39641	5075	5990

Caso 1 USD\$4549.94

Caso 2 USD\$914.73

De los resultados de la tabla anterior, se infiere que para el caso 1 correspondiente al enriquecimiento de 0.026 en la ley de Mo en el concentrado mixto, se genera una utilidad extra en la planta selectiva de USD\$4559 por turno, mientras que para el caso 2, correspondiente a leyes altas, el enriquecimiento de 0.005 produce una utilidad de USD\$914.

Como la utilidad generada por leyes altas es baja y la oportunidad de mejora es mayor por los altos grados de Mo, se decide disminuir los rangos de operación de los flujos de agua de lavado a 30 m³/h. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 5.60: Diferencia de enriquecimiento a leyes Altas de Alim. Mo Rango II

Leyes Altas Alim. Mo Rango II 0.174 – 0.305%					
H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	H ₂ O (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
30	29.18	0.172	30	32.16	0.588
60	30.24	0.152	60	32.73	0.558
Enriquecimiento	1.06	-0.02	Enriquecimiento	0.57	-0.03

Tabla 5.61: Utilidad para enriquecimiento de 0.025 para leyes altas de Mo.

Variables	Ley Inicial	Ley + Delta 3	Ley Inicial	Ley + Delta 4
	0.152	0.177	0.558	0.583
Fino Alimentado (kg)	1216	1416	4464	4664
Recuperación Selectiva (%)	50.41	54.45	78.32	78.57
Fino Producido (kg)	613	771	3496	3665
Utilidad \$USD	5075	8962	75977	80124

Caso 3 USD\$3887.51

Caso 4 USD\$4147.44

De la Tabla 5.61, se observa que la utilidad aumenta al trabajar con una media de 0.025 de enriquecimiento de Mo en el concentrado mixto, cuando a leyes altas se trabaja a 30 m³/h de flujo, además se puede ver en la Tabla 5.60 que a este flujo la ley de Cu sigue siendo de un grado comercial, por lo que no se ve afectada su calidad en el concentrado. (Cálculo en Anexo 3.3.3)

5.3.3 Mejoras según Flujo Aire en Columna

Siguiendo con el orden del análisis de sensibilidad, el flujo de aire en la columna es la tercera variable a manipular en planta, para encontrar las condiciones adecuadas de procesamiento. En la Tabla 5.62 se presentan los rangos de operación para los muestreos.

Tabla 5.62: Rangos de operación Columna, muestreos flujo de Aire.

Rango	Flujo Alimentación Columna (m ³ h)	Flujo Agua de lavado (m ³ h)	Nivel Espuma (%)	pH
Mínimo	357	43	25	10.59
Máximo	572	105	41	11.01

A continuación se presentan los resultados obtenidos de acuerdo a los muestreos realizados:

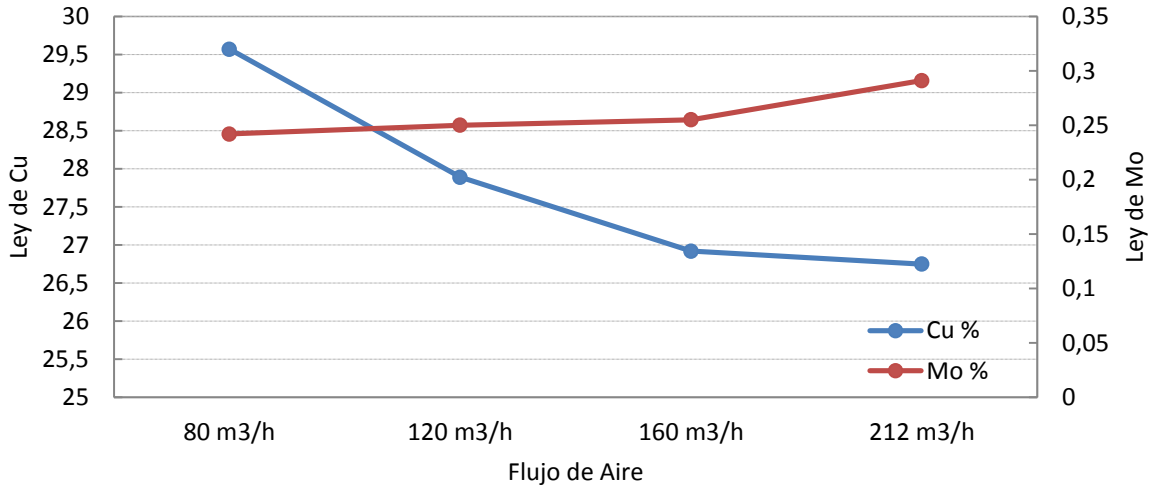


Figura 5.38: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Aire 06-03-2014 TB.

En la Fig. 5.38 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 06 de marzo de 2014, durante el turno B. Para este día, la ley de concentrado mixto tuvo una ley para el Cu de 28.45% y de 0.083% para el Mo, siendo para este último, más baja la ley obtenida durante el día que la registrada en el turno.

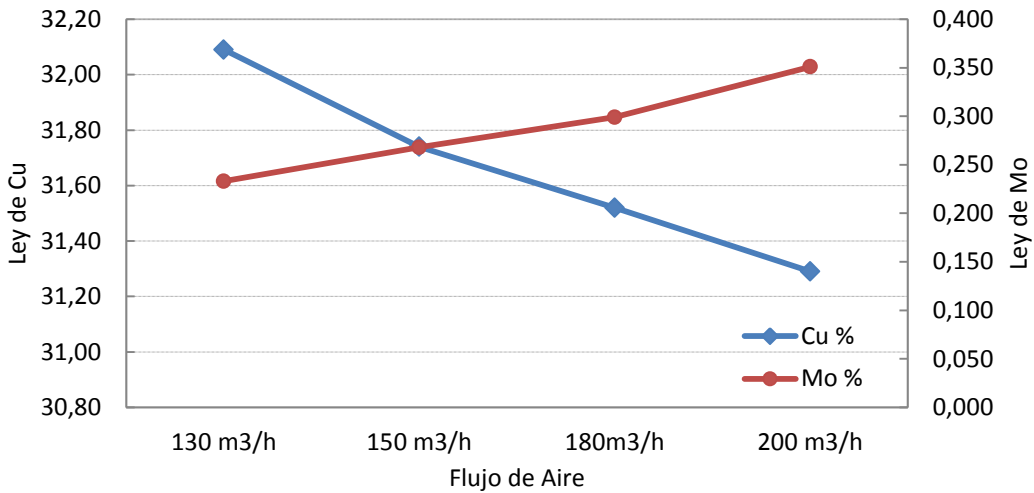


Figura 5.39: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Flujos de Aire 20-03-2014 TB.

En la Fig. 5.39 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 20 de marzo de 2014, durante el turno B. Para este día la media de las cuatro columnas fue de una ley de concentrado mixto de 31.9% para el Cu y de 0.254% para el Mo.

Del total de muestreos (presentados en el Anexo C.4) se puede observar que el comportamiento de las curvas de Cu y Mo es inversamente proporcional, a medida que aumenta el flujo de aire también lo hace la ley de Mo, no así la de Cu.

Según el concepto de “contra – corriente” en las celdas columnares, las partículas más ricas tienen más probabilidades de adherirse a burbujas semi-cargadas cerca de la interfase, mientras que las partículas más pobres se enfrentan a burbujas libres cerca del punto de inyección de aire.

Los factores físicos que afectan la dispersión del gas en la celda de flotación son, principalmente, la velocidad del impeler, el tipo de impeler y el flujo del gas. Es así como a un flujo bajo de aire se obtiene una distribución de diámetros de burbuja más pequeño, mientras que a un flujo alto se obtiene una distribución mayor de diámetros de burbuja.

En consecuencia, a un menor flujo de aire, más pequeñas son las burbujas (Fig. 3.7), por lo que más lento suben y esto aumenta su tiempo de residencia en la pulpa condición que se condice con una mejor ley de concentrado mixto de Cu. Esto de la mano con que al ser más pequeñas las burbujas y al estar mineralizadas con Cu, más baja es la probabilidad de colisión con una partícula de Mo, disminuyendo su ley en el concentrado mixto.

Es aquí donde al aumentar el flujo de inyección de aire, las partículas más pobres correspondientes a las de Mo, tendrían mayor probabilidad de ser colectadas, aumentando su ley en el concentrado, mientras que el Cu disminuiría su grado, asociado a un menor tiempo de residencia, pero sin perder su valor comercial.

A continuación en las Tablas 5.63 a la 5.65 se presenta la evaluación de los enriquecimientos a distintos grados de leyes alimentadas al circuito de limpieza colectivo.

Tabla 5.63: Diferencia de enriquecimiento para el Aire, a Bajas leyes de Alim. Mo

Leyes Bajas de Alim. Mo 0.078 – 0.078%					
Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
160	28.97	0.088	140	28.93	0.089
190	28.82	0.089	160	28.85	0.09
Enriquecimiento	-0.15	0.001	Enriquecimiento	-0.08	0.001

Tabla 5.64: Diferencia de enriquecimiento para el Aire, a leyes Medias de Alim. Mo

Leyes Medias de Alim. Mo 0.081 – 0.083%											
Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
130	27.68	0.21	160	26.92	0.255	170	30.8	0.273	170	31.42	0.237
160	27.41	0.24	212	26.75	0.291	200	29.79	0.293	200	29.5	0.254
Enr.	-0.27	0.03	Enr.	-0.17	0.036	Enr.	-1.01	0.02	Enr.	-1.92	0.017

Tabla 5.65: Diferencia de enriquecimiento para el Aire, a leyes Altas de Alim. Mo

Leyes Altas de Alim. Mo 0.103 - 0.103%					
Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)	Aire (m ³ h)	Cu (%)	Mo (%)
180	31.52	0.299	170	31.9	0.280
200	31.29	0.351	200	31.7	0.33
Enriquecimiento	-0.23	0.052	Enriquecimiento	-0.2	0.05

Trabajando con Altos Flujos de Aire se obtienen los siguientes enriquecimientos:

- ❖ Enriquecimiento Medio a Leyes Bajas de Mo: 0.001
- ❖ Enriquecimiento Medio a Leyes Medias de Mo: 0.022
- ❖ Enriquecimiento Medio a Leyes Altas de Mo: 0.051

A continuación en la Tabla 5.66 se calcula la utilidad generada en planta selectiva para cada ley final de Mo en el concentrado mixto correspondiente a casos de baja, media y alta ley en comparación a la utilidad generada al aumentar el flujo de aire y generar el respectivo incremento en el enriquecimiento.

Tabla 5.66: Utilidad para enriquecimiento de 0.001, 0.022 y 0.051 de Mo.

Variables	Ley Inicial	Ley + Dif. 1	Ley Inicial	Ley + Dif. 2	Ley Inicial	Ley + Dif. 3
	0.089	0.09	0.21	0.232	0.299	0.35
Fino Alimentado (kg)	712	720	1680	1856	2392	2800
Recuperación Selectiva (%)	36.76	37.03	58.95	61.51	67.75	71.3
Fino Producido (kg)	262	267	990	1142	1621	1996
Utilidad \$USD	-3563	-3444	14354	18076	29854	39094
Caso 1	USD\$119.39					
Caso 2	USD\$3.722.37					
Caso 3	USD\$9.239.42					

Se observa que para bajas leyes se obtiene utilidades negativas, esto debido a problemas operacionales ya que el día del muestreo no se alcanzó a concentrar en planta colectiva la ley mínima necesaria de alimentación a planta selectiva que nos entrega la utilidad cero. Para los dos casos restantes se observa que las utilidades asociadas al enriquecimiento, trabajando a flujos de aire cerca de los 190 m³/h, van entre los USD\$3722 y los USD\$9239, siendo este último valor cercano al costo de procesamiento de la planta selectiva.

5.3.4 Importancia del pH en Columnas

Como se estudió anteriormente, el pH juega un rol importante en la adsorción química/electroquímica de los colectores en los sulfuros, por lo que es necesario trabajar a pH alcalino en medio acuoso para que ocurran los mecanismos mencionados.

Ahora bien, las variables operacionales pueden ser modificadas dentro de ciertos rangos. Según si son variables sobre las que se actúa para modificar el proceso o si son variables de salida que se miden para conocer el estado del proceso o sus

productos, estas se clasifican en variables manipuladas o controladas. El pH cumple el rol de ser una variable controlada.

La pirita (FeS_2) se encuentra típicamente acompañando minerales sulfurados de cobre y constituye una de las principales impurezas. La presencia de sulfuros de hierro convierte a la mena en ácida (disminuye el pH a valores bajo 9) con la producción de sulfatos e hidróxidos de hierro, plomo y cinc, los cuales afectan la superficie de los minerales. Por otro lado las sales disueltas tales como sulfato ferroso generan un consumo mayor de reactivos (xantatos y ditiofosfatos)

Es por esto que para la depresión de pirita se utiliza pH alcalino, entre 9 y 12, lo que es regulado con cal por razones económicas, previniendo la oxidación del xantato a dixantógeno. A estos pH la superficie de la pirita estará cubierta de hidróxido férrico, precipitado producto de la oxidación del disulfuro de hierro (FeS_2). El hidróxido férrico colabora en la depresión de la ganga acelerando la velocidad de oxidación de la pirita por una alta relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, debido a que el ion férrico puede unirse directamente a la superficie de la pirita realizándose más fácilmente la transferencia de electrones.

De acuerdo a todo esto, el pH en las columnas de la planta colectiva, no cumple un rol modificador en el proceso con respecto al grado comercial de los polimetálicos de interés o su recuperación, sino más bien cumple una función basada en el control de la calidad del concentrado, centrada en las impurezas. Es por esto, pese a que según el análisis de sensibilidad el pH es una variable determinante en el grado de Mo en el concentrado mixto, no se realizaron muestreos a distintos valores de pH midiendo los resultados de Cu y Mo en el concentrado. Pese a esto, con la data operacional que se tiene, se buscó turnos contiguos, para disminuir la perturbación por diferencia de mineralogía alimentada, donde se incrementaba o disminuía el pH, viendo el comportamiento en las leyes de Mo y Cu en el concentrado mixto.

Los resultados se muestran a continuación en las Fig. 5.40-5.41. El resto de los datos obtenidos se encuentran en el Anexo C.5.

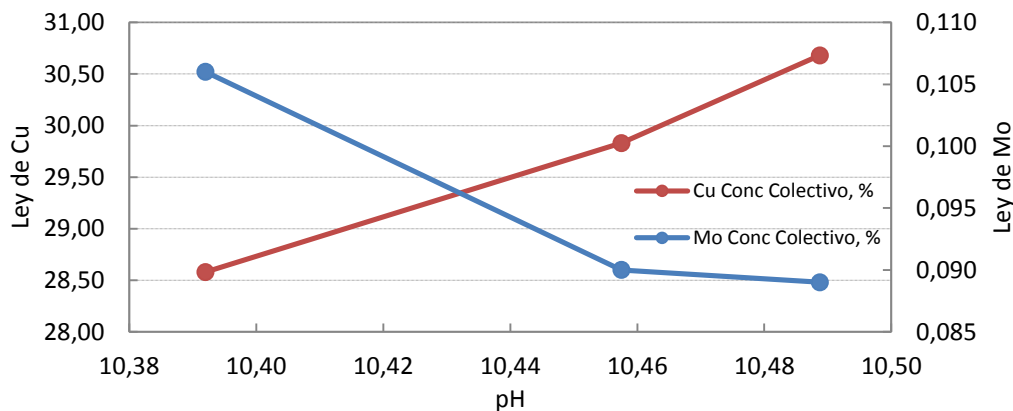


Figura 5.40: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos valores de pH. 06/01/2013 TB-TC-TA

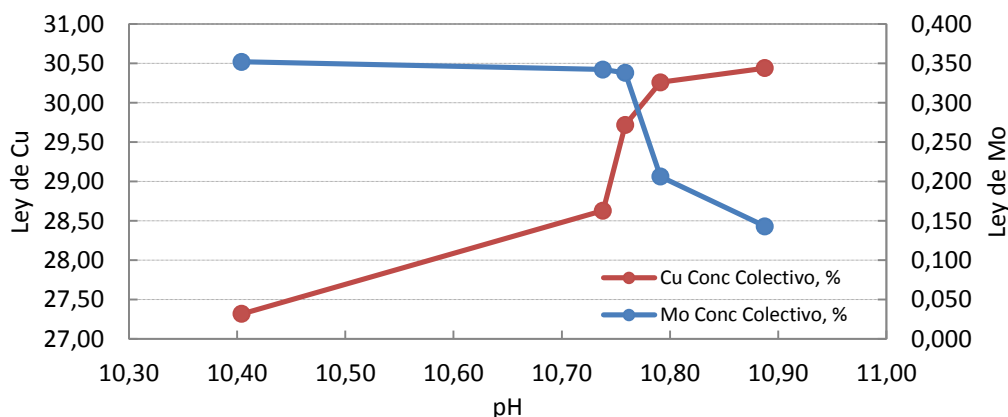


Figura 5.41: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos valores de pH. 29/01/2013 TA-TB-TC-TA-TB

A través de los resultados presentados se puede observar que a medida que aumenta el pH, también lo hace la ley de cobre, mientras que la de Mo disminuye. Este fenómeno se debe a que a bajos pH las impurezas como la pirita no son depresadas, siendo recolectadas por flotación de arrastre a la zona espuma/concentrado, esto produce una reducción en la ley de concentrado de Cu, siendo el efecto contrario, un enriquecimiento en el grado de Cu. Por el lado del Mo, se han realizado estudios (Fig. 3.9), donde se comprueba que la cal es un fuerte depresante de Mo, por lo que a medida que se trabaja a altas concentraciones de calcio, el Mo es arrastrado en la cola de la columna junto con las impurezas.

Se recomienda trabajar a un pH controlado de valor 10.8, preocupándose de reducir las perturbaciones para no perjudicar la ley de alimentación de Mo que ingrese a la planta selectiva.

5.3.5 Mejoras según Nivel de Espuma en Columnas

Según el análisis de sensibilidad, la altura de espuma en las columnas es la última variable influenciada en el modelo. Por lo tanto, se decidió manipular esta variable en la columna 4 de la planta colectiva, con el objetivo de estudiar su efecto sobre el contenido de Cobre y Molibdeno en el concentrado mixto. A continuación en la Tabla 5.67 se muestran los rangos de operación de los muestreos realizados.

Tabla 5.67: Rangos de operación Columna, muestreos nivel de espuma.

Rango	Flujo Alimentación Columna (m ³ h)	Agua de Lavado (m ³ h)	Flujo de Aire (m ³ h)	pH
Mínimo	344	54	93	10.4
Máximo	595	100	208	11.4

En las Fig. 5.42-5.43 se presenta los resultados de los muestreos realizados los días 11 y 19 de febrero del presente año, mientras que el resto de los resultados obtenidos se presentan en el Anexo C.6.

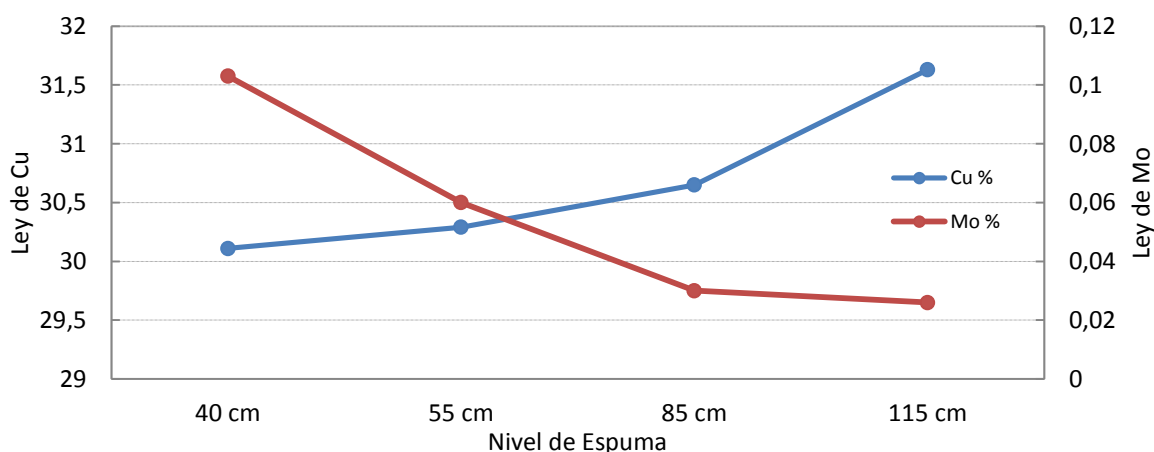


Figura 5.42: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Niveles de Espuma.

11-02-2014 TB.

En la Fig. 5.42 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 11 de febrero de 2014, durante el turno B. Para este día, la ley de concentrado mixto tuvo una ley para el Cu de 28.57% y de 0.036% para el Mo, como promedio de las cuatro columnas.

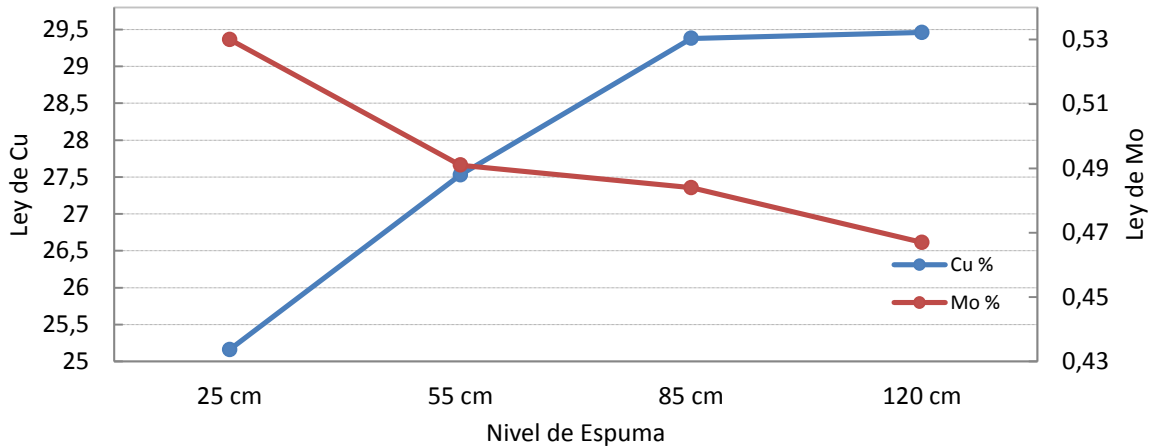


Figura 5.43: Ley de Concentrado de Cu y Mo a distintos Niveles de Espuma.
19-02-2014 TB.

En la Fig. 5.43 se puede observar los resultados obtenidos en el muestreo realizado el día 19 de febrero de 2014, durante el turno B. Para este día, la ley de concentrado mixto tuvo una ley para el Cu de 28.79% y de 0.555% para el Mo, como promedio de las cuatro columnas.

Del total de muestreos realizados se interpreta que el comportamiento de las curvas de Cu y Mo es inversamente proporcional, a medida que aumenta la altura del colchón de espuma también lo hace la ley de Cu, disminuyendo la de Mo.

Los resultados permiten determinar un punto óptimo de localización de la interface, la zona de colección donde se obtenga una recuperación optima de Cu y Mo.

Al trabajar con un alto colchón de espuma se enriquece la burbuja mayormente con cobre, esto debido a que aumenta el tiempo de residencia, teniendo un efecto negativo sobre la colección de las partículas de Mo, ya que disminuye la probabilidad de colisión entre éstas y las burbujas.

Por lo tanto, trabajar con un bajo nivel de espuma permitiría mineralizar la burbuja con un mayor contenido de molibdeno. Una disminución en la profundidad de la espuma aumentaría la flotación por arrastre, es decir, partículas no adheridas a burbujas son arrastradas a la fase espuma/concentrado, los resultados indican que si bien hay una disminución del grado de cobre en el concentrado mixto debido al arrastre de ganga en el concentrado, la ley de Cu en el concentrado continua siendo de grado comercial y se compensaría económicamente con el aumento de la ley de molibdeno.

A continuación se revisa la compensación económica en las Tablas 5.68 a la 5.70.

Tabla 5.68: Diferencia de enriquecimiento para espuma, a leyes Bajas de Alim. Mo

Leyes Bajas de Alim. Mo 0.005 - 0.008%					
Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)	Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)
35	27.08	0.194	40	30.11	0.103
70	29.05	0.162	55	30.29	0.06
Enriquecimiento	1.97	-0.032	Enriquecimiento	0.18	-0.043

Tabla 5.69: Diferencia de enriquecimiento para espuma, a leyes Medias de Alim. Mo

Leyes Medias de Alim. Mo 0.13 - 0.15%					
Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)	Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)
25	25.16	0.53	45	29.85	0.442
55	27.53	0.491	70	30.59	0.402
Enriquecimiento	2.37	-0.039	Enriquecimiento	0.74	-0.04

Tabla 5.70: Diferencia de enriquecimiento para espuma, a leyes Altas de Alim. Mo

Leyes Altas de Alim. Mo 0.17 - 0.31%					
Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)	Espuma (cm)	Cu (%)	Mo (%)
35	28.98	0.265	45	32.47	0.621
70	29.15	0.203	70	32.71	0.61
Enriquecimiento	0.17	-0.062	Enriquecimiento	0.24	-0.011

De las Tablas 5.68 a la 5.70, se puede observar el enriquecimiento en la ley de concentrado mixto de Mo que se deja de obtener al trabajar con colchones de espuma sobre los 55 cm. Se decidió de la totalidad de los muestreos realizados analizar los beneficios obtenidos al trabajar con colchones bajo los 70 cm, ya que sobre este valor, el enriquecimiento para el Mo fue muy bajo mientras que la ley de Cu muy por encima de su grado comercial lo que no significa un precio de comercialización superior. Finalmente para leyes de alimentación bajas, medias y altas al circuito de limpieza colectivo en Mo, se obtiene un enriquecimiento promedio muy parecido para los tres casos, con una media del 0.038.

A continuación en la Tabla 5.71 se analizan dos casos para el mismo enriquecimiento de 0.038, tanto para una ley baja de concentrado, como para una alta (como promedio en ambos casos).

Tabla 5.71: Utilidad para enriquecimiento de 0.038 de Mo.

Variables	Ley Inicial	Ley + Dif. 1	Ley Inicial	Ley + Dif. 1
	0.111	0.149	0.406	0.444
Fino Alimentado (kg)	888	1192	3252	3552
Recuperación Selectiva (%)	42.20	49.88	74.27	75.76
Fino Producido (kg)	375	595	2415	2691
Utilidad \$USD	-782	4622	49400	56182
Caso 1 USD\$ 5404				
Caso 2 USD\$ 6782				

Los resultados obtenidos demuestran que para bajas leyes de concentrado mixto, trabajar a un colchón de espuma inferior, es decir, cercano a los 40 cm, genera utilidades asociadas al enriquecimiento de USD\$5404, mientras que para leyes medias el valor asciende a USD\$6782.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo al trabajo realizado se pudo visualizar que la ley de corte de la planta selectiva II corresponde a un valor de 0.0045% MoT de alimentación a planta colectiva, correlacionada a una ley de 0.12% MoT de alimentación a planta selectiva, esto entrega la producción de 0.404 ton de Mo fino por turno, que a un valor de 11.5 USD/lb de concentrado y a un castigo metalúrgico del 97.75% se financian los costos de producción equivalentes a USD\$10000 por turno.

Al estudiar los polinomios propios del modelo estadístico formulado, se concluye que la planta no produce concentrados de calidad comercial (superiores al 48% MoT), si no es alimentada con leyes superiores al 0.21% en planta selectiva (0.01% a planta colectiva) y cuando la ley supera el 1.00% de alimentación, se generan pérdidas producto de los límites de diseño. Al revisar los polinomios asociados a la recuperación global, se observa que para lograr los valores presupuestados para este 2014, correspondiente al 50%, se debe realizar énfasis en la recuperación de Mo en planta colectiva que no supera el 60% en el circuito rougher. Por último, en planta selectiva se infiere que aunque la media anual corresponde al 61%, se alcanzan valores superiores al 80% siempre y cuando se reciban leyes de alimentación acorde a lo discutido anteriormente, de la mano del cuidado en la excelencia operacional del proceso selectivo.

A través del modelo multivariable de Mo en el concentrado mixto, se obtiene por medio del análisis de sensibilidad, las variables predominantes en el grado de Mo alimentado a planta selectiva. Estas variables resultaron ser: Ley de Mo en concentrado rougher, agua de lavado, flujo de aire, pH y nivel de espuma en columnas del circuito de limpieza en planta colectiva.

Al manipular las variables mencionadas en terreno, se obtuvo que para el parámetro de mayor influencia, es decir, la ley de Mo en el concentrado rougher, se necesita trabajar a cinéticas distintas de las utilizadas para Cu, concluyendo que antes de la segunda máquina de flotación se necesita un mayor tiempo de acondicionamiento y una dosificación de diesel como colector de Mo, de una dosis superior a la utilizada en el presente correspondiente a 20 gr/ton. Además se debe

estudiar el efecto de la adición de diesel en avance a través de las siete celdas disponibles por línea, recomendando su adición entre las celdas dos y tres, asimismo se beneficiaría la recuperación del circuito al aumentar la velocidad de la flotación en las celdas dos y cuatro. Se recomienda realizar este mismo estudio en las celdas scavenger de la planta colectiva.

El segundo parámetro estudiado fue el flujo de agua de lavado en las columnas, obteniendo resultados que dan cuenta de un enriquecimiento en la ley de Mo en el concentrado mixto de 0.025 por sobre la ley original al disminuir los flujos de agua de lavado a 60 m³/h para leyes medias y de 30 m³/h para leyes altas de Mo de alimentación al circuito de limpieza colectivo, resultando en beneficios económicos adicionales de entre USD\$ 4018 y USD\$ 4559 por turno en planta selectiva.

Para el flujo de aire, los resultados de las pruebas realizadas dan cuenta que para valores entre 190 y 200 m³/h se alcanzan beneficios económicos por sobre los valores actuales de USD\$ 3722 y USD\$ 9239 por turno en planta selectiva, por concepto de un enriquecimiento de entre 0.022 y 0.051 en la ley de Mo correspondiente al concentrado mixto.

Para los niveles de espuma, se recomienda operar a valores de 40 ± 5 cm, siendo bajos colchones para altas leyes de Mo y colchones más profundos para leyes menores. A estas condiciones se produce un enriquecimiento en la ley original de Mo en 0.038, traduciéndose en un beneficio económico que oscila entre los USD\$ 5504 y USD\$ 6782 por turno en planta selectiva.

Finalmente se recomienda renegociar el contrato con Molytmet, para acceder a la venta de concentrados de menor ley, aumentando el castigo metalúrgico correspondiente al actual, ya que los costos por reproceso son superiores con un valor de 0.5 USD/lb al 0.11 USD/lb cobrado actualmente.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Ley de corte en el planeamiento de la producción”, Departamento de Geología de Minas. Universidad Nacional de Moquegua. 2012.
- [2] **Montgomery, D. Runger, G.** “Applied Statics and Probability for Engineers”. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 12: Multiple Linear Regression. 2003.
- [3] **Kracht, W.** “Flotación de Minerales”, Departamento Ingeniería en Minas, Universidad de Chile. 2012.
- [4] **Dondero, A.** “Flotación de minerales”. Escuela de Ingeniería Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2006.
- [5] **Castro, S.** “Flotation of Molybdenite”, In International Molybdenum Encyclopedia, Processing and Metallurgy, Edited by Alexander Sutulov, Santiago, Chile, Volume II, 1979.
- [6] **Gutierrez, L. Sepúlveda, J.** “Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática”, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica. ppt. 189-219.1986 .

ANEXO A

Desarrollo matemático de ecuaciones utilizadas

A.1 Fórmulas Marco Teórico

A.1.1 Desarrollo ecuación (2) Ley de Corte

$$\begin{aligned}
 UM (ton) \cdot LC(\%) \cdot \frac{Rec(\%)}{100} \cdot P_{Me} \left(\frac{US\$}{lb} \right) \cdot \frac{2204,6(lb)}{1 (ton)} \\
 = UM (ton) \cdot CM \left(\frac{US\$}{ton} \right) + UM \cdot CP \left(\frac{US\$}{ton} \right) + UM \cdot LC(\%) \cdot \frac{Rec(\%)}{100} \\
 \cdot C_{FR} \left(\frac{US\$}{lb} \right) \cdot \frac{2204,6(lb)}{1 (ton)}
 \end{aligned}$$

$$\frac{LC(\%)}{100} \cdot \frac{Rec(\%)}{100} \cdot \frac{2204,6 (lb)}{1 (ton)} (P_{Me} - C_{FR}) = CM \left(\frac{US\$}{ton} \right) + CP \left(\frac{US\$}{ton} \right)$$

$$LC = \frac{CM \left(\frac{US\$}{ton} \right) + CP \left(\frac{US\$}{ton} \right)}{\frac{2204,6(lb)}{1(ton)} \cdot \frac{Rec(\%)}{100} \cdot (P_{Me} - C_{FR})} \cdot 100$$

A.1.2 Desarrollo ecuación (3) Holdup

$$P_2 = P_1 + \rho_{dispersion} \cdot L$$

$$\rho_{dispersion} = \rho_{pulp}(1 - \varepsilon_g) + \rho_{aire} \cdot \varepsilon_g$$

$$P_2 = P_1 + \rho_{pulpa} \cdot L \cdot (1 - \varepsilon_g)$$

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{(P_2 - P_1)}{\rho_{pulpa} \cdot L}$$

A.2 Fórmulas Resultados y Discusión

A.2.1 Desarrollo fórmula Fig 5.5, Ingresos.

$$Ingreso (US\$) = \frac{Finos Mo (ton)}{mes} \cdot \frac{2204.6 (lb)}{1 (ton)} \cdot \frac{11.5 (US\$)}{(lb)} \cdot 0.9775$$

$$Finos Mo (ton) = \frac{Ingreso (US\$)}{(turno)} \cdot \frac{1 (ton)}{2204.6 (lb)} \cdot \frac{(lb)}{11.5 (US\$)} \cdot \frac{1}{0.9775}$$

A.2.2 Desarrollo ecuación (8) Recuperación circuito limpieza planta selectiva

$$F_1 = R_{2L}$$

$$F_2 = R_{2L} \cdot R_{3L}$$

$$F_3 = R_{2L} - (R_{2L} \cdot R_{3L})$$

$$F_4 = 1 - (R_{2L} - (R_{2L} \cdot R_{3L}))$$

$$F_5 = 1 - R_{2L}$$

$$Rec = \frac{F_2}{F_4}$$

$$Rec = \frac{R_{2L} \cdot R_{3L}}{1 - [R_{2L} \cdot (1 - R_{3L})]}$$

A.3 Información Adicional

A.3.1 Ingresos Planta Selectiva

Fecha	Ingreso en US
jul-12	22461
ago-12	208154
sep-12	439466
oct-12	1391551
nov-12	1335864
dic-12	2559281
ene-13	3111888
feb-13	2716002
mar-13	2425102
abr-13	3387789
may-13	2672652
jun-13	4671331
jul-13	6042216
ago-13	5950551
sep-13	5287364
oct-13	3869571
nov-13	5631424
dic-13	6154491
Año 2012	5956777
Año 2013	51920381

A.3.2 Utilidades Planta Selectiva

Fecha	Utilidad en USD
jul-12	-394753
ago-12	-429131
sep-12	-677127
oct-12	677476
nov-12	587702
dic-12	2053934
ene-13	2412813
feb-13	2173716
mar-13	1572136
abr-13	2466219
may-13	2053562
jun-13	4102658
jul-13	5333149
ago-13	5169602
sep-13	4487063
oct-13	3116449
nov-13	4934699
dic-13	5257849
Año 2012	1817752
Año 2013	40667102

A.3.3 Cálculo de utilidades planta selectiva

Tratamiento = Ingresado por usuario o plataforma PI.

Ley de Alimentación MoT = Ingresado por usuario.

Fino Alimentado = Tratamiento · Ley de Alimentación MoT.

Recuperación Colectiva = $y = 717459500896x^6 - 85919605321.682x^5 + 3690367039.727x^4 - 65200289.832x^3 + 288519.061x^2 + 3424.079x + 32.542$

Con x = Ley de Alimentación MoT.

Fino Recuperado Colectiva = Recuperación Colectiva · Fino Alimentado.

Tratamiento Planta Moly = Ingresado por usuario o plataforma PI.

$$\text{Ley Alimentación Pta Moly} = y = 115516x^4 - 14611x^3 + 313.61x^2 + 21.036x + 0.0171$$

Con x = Ley de Alimentación Pta Moly.

$$\text{Fino Alimentado} = \text{Tratamiento Planta Moly} \cdot \text{Ley de Alimentación Pta Moly}$$

$$\text{Recuperación Selectiva} = y = -1767.3x^6 + 5570.2x^5 - 7004.4x^4 + 4656.8x^3 - 1887.8x^2 + 510.17x + 3.4353$$

Con x = Ley de Alimentación Pta Moly

$$\text{Fino Producido} = \text{Recuperación Selectiva} \cdot \text{Fino Alimentado}$$

$$\text{Ley de Concentrado} = y = -1348.9x^6 + 4908.7x^5 - 7042.3x^4 + 5017.5x^3 - 1836.1x^2 + 325.58x + 21.922$$

Con x = Ley de Alimentación Pta Moly.

$$\text{Recuperación Global} = y = 414908x^3 - 74712x^2 + 3073.2x + 10.178$$

Con x = Ley de Alimentación MoT

$$\text{Utilidad} = (\text{Fino Producido} \cdot 11.5 \cdot 0.97 \cdot 2.2046) - 10000$$

ANEXO B

Resultados regresión multivariable

B.1 Regresiones Primer Trimestre

Tabla B.1: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 1er Trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coficiente de correlación múltiple	0.9866
Coficiente de determinación R ²	0.9735
R ² ajustado	0.9733
Error típico	0.1062
Observaciones	2062

Tabla B.2: Anova, Primera prueba, 1er trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	847.51	60.54	5364.12	0
Residuos	2047	23.10	0.01		
Total	2061	870.62			

Tabla B.3: Regresión, Primera prueba, 1er trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.1750	0.0619	2.8259	0.0048	0.0536	0.2965	0.0153	0.3347
Mo Con Rou	1.1960	0.0044	272.6858	0.0000	1.1874	1.2046	1.1847	1.2073
pH Col Cu	-0.0082	0.0045	-1.8254	0.0681	-0.0170	0.0006	-0.0197	0.0034
Agua Lav 2	-0.0004	0.0002	-2.4458	0.0145	-0.0008	-0.0001	-0.0009	0.0000
Agua Lav 3	0.0000	0.0001	-0.0986	0.9215	-0.0002	0.0002	-0.0003	0.0003
Agua Lav 4	-0.0004	0.0001	-3.1252	0.0018	-0.0007	-0.0002	-0.0007	-0.0001
Agua Lav 5	0.0008	0.0001	6.5998	0.0000	0.0006	0.0011	0.0005	0.0011
Flujo Aire 2	0.0005	0.0001	3.1759	0.0015	0.0002	0.0007	0.0001	0.0008
Flujo Aire 3	-0.0004	0.0001	-3.5505	0.0004	-0.0007	-0.0002	-0.0007	-0.0001
Flujo Aire 4	-0.0005	0.0001	-5.0643	0.0000	-0.0006	-0.0003	-0.0007	-0.0002
Flujo Aire5	0.0006	0.0002	3.7143	0.0002	0.0003	0.0010	0.0002	0.0011
Nivel Col 2	0.0011	0.0003	3.0629	0.0022	0.0004	0.0017	0.0002	0.0019
Nivel Col 3	-0.0016	0.0003	-4.9180	0.0000	-0.0023	-0.0010	-0.0025	-0.0008
Nivel Col 4	-0.0007	0.0003	-2.3706	0.0179	-0.0013	-0.0001	-0.0015	0.0001
Nivel Col 5	0.0022	0.0004	6.0782	0.0000	0.0015	0.0029	0.0012	0.0031

Tabla B.4: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 1er trimestre

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9866
Coefficiente de determinación R ²	0.9734
R ² ajustado	0.9733
Error típico	0.1063
Observaciones	2062

Tabla B.5: Anova, Segunda prueba, 1er trimestre

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	12	847.48	70.62	6253.74	0
Residuos	2049	23.14	0.01		
Total	2061	870.62			

Tabla B.6: Regresión, Segunda prueba, 1er trimestre

Variables	Coef	Error típico	Est t	Prob	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99%	Superior 99%
Intercepto	0.0782	0.032	2.437	0.015	0.015	0.141	-0.005	0.161
Mo Conc Rou	1.1963	0.004	272.9	0.000	1.188	1.205	1.185	1.208
Agua Lav 2	-0.0005	0.000	-2.929	0.003	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Agua Lav 4	-0.0004	0.000	-3.447	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Agua Lav 5	0.0008	0.000	7.089	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Flujo Aire 2	0.0005	0.000	3.541	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Flujo Aire 3	-0.0004	0.000	-3.263	0.001	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Flujo Aire 4	-0.0005	0.000	-5.463	0.000	-0.001	0.000	-0.001	0.000
Flujo Aire 5	0.0006	0.000	3.717	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Nivel Col 2	0.0012	0.000	3.417	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002
Nivel Col 3	-0.0015	0.000	-4.681	0.000	-0.002	-0.001	-0.002	-0.001
Nivel Col 4	-0.0008	0.000	-2.725	0.006	-0.001	0.000	-0.002	0.000
Nivel Col 5	0.0021	0.000	5.968	0.000	0.001	0.003	0.001	0.003

B.2 Regresiones Segundo Trimestre

Tabla B.7: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 2do trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7960
Coefficiente de determinación R ²	0.6337
R ² ajustado	0.6313
Error típico	0.1453
Observaciones	2180

Tabla B.8: Anova, Primera prueba, 2do trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	79.0598	5.6471	267.4750	0
Residuos	2165	45.7091	0.0211		
Total	2179	124.7688			

Tabla B.9: Regresión, Primera prueba, 2do trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.2830	0.0852	3.322	0.0009	0.1159	0.4501	0.0634	0.5027
Mo Conc Rou	1.7315	0.0321	53.965	0.0000	1.6686	1.7944	1.6488	1.8142
pH Col Cu	-0.0151	0.0080	-1.888	0.0591	-0.0308	0.0006	-0.0357	0.0055
Agua Lav 2	-0.0021	0.0003	-6.355	0.0000	-0.0027	-0.0015	-0.0030	-0.0012
Agua Lav 3	0.0007	0.0003	2.045	0.0410	0.0000	0.0013	-0.0002	0.0015
Agua Lav 4	0.0009	0.0003	2.535	0.0113	0.0002	0.0016	0.0000	0.0018
Agua Lav 5	0.0000	0.0002	0.150	0.8811	-0.0004	0.0005	-0.0006	0.0006
Flujo Aire 2	0.0000	0.0003	-0.136	0.8918	-0.0005	0.0005	-0.0007	0.0006
Flujo Aire 3	0.0002	0.0003	0.950	0.3424	-0.0003	0.0007	-0.0004	0.0009
Flujo Aire 4	0.0002	0.0003	0.664	0.5065	-0.0003	0.0007	-0.0005	0.0008
Flujo Aire 5	-0.0003	0.0002	-1.295	0.1954	-0.0007	0.0001	-0.0008	0.0003
Nivel Col 2	-0.0010	0.0007	-1.378	0.1682	-0.0025	0.0004	-0.0029	0.0009
Nivel Col 3	0.0011	0.0008	1.465	0.1432	-0.0004	0.0027	-0.0009	0.0032
Nivel Col 4	0.0015	0.0007	2.086	0.0371	0.0001	0.0030	-0.0004	0.0035
Nivel Col 5	-0.0009	0.0005	-1.857	0.0634	-0.0019	0.0001	-0.0022	0.0004

Tabla B.10: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 2do trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7945
Coefficiente de determinación R ²	0.6312
R ² ajustado	0.6304
Error típico	0.1455
Observaciones	2180

Tabla B.11: Anova, Segunda prueba, 2do trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	78.7584	15.7517	744.2703	0
Residuos	2174	46.0104	0.0212		
Total	2179	124.7688			

Tabla B.12: Regresión, Segunda prueba, 2do trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.1654	0.0267	6.193	0.0000	0.1130	0.2178	0.0966	0.2343
Mo Conc Rou	1.7145	0.0305	56.254	0.0000	1.6547	1.7742	1.6359	1.7930
Agua Lavado 2	-0.0021	0.0003	-7.598	0.0000	-0.0027	-0.0016	-0.0028	-0.0014
Agua Lavado 3	0.0005	0.0003	1.559	0.1191	-0.0001	0.0010	-0.0003	0.0012
Agua Lavado 4	0.0010	0.0003	3.108	0.0019	0.0004	0.0016	0.0002	0.0018
Nivel Col 4	0.0005	0.0003	1.980	0.0479	0.0000	0.0011	-0.0002	0.0013

Tabla B.13: Estadísticas de la regresión, Tercera prueba, 2do trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7942
Coefficiente de determinación R ²	0.6308
R ² ajustado	0.6301
Error típico	0.1455
Observaciones	2180

Tabla B.14: Anova, Tercera prueba, 2do trimestre

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	4	78.7070	19.6767	929.1191	0
Residuos	2175	46.0618	0.0212		
Total	2179	124.7688			

Tabla B.15: Regresión, Tercera prueba, 2do trimestre

Variables	Coef	Error típico	Est t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99%	Superior 99%
Intercepto	0.1654	0.0267	6.193	0.0000	0.1130	0.2178	0.0966	0.2343
Mo Conc Rou	1.7145	0.0305	56.254	0.0000	1.6547	1.7742	1.6359	1.7930
Agua Lav 2	-0.0021	0.0003	-7.598	0.0000	-0.0027	-0.0016	-0.0028	-0.0014
Agua Lav 3	0.0005	0.0003	1.559	0.1191	-0.0001	0.0010	-0.0003	0.0012
Agua Lav 4	0.0010	0.0003	3.108	0.0019	0.0004	0.0016	0.0002	0.0018
Nivel Col 4	0.0005	0.0003	1.980	0.0479	0.0000	0.0011	-0.0002	0.0013

Tabla B.16: Estadísticas de la regresión, Cuarta prueba, 2do trimestre

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.7939
Coefficiente de determinación R ²	0.6303
R ² ajustado	0.6298
Error típico	0.1456
Observaciones	2180

Tabla B.17: Anova, Cuarta prueba, 2do trimestre

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	78.6377	26.2126	1236	0
Residuos	2176	46.1312	0.0212		
Total	2179	124.7688			

Tabla B.18: Regresión, Cuarta prueba, 2do trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.2143	0.0121	17.7186	0.0000	0.1906	0.2380	0.1831	0.2455
Mo Conc Rou	1.7297	0.0296	58.3683	0.0000	1.6716	1.7878	1.6533	1.8061
Agua Lav 2	-0.0020	0.0003	-8.0195	0.0000	-0.0025	-0.0015	-0.0027	-0.0014
Agua Lav 4	0.0011	0.0003	3.9719	0.0001	0.0006	0.0016	0.0004	0.0018

B.3 Regresiones Tercer Trimestre

Tabla B.19: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 3er trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.4388
Coeficiente de determinación R ²	0.1925
R ² ajustado	0.1873
Error típico	0.2362
Observaciones	2167

Tabla B.20: Anova, Primera prueba, 3er trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	28.6251	2.0446	37	0.0000
Residuos	2152	120.0402	0.0558		
Total	2166	148.6652			

Tabla B.21: Regresión, Primera prueba, 3er trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.4582	0.1825	2.5113	0.0121	0.1004	0.8160	-0.0122	0.9286
Mo Conc Rou	0.0481	0.0056	8.5314	0.0000	0.0371	0.0592	0.0336	0.0627
pH Col Cu	-0.0769	0.0151	-5.0872	0.0000	-0.1065	-0.0473	-0.1159	-0.0379
Agua Lav 2	-0.0002	0.0004	-0.4475	0.6546	-0.0009	0.0006	-0.0012	0.0008
Agua Lav 3	0.0003	0.0004	0.7930	0.4279	-0.0005	0.0012	-0.0008	0.0015
Agua Lav 4	0.0036	0.0004	8.9218	0.0000	0.0028	0.0044	0.0026	0.0047
Agua Lav 5	-0.0010	0.0003	-3.2247	0.0013	-0.0017	-0.0004	-0.0018	-0.0002
Flujo Aire 2	0.0021	0.0005	4.1245	0.0000	0.0011	0.0031	0.0008	0.0034
Flujo Aire 3	0.0027	0.0006	4.3192	0.0000	0.0015	0.0039	0.0011	0.0043

Flujo Aire 4	-0.0020	0.0007	-2.8810	0.0040	-0.0033	-0.0006	-0.0037	-0.0002
Flujo Aire 5	-0.0006	0.0004	-1.6110	0.1073	-0.0014	0.0001	-0.0016	0.0004
Nivel Col 2	0.0013	0.0009	1.4443	0.1488	-0.0005	0.0030	-0.0010	0.0035
Nivel Col 3	0.0042	0.0012	3.5384	0.0004	0.0019	0.0065	0.0011	0.0073
Nivel Col 4	0.0038	0.0011	3.5172	0.0004	0.0017	0.0060	0.0010	0.0067
Nivel Col 5	-0.0031	0.0006	-5.4406	0.0000	-0.0042	-0.0020	-0.0046	-0.0016

Tabla B.22: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 3er trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.4357
Coefficiente de determinación R ²	0.1898
R ² ajustado	0.1860
Error típico	0.2364
Observaciones	2167

Tabla B.23: Anova, Segunda prueba, 3er trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	10	28.2176	2.8218	51	2.15E-91
Residuos	2156	120.4477	0.0559		
Total	2166	148.6652			

Tabla B.24: Regresión, Segunda prueba, 3er trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.4947	0.1816	2.7237	0.0065	0.1385	0.8508	0.0264	0.9629
Mo Conc Rou	0.0483	0.0056	8.5939	0.0000	0.0373	0.0593	0.0338	0.0628
pH Col Cu	-0.0788	0.0151	-5.2321	0.0000	-0.1084	-0.0493	-0.1177	-0.0400
Agua Lav 4	0.0037	0.0003	12.2544	0.0000	0.0031	0.0043	0.0029	0.0045
Agua Lav 5	-0.0011	0.0003	-3.6821	0.0002	-0.0017	-0.0005	-0.0018	-0.0003
Flujo Aire 2	0.0018	0.0005	3.6334	0.0003	0.0008	0.0027	0.0005	0.0030
Flujo Aire 3	0.0026	0.0006	4.2402	0.0000	0.0014	0.0038	0.0010	0.0041
Flujo Aire 4	-0.0021	0.0007	-3.2521	0.0012	-0.0034	-0.0008	-0.0038	-0.0004
Nivel Col 3	0.0047	0.0010	4.9175	0.0000	0.0028	0.0066	0.0022	0.0072
Nivel Col 4	0.0041	0.0011	3.6893	0.0002	0.0019	0.0062	0.0012	0.0069
Nivel Col 5	-0.0027	0.0005	-4.9430	0.0000	-0.0037	-0.0016	-0.0041	-0.0013

B.4 Regresiones Cuarto Trimestre

Tabla B.25: Estadísticas de la regresión, Primera prueba, 4to trimestre

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.6685
Coefficiente de determinación R ²	0.4469
R ² ajustado	0.4433
Error típico	0.2165
Observaciones	2186

Tabla B.26: Anova, Primera prueba, 4to trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	14	8E+01	6E+00	1E+02	1E-266
Residuos	2171	1E+02	5E-02		
Total	2185	2E+02			

Tabla B.27: Regresión, Primera prueba, 4to trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.3147	0.1055	2.9838	0.0029	0.1079	0.5216	0.0428	0.5867
Mo Conc Rou	1.4669	0.0430	34.0892	0.0000	1.3825	1.5513	1.3560	1.5779
pH Col Cu	-0.0360	0.0080	-4.5303	0.0000	-0.0516	-0.0204	-0.0565	-0.0155
Agua Lav 2	0.0010	0.0003	3.1904	0.0014	0.0004	0.0015	0.0002	0.0017
Agua Lav 3	0.0011	0.0004	3.0228	0.0025	0.0004	0.0017	0.0002	0.0020
Agua Lav 4	0.0005	0.0004	1.2418	0.2145	-0.0003	0.0013	-0.0006	0.0016
Agua Lav 5	-0.0017	0.0003	-5.4793	0.0000	-0.0023	-0.0011	-0.0025	-0.0009
Flujo Aire 2	0.0014	0.0004	3.3095	0.0009	0.0006	0.0022	0.0003	0.0025
Flujo Aire 3	0.0013	0.0004	2.9106	0.0036	0.0004	0.0022	0.0001	0.0025
Flujo Aire 4	-0.0022	0.0005	-4.8229	0.0000	-0.0031	-0.0013	-0.0034	-0.0010
Flujo Aire 5	0.0007	0.0006	1.1862	0.2357	-0.0005	0.0019	-0.0008	0.0022
Nivel Col 2	-0.0016	0.0008	-1.9387	0.0527	-0.0032	0.0000	-0.0037	0.0005
Nivel Col 3	0.0029	0.0013	2.1984	0.0280	0.0003	0.0055	-0.0005	0.0063
Nivel Col 4	-0.0010	0.0008	-1.2684	0.2048	-0.0026	0.0006	-0.0031	0.0011
Nivel Col 5	-0.0001	0.0010	-0.1145	0.9088	-0.0021	0.0019	-0.0027	0.0025

Tabla B.28: Estadísticas de la regresión, Segunda prueba, 4to trimestre

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0.6663
Coficiente de determinación R ²	0.4440
R ² ajustado	0.4417
Error típico	0.2168
Observaciones	2186

Tabla B.29: Anova, Segunda prueba, 4to trimestre

ANOVA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	9	8E+01	9E+00	2E+02	9E-270
Residuos	2176	1E+02	5E-02		
Total	2185	2E+02			

Tabla B.30: Regresión, Segunda prueba, 4to trimestre

Variables	Coef	Error típico	Est t	Prob	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99%	Superior 99%
Intercepto	0.298	0.103	2.900	0.004	0.097	0.500	0.033	0.564
Mo Conc Rou	1.471	0.043	34.519	0.000	1.388	1.555	1.362	1.581
pH Columnas	-0.032	0.008	-4.107	0.000	-0.048	-0.017	-0.052	-0.012
Agua Lav 2	0.001	0.000	3.820	0.000	0.001	0.002	0.000	0.002
Agua Lav 3	0.001	0.000	4.158	0.000	0.001	0.002	0.000	0.002
Agua Lav 5	-0.002	0.000	-5.522	0.000	-0.002	-0.001	-0.002	-0.001
Flujo Aire 2	0.002	0.000	4.215	0.000	0.001	0.002	0.001	0.003
Flujo Aire 3	0.002	0.000	3.801	0.000	0.001	0.002	0.000	0.003
Flujo Aire 4	-0.002	0.000	-5.368	0.000	-0.003	-0.001	-0.003	-0.001
Nivel Col 3	0.000	0.001	0.045	0.964	-0.001	0.001	-0.001	0.001

Tabla B.31: Estadísticas de la regresión, Tercera prueba, 4to trimestre

Estadísticas de la regresión	
Coficiente de correlación múltiple	0.6663
Coficiente de determinación R ²	0.4440
R ² ajustado	0.4420
Error típico	0.2168
Observaciones	2186

Tabla B.32: Anova, Tercera prueba, 4to trimestre

ANOVA					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	8	8.17E+01	1.02E+01	2.17E+02	6.03E-271
Residuos	2177	1.02E+02	4.70E-02		
Total	2185	1.84E+02			

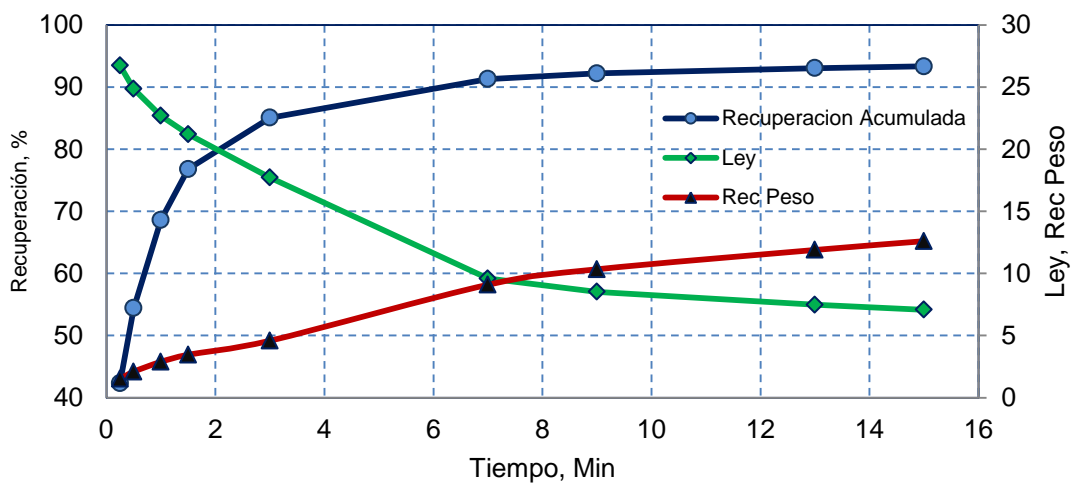
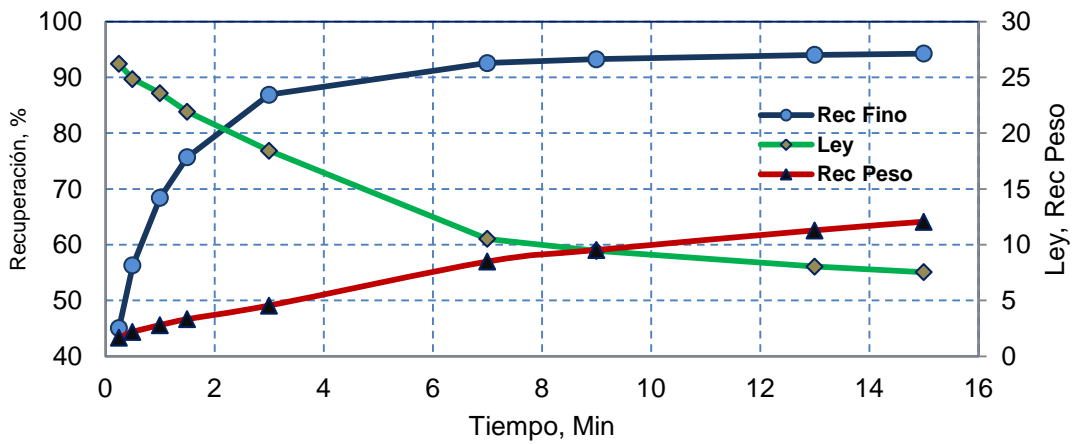
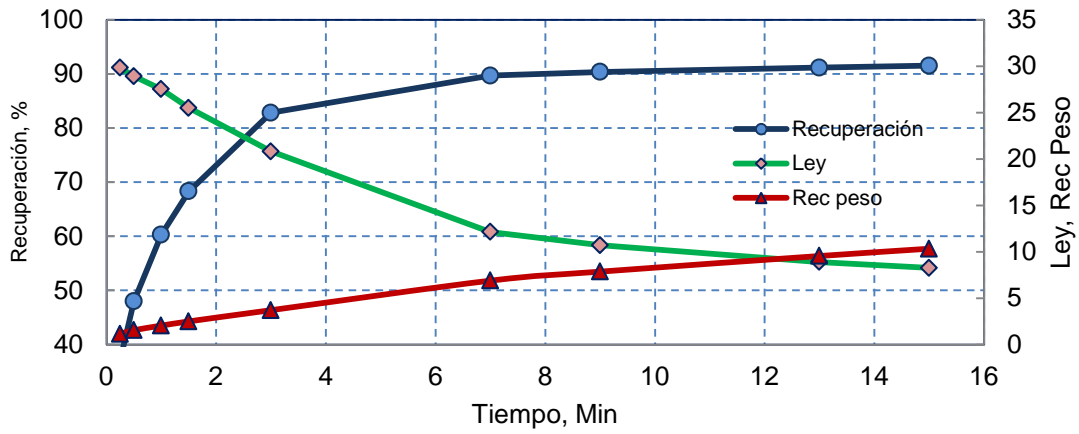
Tabla B.33: Regresión, Tercera prueba, 4to trimestre

<i>Variables</i>	<i>Coef</i>	<i>Error típico</i>	<i>Est t</i>	<i>Prob</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 99%</i>	<i>Superior 99%</i>
Intercepto	0.3016	0.0719	4.1980	0.0000	0.1607	0.4425	0.1164	0.4869
Mo Conc Rou	1.4716	0.0424	34.6733	0.0000	1.3884	1.5548	1.3622	1.5810
pH Col Cu	-0.0324	0.0073	-4.4344	0.0000	-0.0467	-0.0181	-0.0512	-0.0136
Agua Lav 2	0.0011	0.0003	3.8222	0.0001	0.0005	0.0016	0.0004	0.0018
Agua Lav 3	0.0011	0.0003	4.2248	0.0000	0.0006	0.0017	0.0004	0.0018
Agua Lav 5	-0.0016	0.0003	-5.6161	0.0000	-0.0022	-0.0011	-0.0024	-0.0009
Flujo Aire 2	0.0017	0.0004	4.2165	0.0000	0.0009	0.0024	0.0006	0.0027
Flujo Aire 3	0.0015	0.0004	3.8022	0.0001	0.0007	0.0023	0.0005	0.0026
Flujo Aire 4	-0.0020	0.0004	-5.4439	0.0000	-0.0027	-0.0013	-0.0029	-0.0010

ANEXO C

Resultados Desarrollo Experimental

C.1 Pruebas de Cinética Rougher



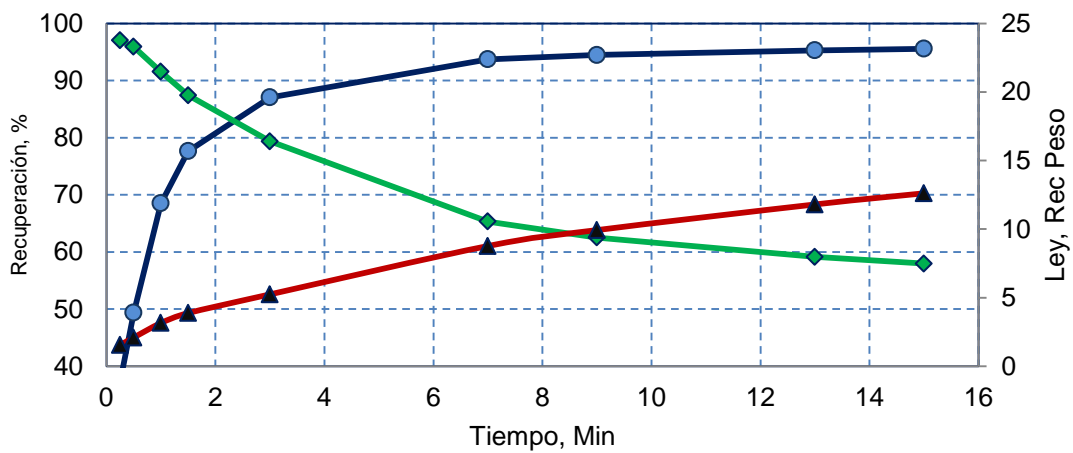
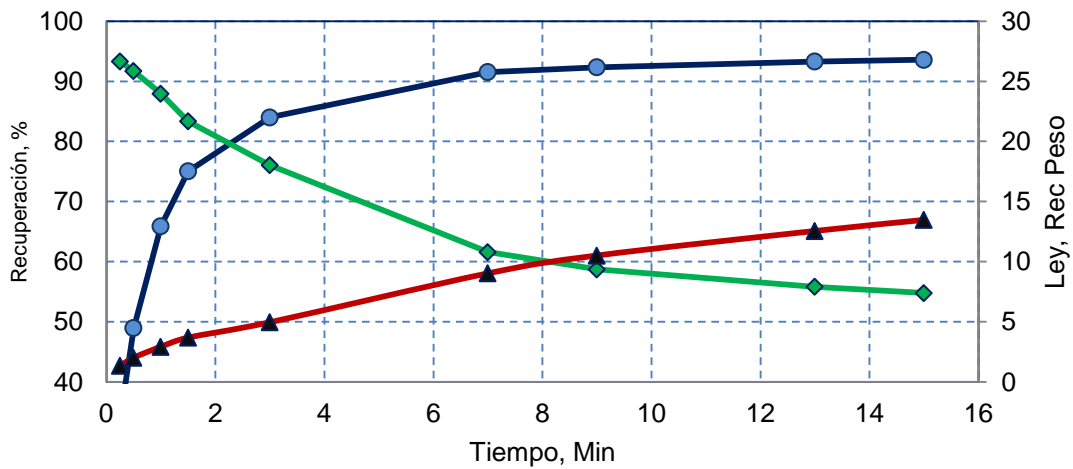
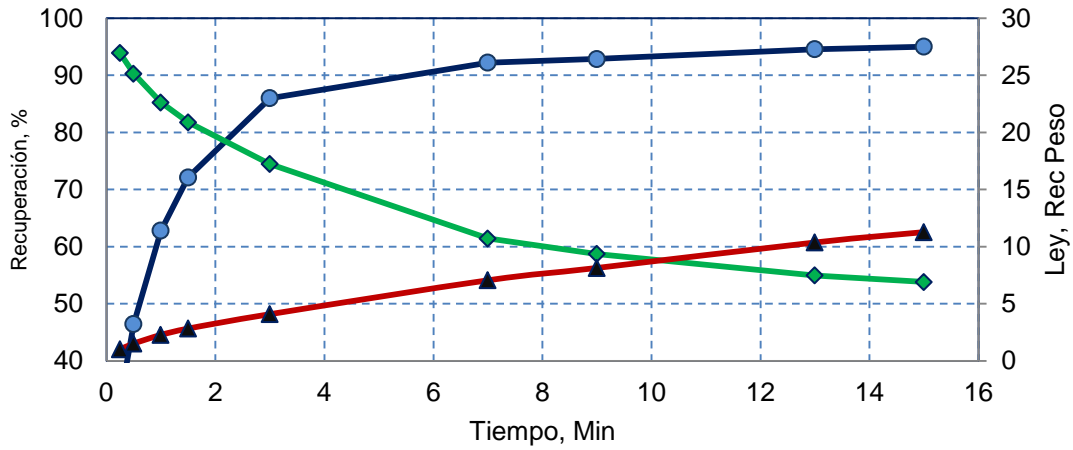
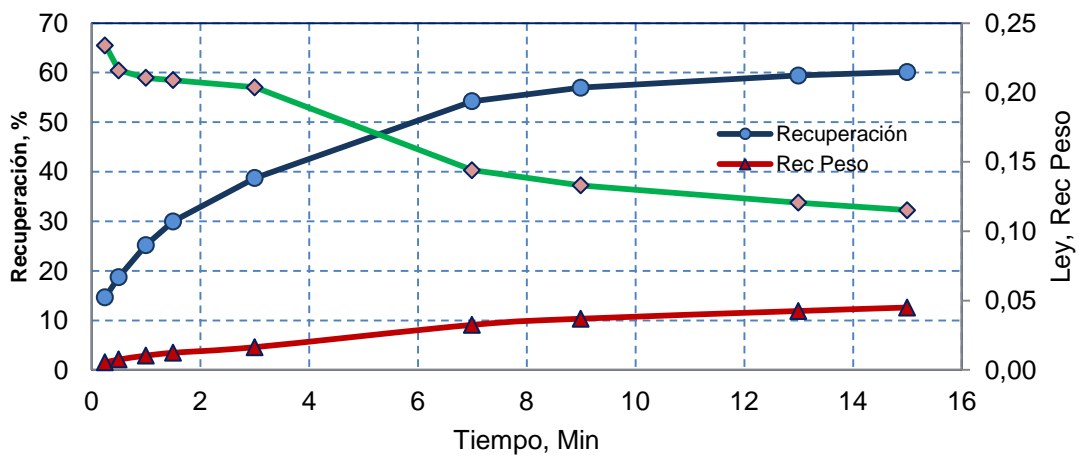
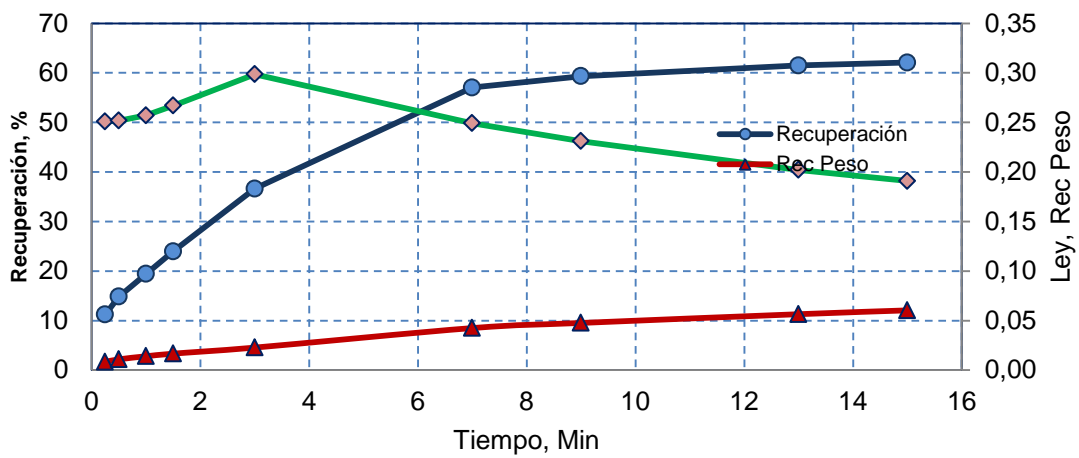
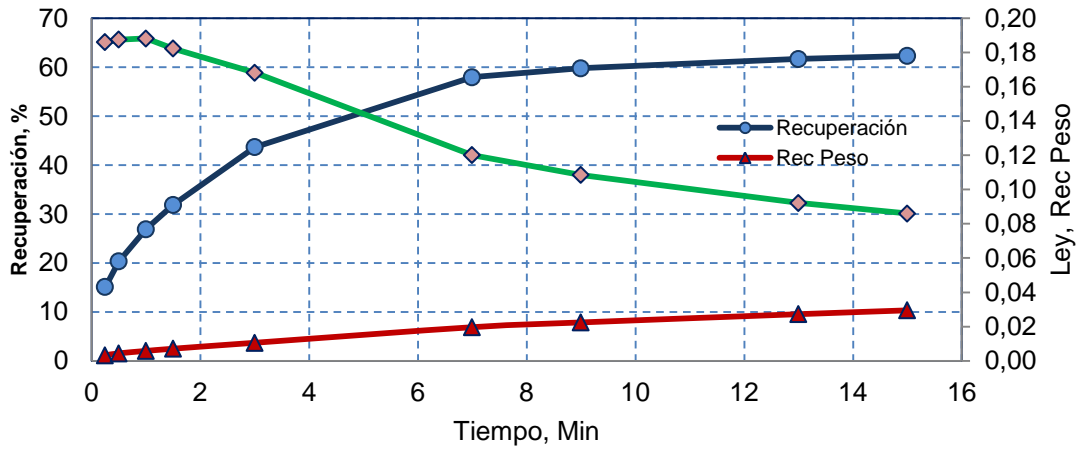


Figura C-1: Cinéticas Flotación Rougher para Cu. 15/10-21/10-28/10-05/11-11/11-18/11



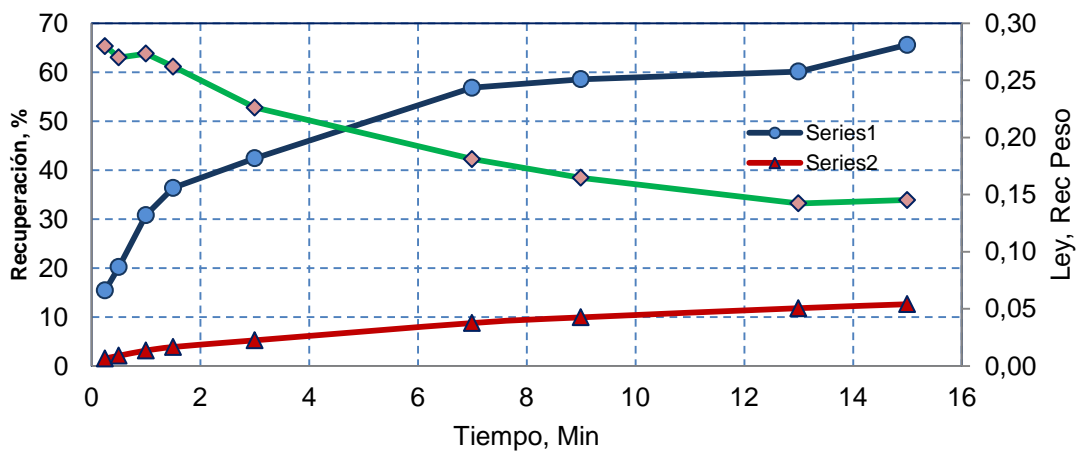
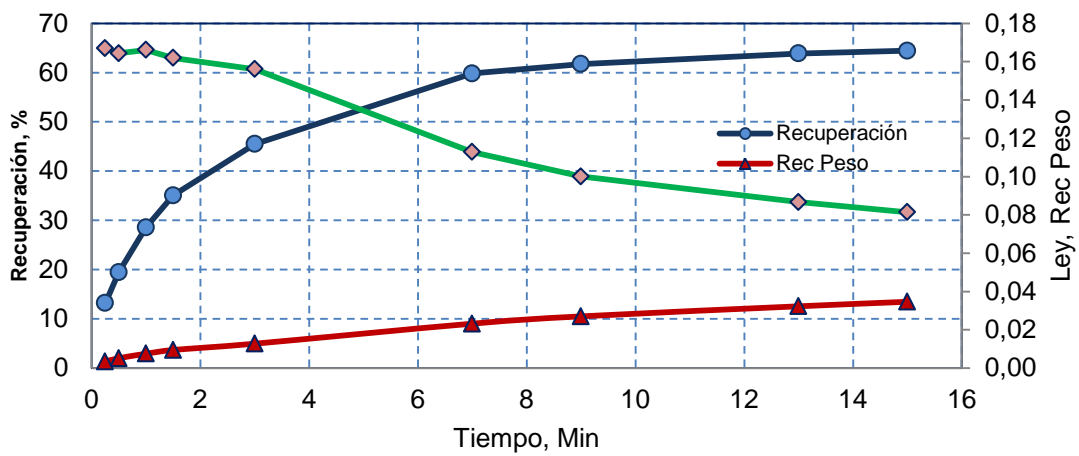
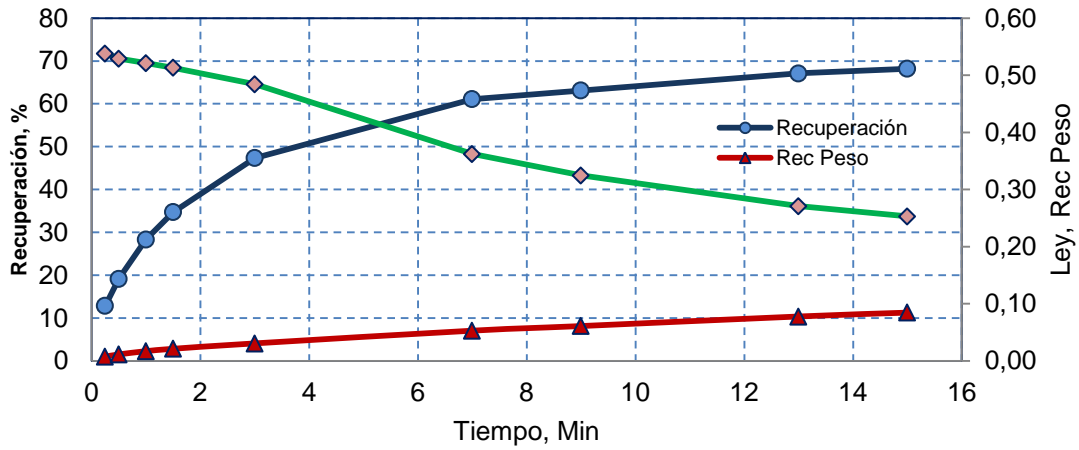


Figura C-2: Cinéticas Flotación Rougher para Mo. 15/10-21/10-28/10-05/11-11/11-18/11

C.2 Resultados Muestreo Celdas Rougher Centro, Cu.

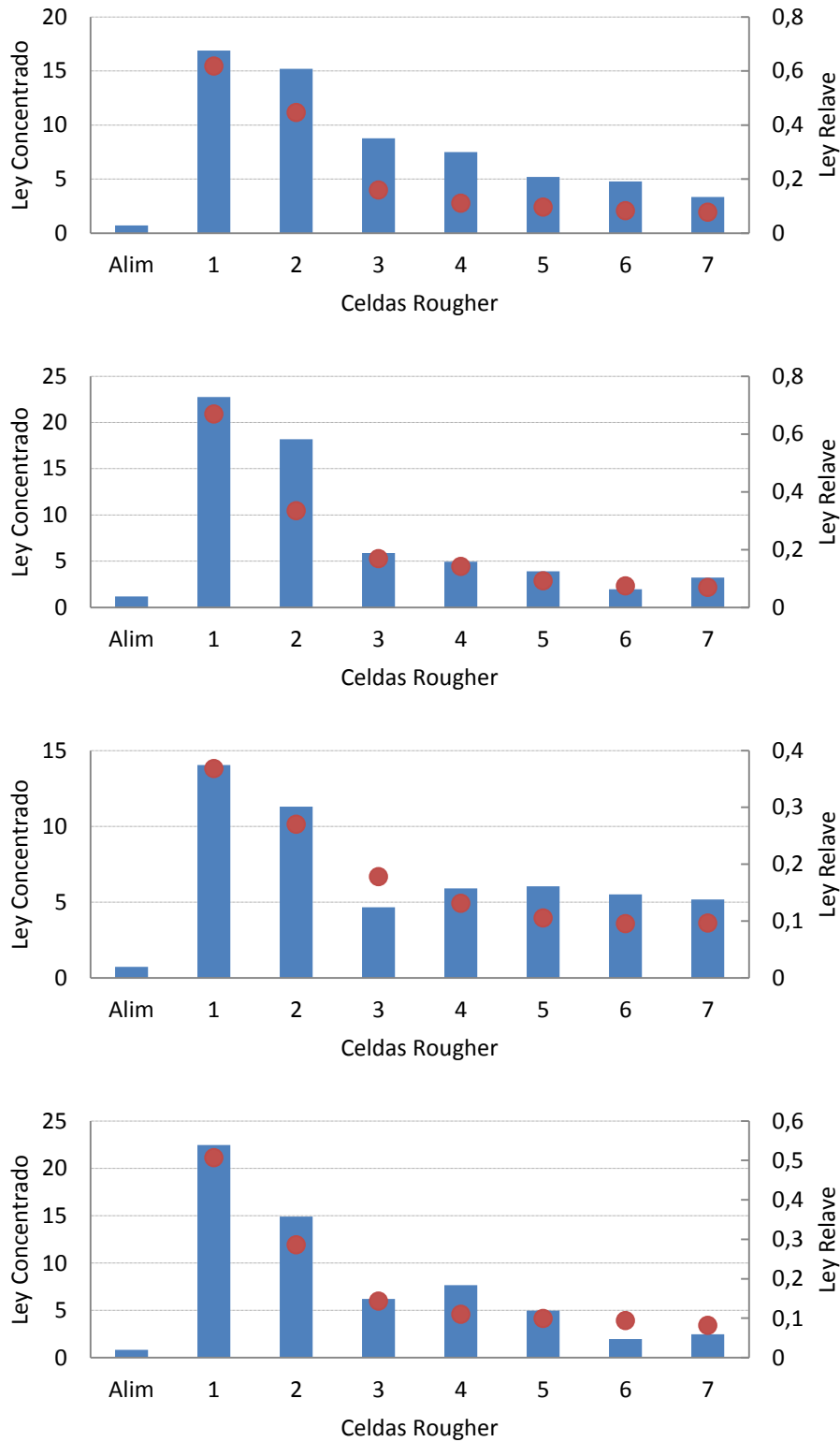


Figura C-3: Perfil de Leyes Cu de Flotación Rougher, 04/03-17/03-16/04-23/04

C.3 Resultados Muestreos Flujo de Agua de Lavado Columnas.

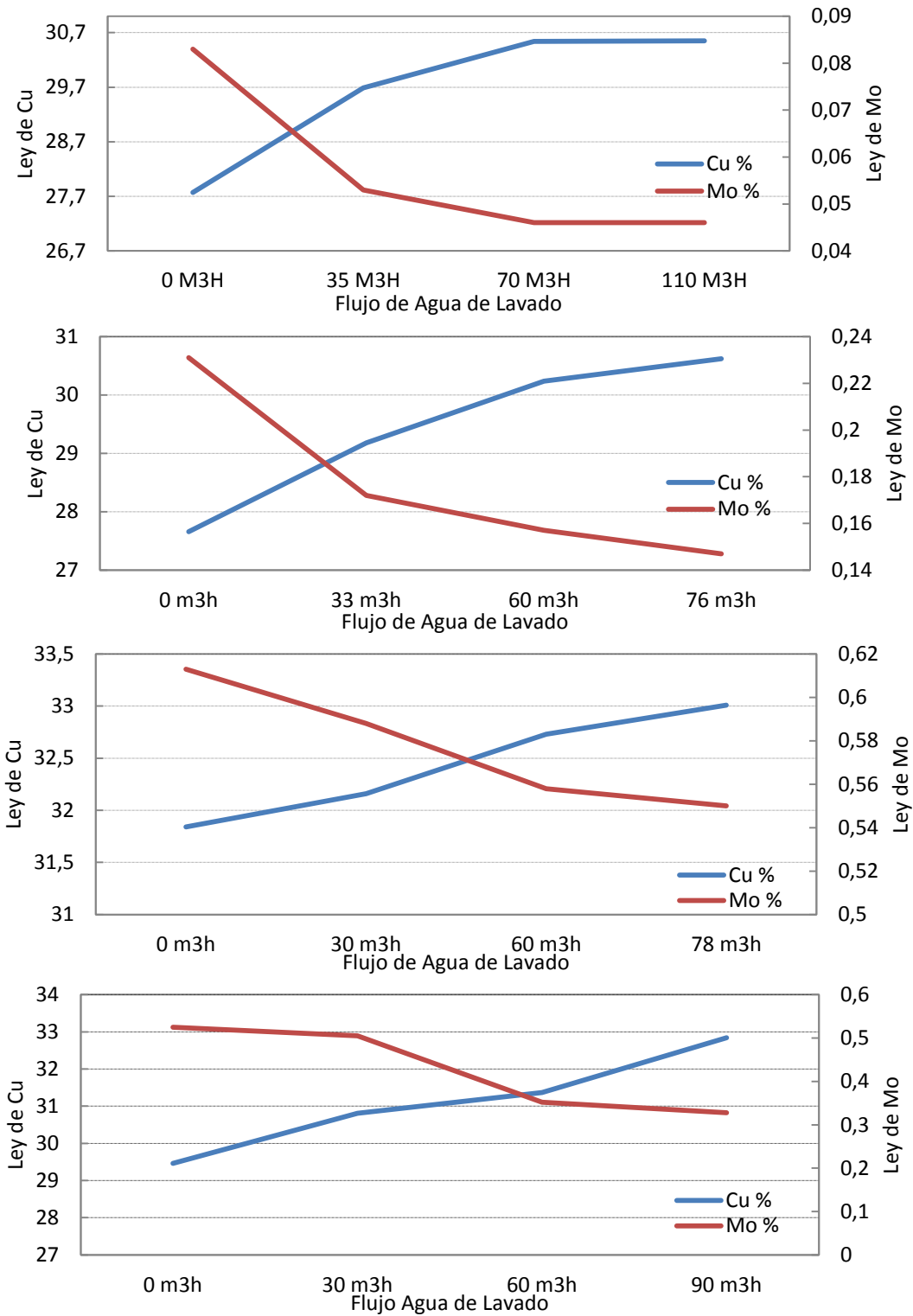
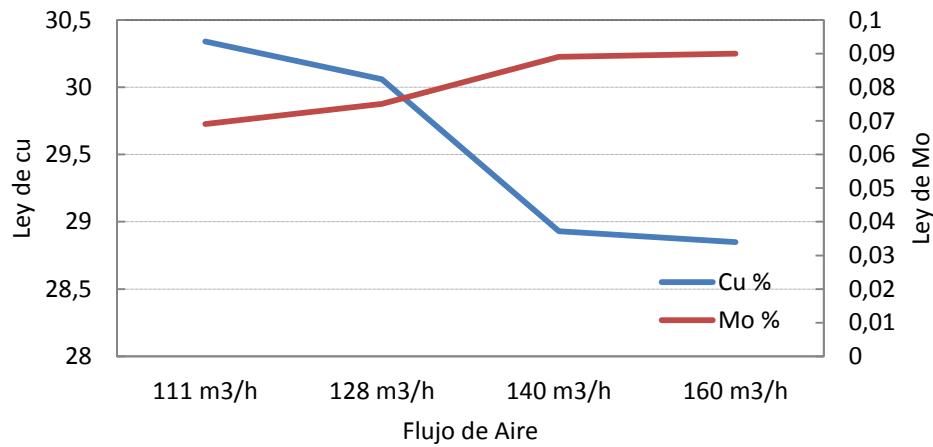
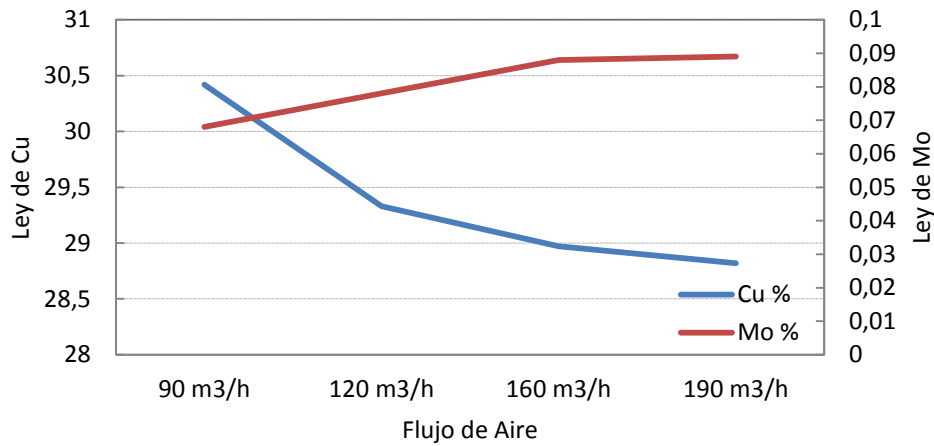
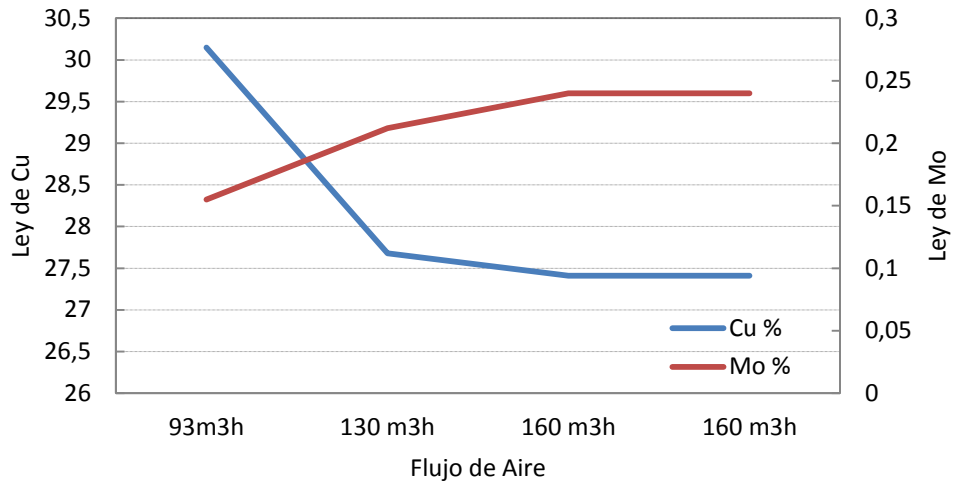


Figura C-4: Resultados muestreos flujos de agua de lavado.

C.4 Resultados Muestréos Flujo de Aire Columnas.



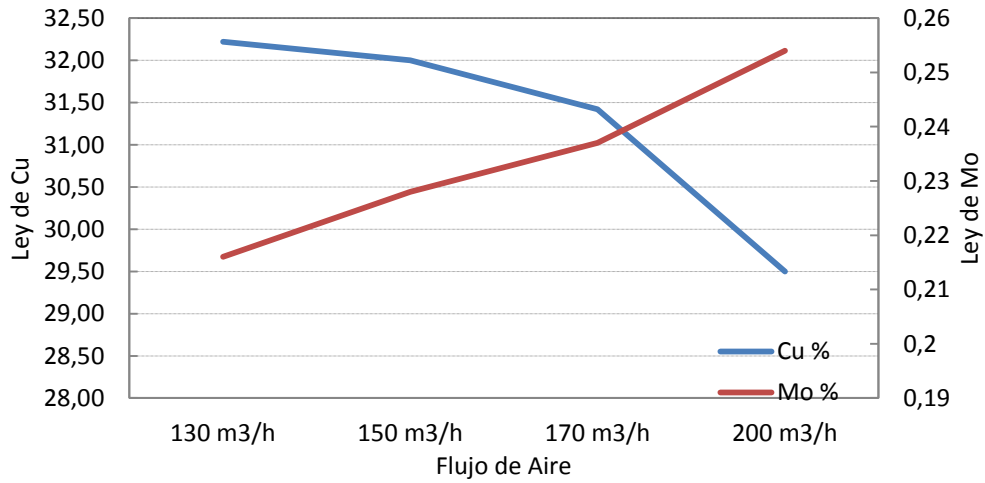
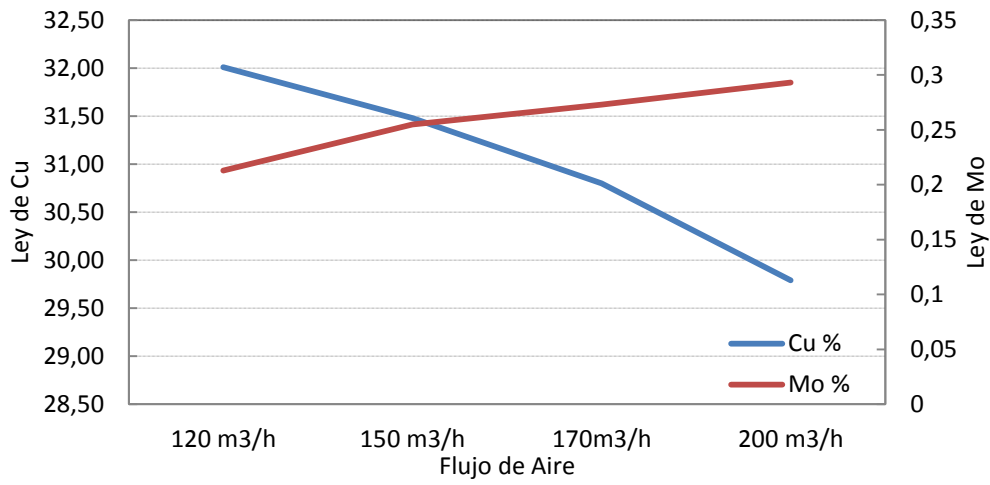
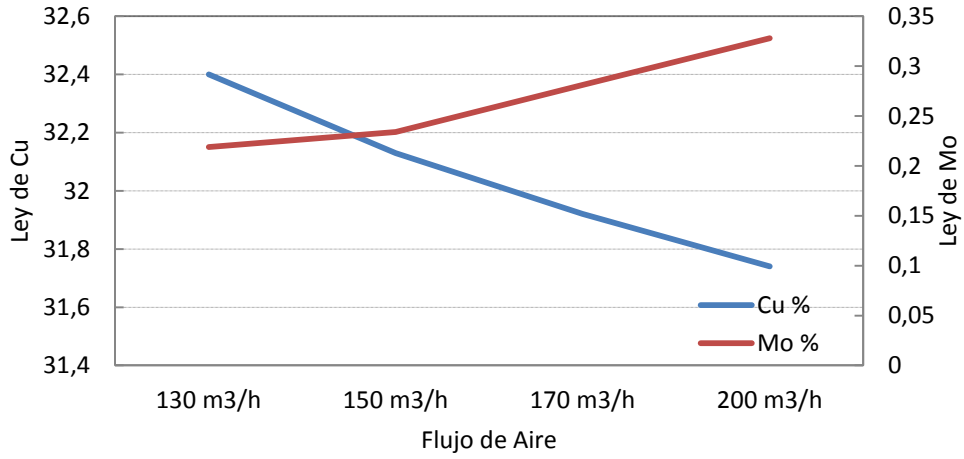
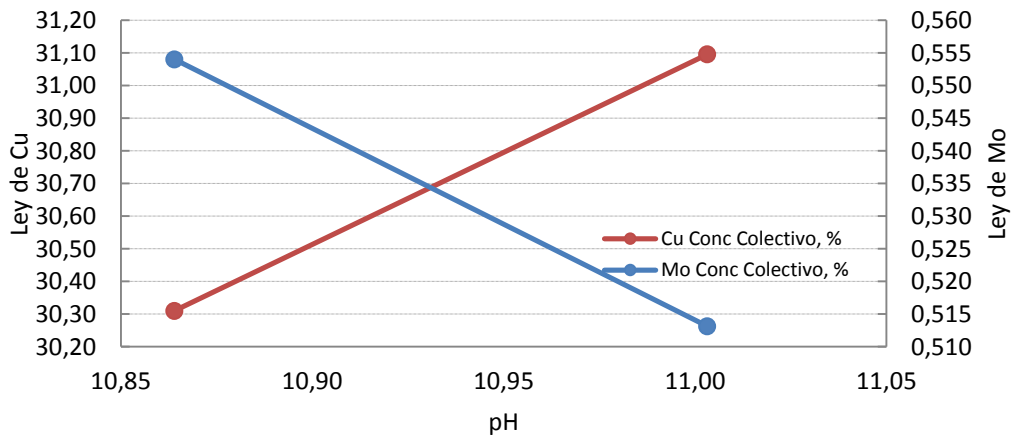
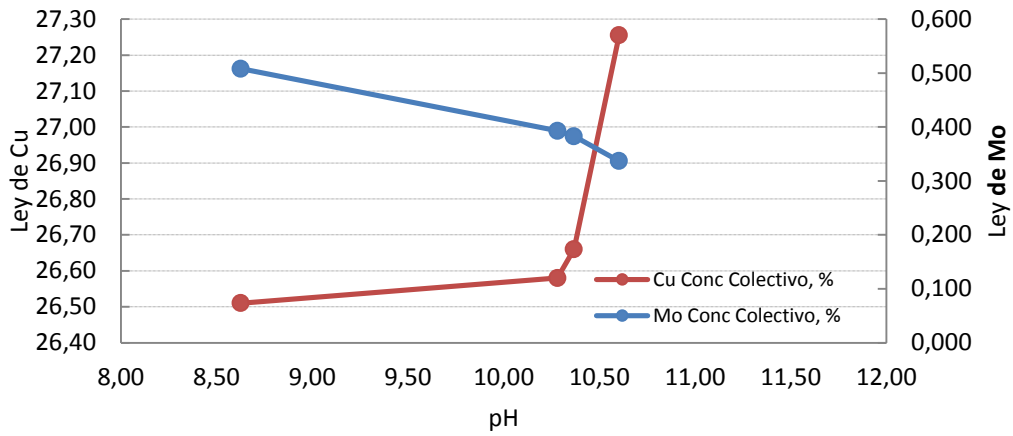
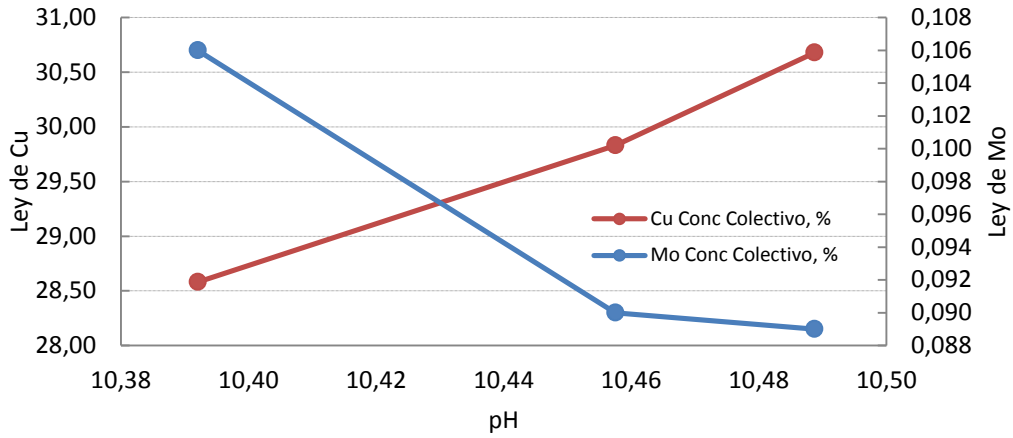


Figura C-5: Resultados muestreos flujos de aire.

C.5 Resultados a distintos pH en Columnas.



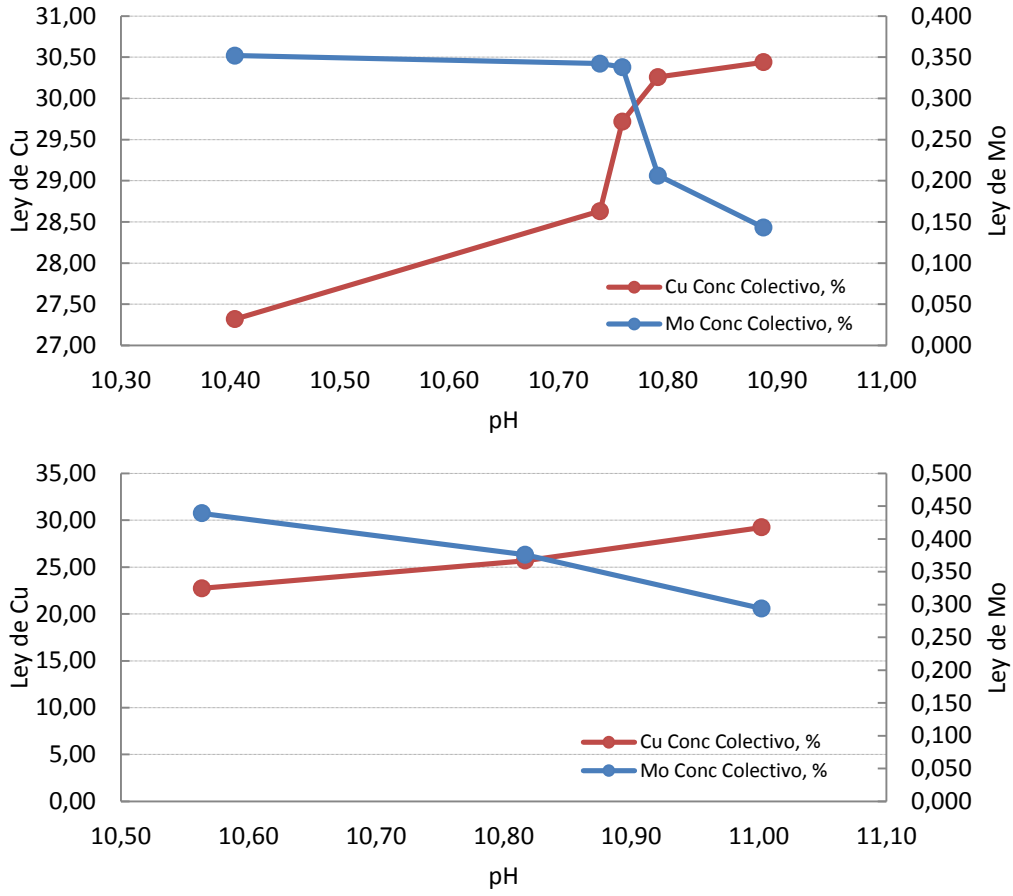
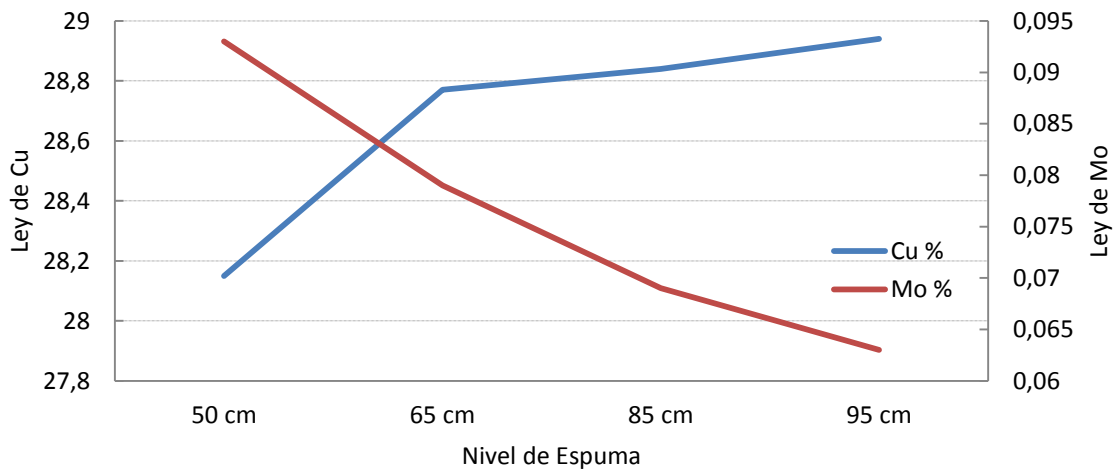
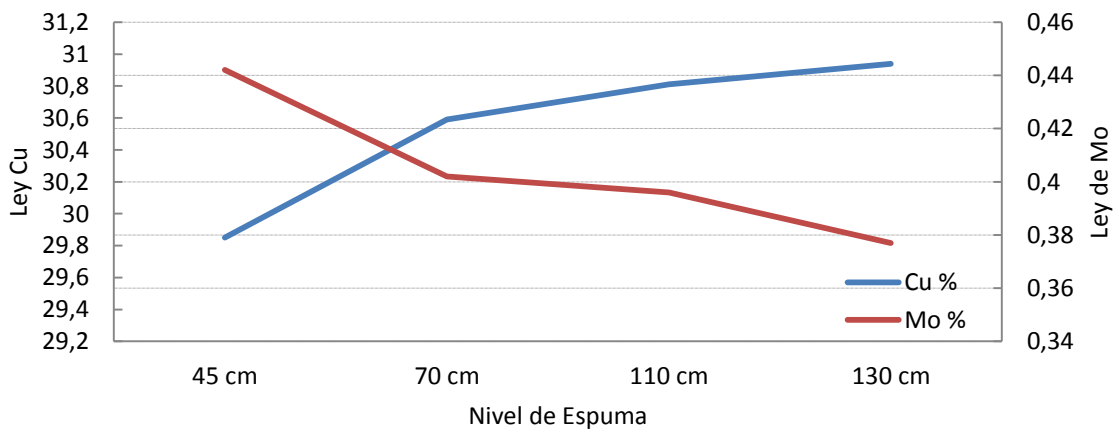
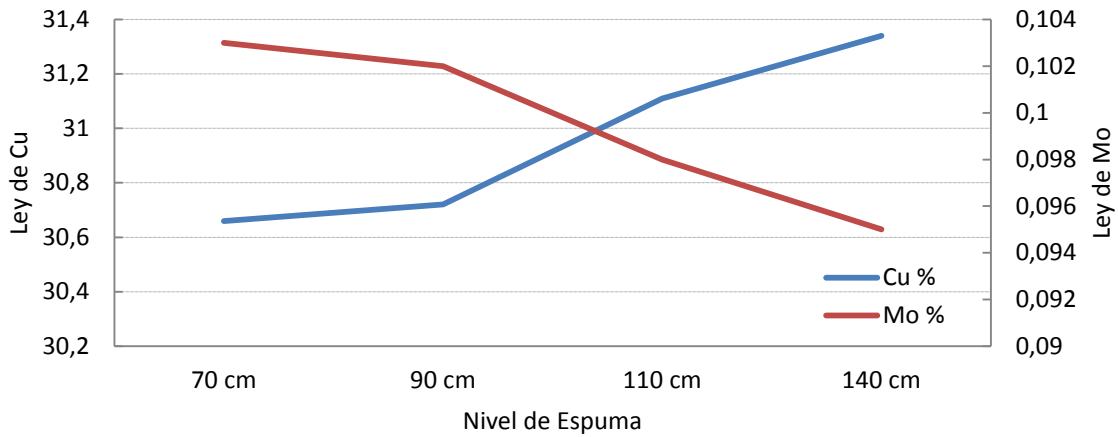
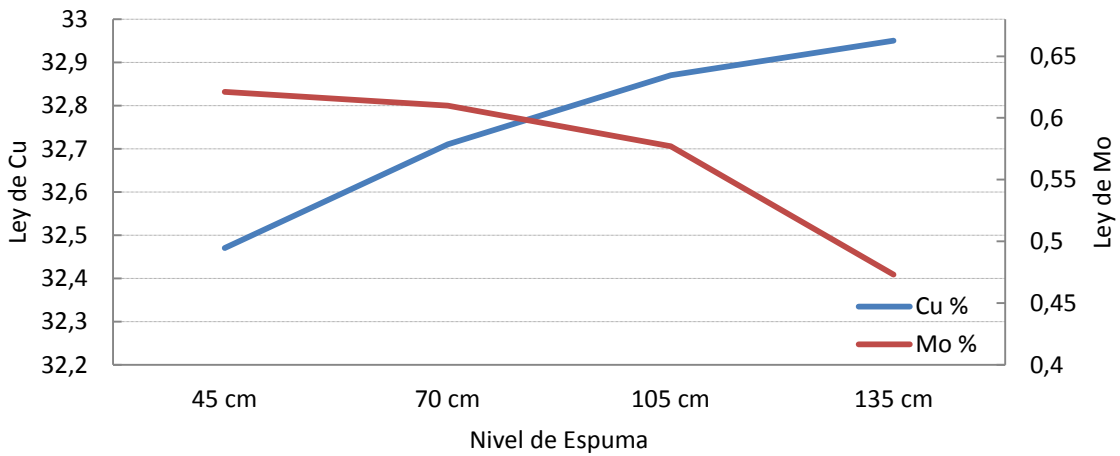
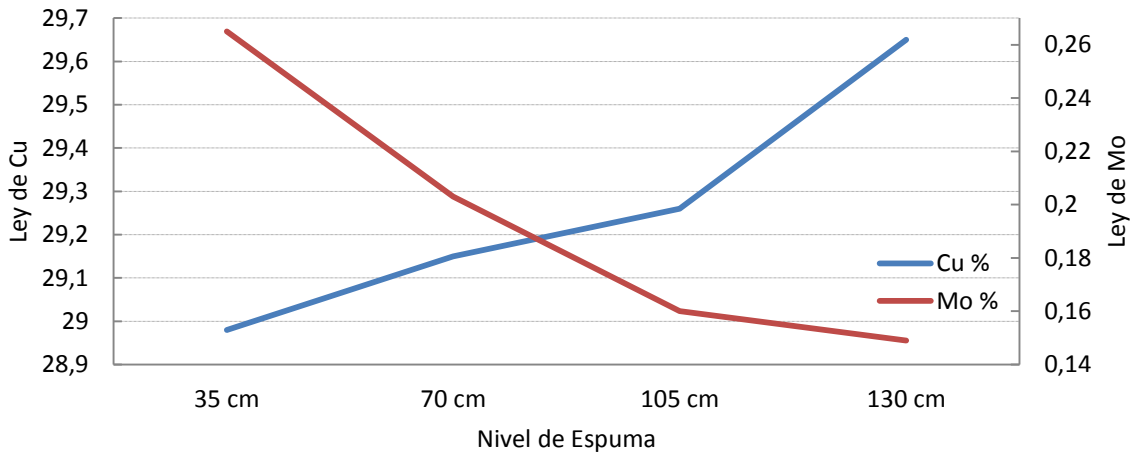
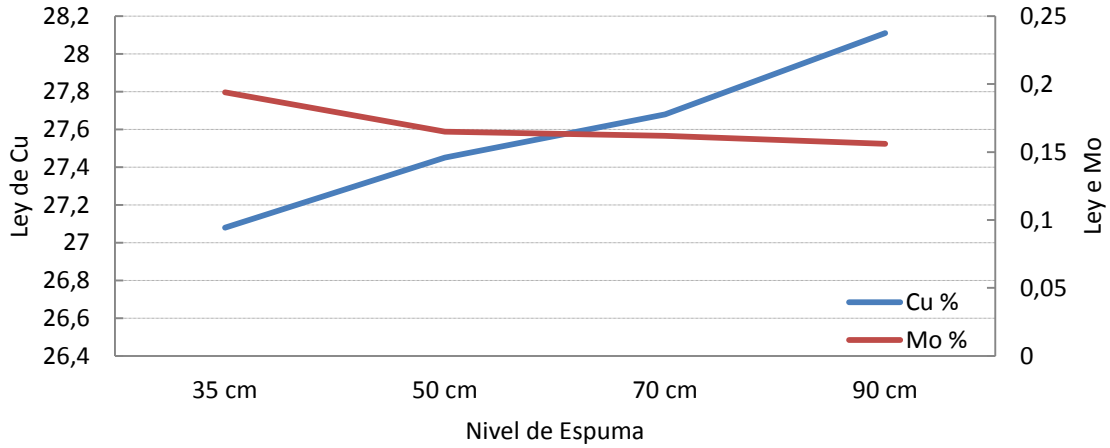


Figura C-6: Resultados Al variar pH.

C.6 Resultados Muestreos Nivel de Espuma en Columnas.





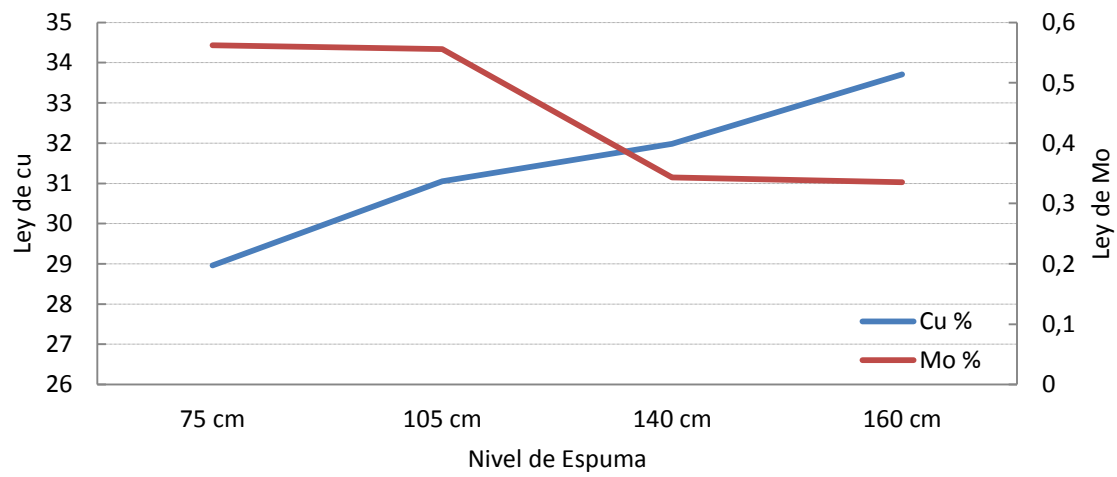
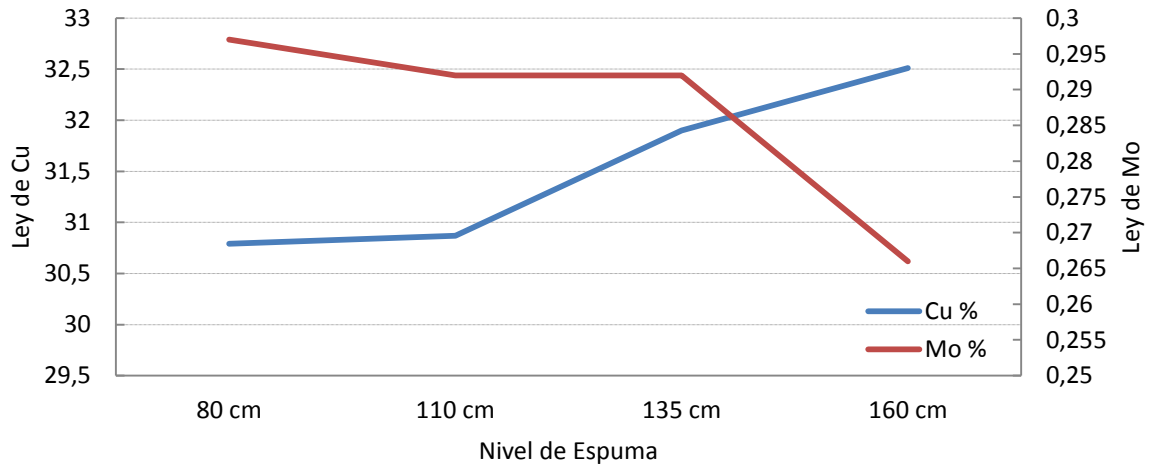


Figura C-7: Resultados muestreos Nivel de espuma.