

Universidad de Concepción

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:

Fernando Parada Luna

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA
PREDECIR LA CONCENTRACIÓN DE COBRE
EN EL PLS DEL PROYECTO “LIXIVIACIÓN
DE RIPIOS” DE LA GERENCIA DE
EXTRACCIÓN Y LIXIVIACIÓN, CODELCO –
DIVISIÓN CHUQUICAMATA**



JAVIERA ARAVENA MAUREIRA

Informe de Memoria de Título

para optar al título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

ABRIL, 2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar debo destacar el enorme esfuerzo que han realizado mis padres para forjar mi espíritu más que como una estudiante universitaria, sino como una persona capaz de contribuir a la sociedad, en especial el enorme sacrificio de mi madre Carmen Rita para ir en mi ayuda aún en los momentos más complejos. A mi hermano Elías destacar la paciencia que me ha tenido, en especial en cuanto a temas tecnológicos y su correcta aplicación que me han causado más de un dolor de cabeza.

Además, no puedo dejar de mencionar, destacar pero sobre todo retribuir la tremenda abnegación que ha tenido mi abuelita, siendo la primera persona que me tomó en sus brazos, y desde entonces como un oso protege a su cría no me alejó jamás de su regazo, guiando mis pasos, acompañando mis travesías, suavizando mis porrazos y protegiéndome siempre de cualquier peligro, por lo que no pude haber recibido mayor regalo que el estar siempre a su lado.

Por otro lado, estoy inmensamente agradecida de mi pololo Eduardo, quien ha sido mucho más que un compañero que me apoya y ayuda en todo lo que está a su alcance, sino que me ha enseñado a observar la vida desde una perspectiva muy distinta a la que estaba acostumbrada, logró que me enfocará en un objetivo diferente, mostrándome lo hermosa que puede ser la vida si disfrutas de los más insignificantes detalles, agradecerle también a su madre y familia en general por el enorme cariño que me han demostrado.

También, debo agradecer el apoyo que me han prestado mis amigos, con quienes no sólo compartí largas noches de estudio, sino que nos reunimos a conversar de nuestras anécdotas, aventuras y sueños, compartimos perspectivas, análisis y experiencias, en especial a mi amiga Marioly y mis hermanitos Pablo y Nicolás. Además, debo mencionar y agradecer a los amigos que conocí en estas circunstancias, don Richard, don Elio, don Jorge, Neptalí, Natalie, Pamela, Marcelo, Karen y Jeanet, en especial a todos los trabajadores de la consola, quienes me acogieron y aclararon muchas de mis inquietudes.

Finalmente, me gustaría mencionar a mis familiares, amigos, compañeros e incluso conocidos en algún momento me tendieron su mano, me dieron algún consejo, me guiaron en algún proceso, por ello quisiera darles mis más sinceras retribuciones.

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló en la Gerencia de lixiviación de Chuquicamata y los objetivos fueron identificar las variables que influyen en la concentración de cobre en el PLS para disminuir la incertidumbre que existe en su predicción, definir capacidades máximas y mínimas del sistema de transporte y almacenamiento de soluciones, proponer un estándar de operación para el proceso de lixiviación y desarrollar un modelo predictivo para la concentración de cobre en el PLS.

En la planta de lixiviación en pilas se trabaja con ripios de minerales oxidados de cobre cuya composición mineralógica es variable, con una ley media de 0.35% de cobre total. Los ripios se apilan formando 108 módulos distribuidos por igual en 2 pilas que se riegan con refino y solución intermedia, operando de esta forma desde el 4 de febrero del 2018 hasta hoy en día.

Durante la recopilación de datos operacionales en el área de lixiviación, se observó que existe una cantidad importante de datos errados, o sin medición, por ende es imposible realizar un balance metalúrgico bien dimensionado, incluso ajustando parámetros en sectores puntuales, ya que es un sistema linealmente dependiente.

Posteriormente se estudió el manejo de soluciones que circulan por la planta, donde el movimiento se realiza por impulsión con bombas y por gravedad, con un sistema semi-automático (con manejo manual y mecánico de las válvulas), existiendo un transporte fluido-dinámico de 2400 m³/h, los cuales se distribuyen en 2 trenes descendientes de refino, que terminan en el pond de refino y pond de la solución intermedia (PDS). Tanto refino como PDS son las soluciones lixiviantes con alrededor de 2200 m³/h de PDS y 800 m³/h de refino, obteniendo solución débil (PDS) y rica en cobre (PLS). Esta última termina subiendo en la estación de re-impulsión (booster) por 2 líneas y alimentando la extracción por solvente. El manejo de soluciones se entiende como un sistema simple al visualizarlo de manera global, pero al ir desglosando el movimiento de los fluidos en detalle se encuentran varias desviaciones, siendo muy difícil de comprender y clasificar, ya que su distribución es sumamente compleja.

Uno de los problemas es que en varios sectores existe sobreacumulación de fluidos, lo que produce pérdidas de solución por rebalse, razón por la cual no sale la misma cantidad que ingresa. Otra dificultad es la turbidez de las soluciones y el desconocimiento del terreno por parte del personal que toma decisiones. Para solucionar los dos primeros problemas se contrató una empresa externa. La solución consistió contener los fluidos y, al mismo tiempo, evitar que se produjera una

solución turbia. Para esto fue necesario el uso de un contenedor, el que a su vez estaba subdividido en dos contenedores y en medio de estos había un filtro. La presencia de ambos contenedores y el filtro hacía posible que cuando hubiese acumulación de sólidos, estos pasaran del primer al segundo recipiente y de este modo, cada cierto tiempo se pudiera extraer los sólidos acumulados. Para el último problema se realizaron levantamientos en terreno vía Google Earth documentando todas las cañerías correspondientes al área de lixiviación.

Para el desarrollo del modelo se utilizaron datos reales de operación, que fueron relacionados con las variables seleccionadas anteriormente y el sistema hidráulico de la planta, donde se emplearon 3 herramientas computacionales (“Microsoft Excel”, “PI Processbook” y “Design Expert”). Con este último se obtuvo en primer lugar la selección de variables que impactan a la concentración de cobre en el PLS, luego una ecuación lineal, que era la más apropiada para el ajuste estadístico, y se emplearon dichos parámetros para evaluar la sensibilidad del modelo.

Las variables que influyen en la concentración de cobre en el PLS, son granulometría, ley, flujo de refino y de PDS, siendo estas 2 últimas las primordiales para la eficiencia del proceso. Además, se concluye que para optimizar la recuperación de cobre en el proceso se debe trabajar con una masa de apilamiento de 40000 tonH, una tasa de curado de 13 kg ácido/tms y una razón de agua de 19 kg agua/tms.

A partir de los datos que se obtuvieron durante 18 meses y bajo las condiciones de humedad típica del ripio que está entre 6-8%, tasa de curado 12 kg ácido/tms y razón de agua de 20 kg agua/tms en la aglomeración, y para el riego un flujo específico de riego de 40m³/hr, modificación del estándar de riego, independiente de la concentración de ácido sulfúrico, puesto que su consumo siempre es constante, se obtuvo una aproximación por medio del modelo de “Design Expert” con 7.7% de error promedio con datos desde mayo del 2018 hasta el 9 de agosto del 2019. Se evaluó la aproximación del modelo, es decir, el porcentaje de error promedio, ante futuros resultados de la concentración de cobre en el PLS siendo demasiado sensible a ruidos del sistema, esto significa que cuando una variable contemplada en la ecuación del modelo no concordaba con el rango normal de operación, la concentración de cobre en el PLS se alteraba significativamente.

Finalmente, con respecto al modelo propuesto este aproxima de manera cercana la concentración de cobre en el PLS, con un error promedio de 6.4% para los últimos antecedentes y a medida que se van incluyendo nuevos datos dicho error irá disminuyendo, además este modelo no depende significativamente de cambios abruptos en las variables recién mencionadas.

ABSTRACT

The present study was developed in the Chuquicamata's leaching management and the objectives were to identify the variables that affect the copper concentration on the PLS to reduce the uncertainty that exist on its prediction, to define the minimum and maximum capacities of the transport and storage of solutions system, to propose an operation standard for the leaching process and to develop a predictive model for the copper concentration on the PLS.

The heap leach plant works with oxidized copper leaching residues whose mineralogical composition is variable, with a middle value of 0.35% total copper. The residues are stacked forming 108 modules equally distributed on 2 heaps that are watered with raffinate and intermediate solutions, operating on this way since february 4, 2018 until today.

During the operational data recopilation in the leaching area, was observed that exist an important quantity of wrong or non mesured data, so it is imposible do a well dimensioned metallurgical balance, even adjusting parameters in point sectors, since it is a linearly dependent system.

Later, the handling of solutions that circulate through the plant was studied, where the movement is done by impulse with bombs and by gravity, with a semi-automatic system (with manual and mechanical control of the valves), existing a 2400 m³/h fluid-dynamic transport, wich are distributed in 2 refining descendant trains, that ends in the raffinate pond and middle solution pond (PDS). Such raffinate and PDS are the leaching solutions with around 2200 m³/h of PDS and 800 m³/h of raffinate, getting middle solution (PDS) and pregnant leach solution (PLS). The last one ends up going up at the re-drive station (booster) by 2 lines and feeding the solvent extraction. Regarding the solutions management just mentioned, it is understood as a simple system when visualizing it in a global way, but when breaking down the movement of the fluids in detail several deviations are found, becoming very difficult to understand and break down, since its distribution is extremely complex.

One of the problems is that in several areas there is an fluids accumulation, which produces solution losses due to overflow. This is why the amount of solution that goes in does not correspond to the amount that comes out. Other difficulty is the turbidity of the solutions and the lack of knowledge of the terrain by the staff that take decisions. For the two first problems an external firm was contracted, that managed to contain the solutions and prevent a turbid solution by using a kind of big container subdivided in two single containers, which where separated by a

filter, so that when there was an accumulation of solids, they fell into one of the containers, and passed to the other through a filter. The accumulated solids were removed periodically. For the last problem field surveys were done by Google Earth documenting all the pipes corresponding to the leaching area.

For model development real operation data were used, that were related with the previously selected variables and the plant's hydraulic system, where were used 3 computational tools ("Microsoft Excel", "PI Processbook" y "Design Expert"). With the last one was obtained in first place the variables selection that impact to the copper concentration in the PLS, then a linear equation, that was the most appropriate to the statistical adjustment, and these parameters were used to evaluate the model's sensitivity.

The variables that affect the copper concentration on the PLS, are granulometry, copper content, raffinate solution and PDS solution, these 2 last being the essential for the process efficiency. Besides, is concluded that in order to optimize the copper recovering in the process it is necessary to work with a stacking mass of 40000 tonH, a cure rate of 13 kg acid/tms and a water ratio of 19 kg water/tms.

From data obtained during 18 months and under the humidity conditions typical of the residues that is between 6-8%, cure rate 12 kg acid / tms and water ratio 20 kg water/tms in the agglomeration, and for the irrigation a specific irrigation flow 40 m³/h, modification of the irrigation standard, independent of sulfuric acid concentration, since its consumption is always constant, an approximation was obtained by the "Design Expert" model with 7.7% error average with data from may 2018 until August 9, 2019. The approximation to future results of the copper concentration in the PLS model was evaluated and found to be highly sensitive to system noise. This means that when a variable in the modeled equation did not agree with the normal range of operation, the copper concentration in the PLS was significantly altered.

Finally, the proposed model closely approximates the copper concentration on the PLS, with an average error 6.4% for the latest data. As new data are included, this error will decrease. Furthermore, this model does not depend significantly on abrupt changes in the just mentioned variables.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA	x
NOMENCLATURA DE UNIDADES.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 General	3
2.2 Específicos.....	3
3. ANTECEDENTES.....	4
3.1 Lixiviación	4
3.2 Aglomeración.....	8
3.3 Cinética de lixiviación	11
3.4 Mineralogía.....	17
3.5 Extracción por solvente	18
4. DESARROLLO.....	22
4.1 Metodología utilizada.....	22
4.2 Manejo de soluciones.....	24
4.3 Problemas Identificados	26
4.4 Estrategia de Simulación	27
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	30
5.1 Manejo de soluciones.....	30
5.2 Estándar Operacional	34
5.3 Comportamiento de la concentración de cobre del PLS en el tiempo.....	36
5.4 Resultados de la simulación.....	39
6. CONCLUSIÓN	64
7. RECOMENDACIONES	65
8. BIBLIOGRAFÍA	67
9. APÉNDICE.....	69



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación general de los procesos involucrados en la GEL. (Vera M., 2012)	2
Figura 2. Representación de la carpeta de HDPE en lixiviación. (Vasov V., 2015).....	5
Figura 3. Esquema que describe el método de filtración en la pila. (López E., 2012).....	6
Figura 4. Esquema representativo de la lixiviación en botaderos. (Ortega F., 2019)	8
Figura 5. Representación característica de un tambor aglomerador. (ERAL-CHILE, S.A).....	11
Figura 6. Partícula esférica reaccionando con control por transferencia de masa. (Ruiz C., 2013).....	12
Figura 7. Partícula esférica reaccionando con control por difusión a través de una capa de producto poroso. (Ruiz C., 2013).....	15
Figura 8. Partícula esférica reaccionando con control químico. (Ruiz C., 2013)	16
Figura 9. Depósito de mineralización exótica. (Maksaev V., 2007).....	18
Figura 10. Esquema característico para recuperar cobre por medio de lixiviación-extracción por solvente-electroobtención. (Michaud D., 2015)	20
Figura 11. Diagrama secuencial de la lixiviación-extracción por solvente-electroobtención. (Ruiz C., 2013).....	21
Figura 12. Circulación del PLS en la PTMP.	30
Figura 13. Circulación del PDS y refinado en la PTMP.....	31
Figura 14. Diagrama general del movimiento de fluidos en “Microsoft Excel” de la PTMP.	32
Figura 15. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (días) durante el 2018.	37
Figura 16. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (meses) durante el 2018.	37
Figura 17. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (meses) durante el 2019.	37
Figura 18. Comportamiento de la concentración de cobre del primer efluente (PLS).	38
Figura 19. Comparación de la concentración de cobre en el refinado en función del tiempo durante el 2018.	38
Figura 20. Comparación de la concentración de cobre en el refinado en función del tiempo durante el 2019.	39
Figura 21. Comparación de la concentración de cobre real y simulada en el PLS con “Design Expert”.	41
Figura 22. Comparación de la concentración de cobre real y simulada en el PLS con datos depurados utilizando “Design Expert”.	42
Figura 23. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de ¾”.	42
Figura 24. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de 100#.	43
Figura 25. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de 200#.	43
Figura 26. Comportamiento de la concentración de cobre con la razón CuS/CuT.	44
Figura 27. Comportamiento de la concentración de cobre con la concentración de cobre del refinado del tren A.	44
Figura 28. Comportamiento de la concentración de cobre con la acidez del refinado del tren B.	45
Figura 29. Comportamiento del control cinético en los módulos.	46
Figura 30. Comportamiento de la concentración de cobre en 2019.....	47
Figura 31. Comportamiento de la recuperación de cobre.....	48
Figura 32. Acidez del PDS y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	50
Figura 33. Concentración de cobre del PDS y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.....	51
Figura 34. Granulometría ¾” y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	52
Figura 35. Granulometría ¼” y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	52
Figura 36. Granulometría 200# y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.....	53

Figura 37. Razón de agua y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	54
Figura 38. Tasa de curado y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	54
Figura 39. Masa húmeda y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.	55
Figura 40. Variables significativas de “Design Expert” para la recuperación de cobre.	56
Figura 41. Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del PDS.	56
Figura 42. Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del PDS.	57
Figura 43. Comportamiento de la recuperación de cobre con el tiempo del primer efluente.	57
Figura 44. Comportamiento de la recuperación de cobre con la masa húmeda.	58
Figura 45. Comportamiento de la recuperación de cobre con la ley de cobre total.	58
Figura 46. Comportamiento de la recuperación de cobre con la tasa de curado.	59
Figura 47. Comportamiento de la recuperación de cobre con la razón de agua.	59
Figura 48. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 50#.	60
Figura 49. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 200#.	60
Figura 50. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de -200#.	61
Figura 51. Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del primer efluente.	61
Figura 52. Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del primer efluente.	62
Figura 53. Comparación del PLS real y simulado en 2019.	63



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Capacidad de contención de soluciones de la GEL.....	32
Tabla 2: Transporte de soluciones parte 1 de la PTMP.....	33
Tabla 3: Transporte de soluciones parte 2 de la PTMP.....	33
Tabla 4: Transporte de soluciones parte 3 de la PTMP.....	33
Tabla 5: Variación de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo durante el 2018.....	69
Tabla 6: Variación del promedio mensual de concentración de cobre en el PLS en el tiempo durante el 2018.	78
Tabla 7: Variación del promedio mensual de concentración de cobre en el PLS en el tiempo durante el 2019.	78
Tabla 8: Comportamiento de la concentración de cobre del primer efluente.	78
Tabla 9: Comportamiento de la concentración de cobre en el refinado del tren A con respecto a la concentración de cobre en el PLS.....	79
Tabla 10: Comportamiento de la concentración de ácido en el refinado del tren B con respecto a la concentración de cobre en el PLS.....	80
Tabla 11: Comportamiento de la concentración de cobre en el refinado en función del tiempo durante el 2018.	82
Tabla 12: Comportamiento de la concentración de cobre en el refinado en función del tiempo durante el 2019.	85
Tabla 13: Variables de la granulometría de cabeza que afectan la concentración de cobre en el PLS según el modelo.....	88
Tabla 14: Influencia de la ley de cobre en la concentración de cobre en el PLS.....	92
Tabla 15: Comportamiento de la concentración de cobre en el 2019.....	94
Tabla 16: Comparación de la concentración de cobre en el PLS real y simulada.	98
Tabla 17: Comparación de la concentración de cobre en el PLS real y simulada con datos depurados. ...	101
Tabla 18: Comportamiento de la concentración de cobre real y simulada en 2019.....	103
Tabla 19: Comportamiento de la recuperación de cobre.	106
Tabla 20: Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del primer efluente.	106
Tabla 21: Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del primer efluente.	107
Tabla 22: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría ¾”.....	109
Tabla 23: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría ¼”.....	110
Tabla 24: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 200 #.	111
Tabla 25: Comportamiento de la recuperación de cobre con la tasa de curado.	113
Tabla 26: Comportamiento de la recuperación de cobre con la razón de agua.	114
Tabla 27: Comportamiento de la recuperación de cobre con la masa húmeda.....	115

NOMENCLATURA

= Malla

CAEX = Camiones de extracción

DMH = División Ministro Hales

\bar{E} = Reactivo orgánico

ECL = Ecometales

EW = Electrowinning (Electroobtención)

GEL = Gerencia de Extracción y Lixiviación

gpl = Gramos por litro

HDPE = Polietileno de Alta Densidad (High Density Polyethylene)

LX = Lixiviación

M = Ion metálico

\overline{ME} = Complejo formado entre el reactivo orgánico y el ion metálico

N° = Número

PDS = Solución Preñada Intermedia

pH = Indicador de acidez de la solución

PLS = Solución Preñada de Lixiviación (Pregnant Leach Solution)

PMT = Pond Mario Tapia

PTMP = Planta de Tratamientos de Minerales en Pila

P&ID = Diagrama que representa el movimiento de flujos, equipos e instrumentación utilizada en un proceso (Piping and Instrumentation Diagram).

Ref = Refino

Recirc = Recirculación

SBL = Sulfuros de Baja Ley

SX = Extracción por Solvente

TbAg = Tambor aglomerador

tms = Toneladas de mineral seco

tonH = Toneladas de mineral húmedo



NOMENCLATURA DE UNIDADES

%: Porcentaje.

”: Pulgada, 0.0254m, [L].

cm: Centímetro, 10^{-2} m, [L].

g: Gramo, 10^{-3} kg, [M].

kg: kilogramo, unidad del SI de masa, [M].

L: Litro, unidad de volumen, [L³].

m: Metro, unidad de SI de longitud, [L].

mm = Milímetros, 10^{-3} m, [L].

μm: Micrómetro, micrón o micra, 10^{-6} m, [L].

ton: Tonelada métrica, 1000kg, [M].

rpm: revoluciones por minuto, [T⁻¹].

s: Segundo, unidad del SI tiempo, [T].

°C: Grados Celsius, unidad de temperatura [Θ].



1. INTRODUCCIÓN

La Gerencia de Extracción y Lixiviación (GEL) se encuentra desarrollando el proyecto “Lixiviación de ripios y recursos artificiales”, donde se adaptaron los recursos disponibles de la Planta de Tratamientos de Minerales en Pila (PTMP) para tratar minerales lixiviados previamente en bateas, que cumplen con una granulometría apropiada, por lo tanto, se excluyen los procesos de reducción de tamaño y clasificación.

Actualmente, la GEL se dedica principalmente a procesar minerales oxidados, los que se retiran de un depósito (stock) para formar una mezcla en proporción 70/30 de ripios verdes provenientes de la Mina Sur y ripios rojos provenientes de la Mina Chuquicamata respectivamente, para ser trasladados al stockpile.

Luego, la mezcla se dirige al proceso de aglomeración mediante una serie de correas transportadoras y buzones de traspaso, en la aglomeración se adiciona agua y ácido sulfúrico concentrado para obtener glómeros cercanos a $\frac{3}{4}$ ” (19.050 mm), los que son utilizados para cargar las pilas norte y sur respectivamente. Las pilas se lixivian obteniendo una solución rica en cobre llamada PLS, mientras esta se dirige al proceso de extracción por solvente para ser purificada, simultáneamente se devuelve refino a lixiviación utilizado para regar las pilas, y finalmente en la nave de electroobtención el cobre se deposita sobre una lámina de acero inoxidable mediante la aplicación de corriente, proceso denominado electroobtención, que da origen a los cátodos de cobre de alta pureza.

El proceso global se encuentra representado en la Figura 1, donde los camiones CAEX transportan la mezcla de ripios hacia un buzón de traspaso. La carga desciende hacia una serie de correas transportadoras que se dirigen hacia el sector de almacenamiento o acopio, que se ve representado por un stockpile, por el cual cae el material a otras correas transportadoras seguidas de buzones de traspaso consecutivamente hasta que llegan los ripios a los 3 tambores aglomeradores, donde se les adiciona agua y ácido sulfúrico concentrado. Los glómeros formados se dirigen a otras correas transportadoras que los llevan al puente apilador para formar la pila.

En la Figura 1 también se representa la forma en que se apilaba cuando se encontraba operativa la rotopala, el material se riega con las soluciones lixiviantes para obtener una solución rica en cobre que va al proceso de purificación denominado extracción por solvente, para terminar obteniendo cátodos de cobre a través de la electroobtención, que requiere corriente para que el cobre se deposite sobre la lámina de acero.

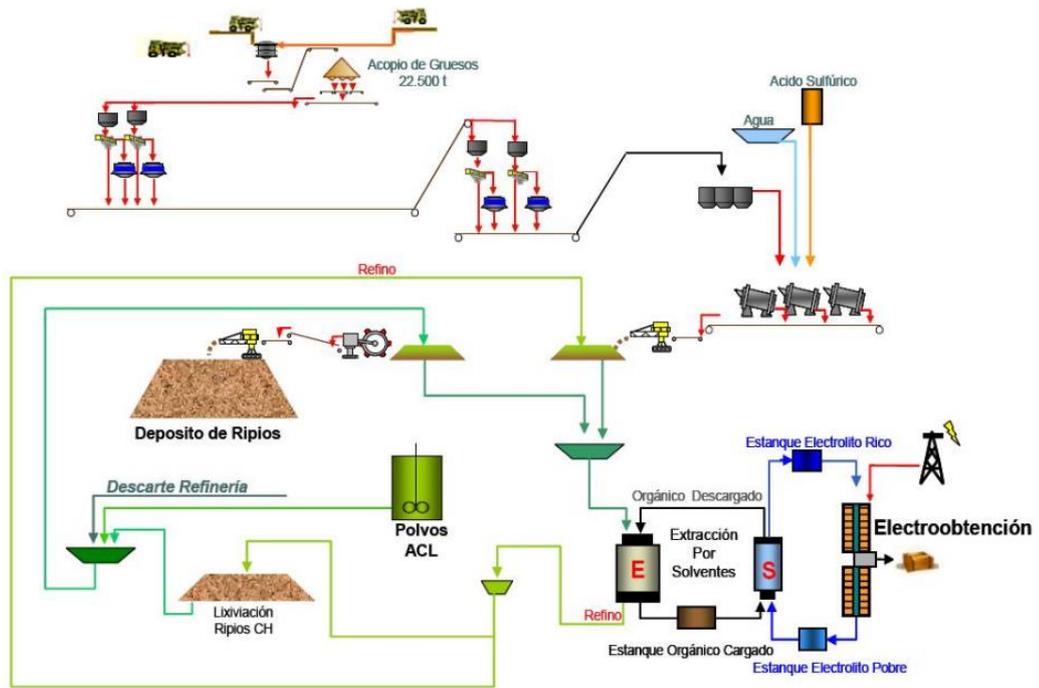


Figura 1. Representación general de los procesos involucrados en la GEL. (Vera M., 2012)



2. OBJETIVOS

2.1 General

Desarrollar un modelo predictivo para la concentración de cobre en el PLS a partir de los datos operacionales de la GEL de División Chuquicamata.

2.2 Específicos

- Identificar las variables que influyen en la variabilidad de la concentración de cobre en el PLS.
- Definir capacidades máximas y mínimas del sistema de transporte y almacenamiento de soluciones.
- Proponer un estándar de operación para el proceso de lixiviación.
- Construir un modelo simulador para predecir la concentración resultante de cobre en el PLS.



3. ANTECEDENTES

3.1 Lixiviación

Proceso hidrometalúrgico en que ocurre la disolución selectiva de uno o más metales (constituyentes de interés) de la mena a través de un sólido mediante una solución acuosa, para obtener una solución acuosa rica en el metal valioso y un residuo insoluble sin valor. Dicha disolución puede ser parcial o total, sin embargo el objetivo permanece siendo el mismo, la recuperación específica de especies metálicas valiosas contenidas en el sólido inicial.

La solución acuosa rica en el metal de interés corresponde a la solución de lixiviación preñada (PLS: pregnant leach solution), y el sólido (residuo) insoluble sin valor se denomina comúnmente como ripio de lixiviación, correspondiente al material remanente post lixiviación. El principio de este proceso se basa en la sensibilidad de los minerales oxidados ante la interacción con soluciones ácidas.

Ocasionalmente actúa un agente externo que interviene como oxidante o reductor y participa en la disolución del metal de interés mediante una variación del potencial de óxido-reducción o potencial redox de la solución lixivante.

Lixiviación con oxidación:

Los agentes oxidantes más empleados son Fe^{3+} y O_2 , empleándose para la lixiviación de sulfuros y algunos metales. Ejemplo:



Lixiviación con reducción:

Este tipo de lixiviación puede usarse con minerales que son más solubles en sus estados de valencia inferiores. Ejemplo:



En el caso del cobre se utiliza el ácido sulfúrico para la lixiviación de minerales oxidados, siendo más fácil disolver sulfatos como chalcantita y sulfatos básicos como antlerita y brochantita, luego los carbonatos (malaquita y azurita), la atacamita y la tenorita. La cuprita en cambio, necesita la presencia de un oxidante para disolverse completamente; los silicatos de cobre son los que tienen una cinética de lixiviación más lenta. La química asociada a los minerales sulfurados de cobre es más compleja que la de los óxidos, ya que se trata de reacciones de óxido-reducción, que requieren la presencia de agentes oxidantes para que la reacción ocurra, además estos sulfuros son insolubles

en ácido sulfúrico diluido. Sin embargo, la problemática más grave es la cinética o velocidad de reacción, que es extremadamente lenta.

Lixiviación en pilas

Es un método para tratar principalmente minerales oxidados y mixtos, que se realiza a través de la disposición del mineral aglomerado en pilas o montículos, donde se vierte lentamente una solución lixivante distribuida adecuadamente en su superficie a través del sistema de riego. Esta solución se infiltra en la pila hasta su base, donde se produce la extracción del cobre y otras impurezas del mineral. En la base de la pila, la solución es recogida por el sistema de drenaje y llevada fuera del sector de las pilas mediante el sistema de evacuación.

El carguío de las pilas generalmente se realiza sobre un material granular llamado cover, el cual es colocado sobre una geomembrana impermeable de HDPE (high density polyethylene) o LLDPE (linear low density polyethylene) que se encuentra ilustrada en la Figura 2, este cover actúa como material drenante, protege la geomembrana sobre la cual se suelen colocar tuberías que conforman el sistema de drenaje y recolección, formando una especie de filtro; cuyo espesor debe ser diseñado para evitar el punzonamiento generado por las partículas que están sobre ella, debido a la presión provocada por el peso propio de la pila, con el objetivo de evitar la infiltración de soluciones al suelo.



Figura 2. Representación de la carpeta de HDPE en lixiviación. (Vasov V., 2015)

A continuación, en la Figura 3, se observa un esquema que describe la conformación de la pila con un sistema filtrante o de drenaje a partir del riego. Este sistema se basa en una pendiente

del terreno sobre el cual está instalada la pila, en dicho terreno se crean surcos mediante una retroexcavadora, en estos surcos se colocan drenaflex, que corresponden a unas tuberías corrugadas con orificios. Dicho sistema forma una malla que permite capturar la solución de drenaje de la pila, y bajo la malla se encuentra una geomembrana que evita la contaminación del suelo producto de la solución drenada.

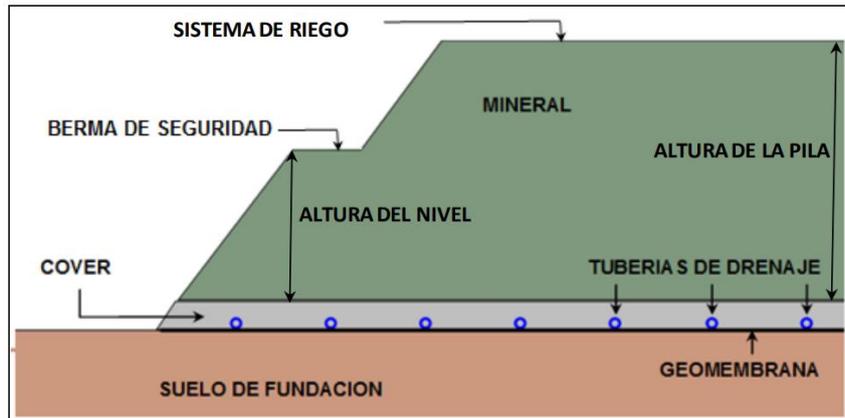


Figura 3. Esquema que describe el método de filtración en la pila. (López E., 2012)

Las pilas pueden ser dinámicas o también llamadas “ON-OFF”, cuando el mineral terminada la lixiviación, se envía a botaderos y la base de la pila puede ser reutilizada, es decir se cargan y descargan las pilas para cada lixiviación, o permanentes (estáticas) en las que las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores aprovechando la permeabilidad existente. El tiempo del proceso puede tomar varios meses, según el tipo de mineral a tratar, la ley de la especie de interés y el tamaño de las partículas a lixiviar. Se han llegado a obtener extracciones del 70 al 85% por el sistema mencionado.

Existen variables que condicionan este tipo de lixiviación y son las siguientes:

- Altura del lecho, está determinada por la permeabilidad del producto después del curado y por la velocidad en que se disuelve el metal de interés. Según esto, siempre es posible encontrar un óptimo de concentración de ácido inicial y flujo alimentado para una altura dada, pero en realidad la altura tiene restricciones de carácter práctico y de inversión. Si se aumenta la altura, dejando constante las demás variables de operación, el líquido que desliza tiene un mayor tiempo de residencia dentro de la pila, por lo que tendrá mayor concentración de cobre instantánea en la solución efluente; sin embargo, en contraposición a esto, aumentan las canalizaciones y compactaciones que restan eficiencia al proceso. Además, al trabajar con alturas más grandes existe mayor posibilidad de disolver la ganga, repercutiendo en un mayor consumo de reactivo.

- Flujo específico, es la velocidad a que se desplaza la solución lixivante, a través, de un lecho poroso. Se expresa en litros por unidad de tiempo y unidad de área transversal de la pila. El flujo específico depende de las cualidades físico-químicas del lecho aglomerado y está ligado con la concentración de ácido sulfúrico en la alimentación. Cuando el flujo aumenta, disminuye el tiempo de residencia en el reactor y el líquido deslizante tiene menor contacto con los aglomerados. Cuando el flujo disminuye, aumenta el tiempo de residencia en el reactor y el líquido deslizante tiene mayor tiempo de contacto con el sólido. Su influencia es notoria en los primeros días de lixiviación.

- Concentración y dosificación de ácido sulfúrico, la concentración de ácido sulfúrico es el que otorga la capacidad de carga a la solución lixivante. En efecto, a mayor concentración de ácido sulfúrico, disminuye el pH y aumenta la disolución del sulfato de cobre y se sulfata el cobre remanente. Este ácido inyectado en la alimentación se va consumiendo en el recorrido a través del reactor, éste consumo de ácido se debe a reacciones químicas tanto con la ganga como con restos de cobre que no reaccionaron en la etapa de curado, provocando un aumento del pH, que a su vez puede provocar la precipitación de sales. La dosificación de ácido en esta etapa queda determinada por la combinación óptima del flujo y la concentración alimentada.

- Tiempo de lixiviación, queda determinado por la extracción que se desea alcanzar y la cinética de reacción, donde se observa en la tabla 8 del anexo A que los primeros efluentes de solución posterior al riego se encuentran con una alta concentración de cobre; y con el transcurso del tiempo ésta va disminuyendo.

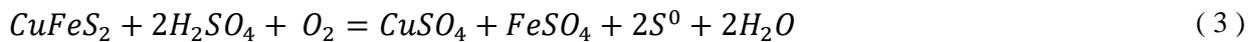
A partir de la década de los ochenta se incorporaron procesos de aglomeración y curado con la finalidad de mejorar las cualidades físicas del lecho poroso y producir la sulfatación del cobre previa a la lixiviación.

Lixiviación en botaderos

Consiste en lixiviar desmontes o sobrecarga de minas de tajo abierto, en ocasiones junto a minerales lixiviados previamente, los que debido a sus bajas leyes generalmente menor a la ley de corte económica no pueden tratarse por métodos convencionales. Estos materiales se han ido acumulando a través de los años a un ritmo que en algunos casos pueden ser de varios cientos de miles de toneladas al día. La mayoría de los botaderos se construyen en áreas adecuadas cerca de la mina.

La mayoría de los sulfuros de baja ley son tratados por este método, y son insolubles a la disolución con ácido sulfúrico, por lo tanto, requieren la presencia de un agente reductor para

oxidar el azufre del estado S^{-2} a azufre elemental S^0 o estados de oxidación superiores como el sulfato, por ejemplo, para el caso de lixiviación de calcopirita con ácido sulfúrico:



Donde se requiere oxígeno para oxidar el azufre, otro oxidante utilizado a gran escala es el ion férrico (Fe^{+3}), donde la reacción en condiciones ambientales es extremadamente lenta, por lo que precisa de largos períodos de tiempo para completarse, al igual que la disolución de la mayoría de los sulfuros.

Este tipo de procesos no requiere inversión en mina ni tiene costos asociados a transporte, lo que los hace ser proyectos atractivos del punto de vista económico. En el caso del cobre las recuperaciones fluctúan entre 40 a 60% en alrededor de 3 años de operación, este método de lixiviación se puede apreciar en la Figura 4.

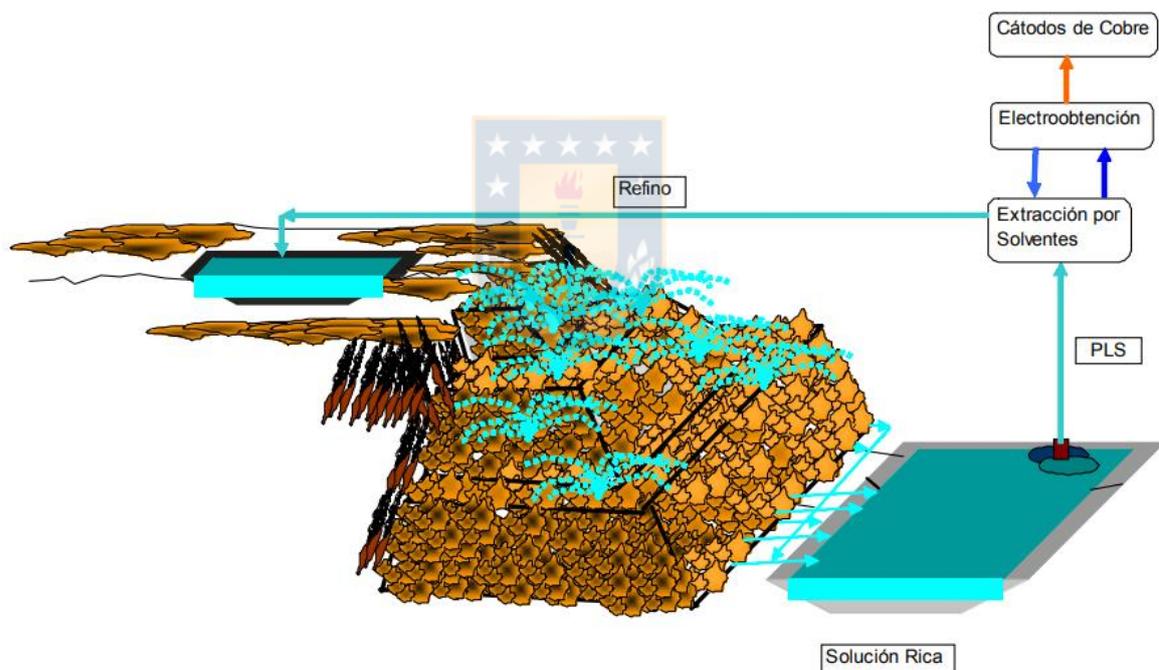


Figura 4. Esquema representativo de la lixiviación en botaderos. (Ortega F., 2019)

3.2 Aglomeración

Consiste en la adhesión de partículas finas ya sea entre ellas o con partículas gruesas, mediante la adición de agua y ácido sulfúrico concentrado formando glómeros de calidad mecánica aceptable, evitando la migración de partículas finas desde las gruesas, para obtener un lecho de mineral homogéneo y permeable, lo que es fundamental para el proceso de lixiviación en pila, donde la solución irrigada debe percolar por todas las partículas de mineral.

Para el proceso de aglomeración de minerales con alto contenido de finos, se utilizan tambores rotatorios, los que consisten en unidades cilíndricas con un largo de alrededor de 2.5 a 3.5 veces su diámetro. Estos tambores giran a baja velocidad, entre 5 a 10 rpm, y están montados de tal manera de tener una inclinación que no supera los 8°. El tiempo de residencia del mineral en el tambor es de alrededor de un minuto, lo que se considera adecuado para lograr una buena mezcla del mineral con el agua y el ácido sulfúrico.

Este proceso pasó a constituir una operación unitaria de gran importancia en la lixiviación en pilas, ya que como tratamiento previo a la lixiviación en lecho irrigado tiene los siguientes objetivos:

- Facilitar el tratamiento por lixiviación, con los propósitos de disminuir los costos de inversión y operación del proceso extractivo.
- Uniformar el tamaño de partículas, ligando los finos a los gruesos, evitando el comportamiento indeseable de un amplio rango de distribución de tamaños.
- Optimizar la permeabilidad de un lecho y la consiguiente operación de lixiviación mediante la aglomeración.
- Homogeneizar la porosidad de un lecho de partículas e incrementarla.
- Permite homogeneizar el mineral en el lecho de la pila, ayudando a evitar el desarrollo de flujos preferenciales. Esto ocurre debido a que las partículas tienen un tamaño más uniforme, disminuyendo la segregación. Pese a lo anterior, la literatura muestra que en las pilas de mineral aglomerado se produce segregación de todos modos.
- Comienza la sulfatación del cobre, aumentando la velocidad de lixiviación.
- Mejora las condiciones de flujo dentro de la pila, ya que la aglomeración contribuye en contener los finos dentro de los glómeros, ayudando a evitar que éstos afecten el drenaje de la pila.
- Humectar el mineral antes de depositarlo en la pila, de tal manera de evitar la disminución de permeabilidad que podría producirse debido a posibles expansiones de las arcillas presentes en el mineral.

Para la cantidad de agua y ácido sulfúrico adicionado en la aglomeración es necesario considerar:

- Siempre al reaccionar el mineral y el ácido, se producen gases producto de la reacción del mineral con él, y producto de la mezcla de agua y ácido sulfúrico concentrado. Estos gases,

por disposiciones y regulaciones ambientales, deben ser extraídos y alejados de las condiciones de trabajo. Además estos gases tienen un efecto importante en la permeabilidad del mineral dispuesto en la pila.

- Un exceso de agua produce glómeros muy plásticos y muy poco estables que se destruyen, y que al cargarlos en una pila se deforman y producen una compactación del mineral antes de iniciar el riego, afectando el drenaje de la pila. Por otra parte, una falta de agua produce glómeros muy débiles (baja resistencia mecánica) y esponjosos, lo que hace que al llegar a las pilas, el mineral quede con una muy baja densidad y que al regar la pila se produzca una gran compactación que puede provocar canalizaciones durante el proceso de lixiviación. Cabe notar que la cantidad de agua a utilizar en el aglomerado se obtiene a partir de pruebas metalúrgicas, y que algunas mineras hoy están optando por reemplazar el agua por refino, ya que se logran ventajas desde el punto de vista metalúrgico.
- La cantidad de ácido requerida en esta etapa depende directamente de la caracterización química del mineral, sobre todo del consumo de la ganga, materia que reacciona y consume ácido, y entrega impurezas al sistema. No se puede agregar más ácido en esta etapa que el consumido por la ganga en la planta industrial. Por el contrario, siempre es bueno agregar algo menos y adicionar el resto en las soluciones de lixiviación para mantener los equilibrios.
- El ácido sulfúrico agregado en el proceso de aglomeración cumple la función de comenzar a solubilizar el cobre soluble en ácido. Además, produce la inhibición de la formación de la sílice coloidal, de tal manera de minimizar la sílice que pasa a las soluciones de lixiviación en el equilibrio, y que si es sílice coloidal, trae problemas serios en la etapa de extracción por solventes debido a una formación mayor de borra. En general, la sulfatación del cobre que se obtiene en esta etapa es dependiente, principalmente, de la granulometría y de la cantidad de ácido agregado, con una adecuada dosificación de agua.

En la Figura 5 se aprecia la imagen de un típico tambor aglomerador, con su forma cilíndrica, la que le permite girar a una cierta velocidad.



Figura 5. Representación característica de un tambor aglomerador. (ERAL-CHILE, S.A)

3.3 Cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación es de suma importancia para determinar la velocidad con que ocurrirán las posibles reacciones, y con ello involucra los factores que afectan la velocidad de reacción, esta última corresponde a la velocidad con que ocurre el cambio de componentes.

La cinética también se diferencia entre el tipo de reacción química, donde puede ser homogénea donde las especies participantes se encuentran en una sola fase, y heterogénea en que las especies participantes se encuentran en distintas fases, generalmente esta última es más compleja que la reacción homogénea.

Para representar la velocidad de una reacción se requiere seleccionar un componente “i” de la reacción y definir la velocidad en términos de este componente. Para una reacción homogénea la velocidad de cambio del componente “i” se puede expresar por dn/dt (moles de componente “i” reaccionado por unidad de tiempo), y la expresión cinética está definida como moles del componente “i” consumido o generado por unidad de volumen V, por unidad de tiempo.

$$r_i = \frac{dn_i}{V dt} \quad (4)$$

Para el caso en que la reacción fuese heterogénea, la que solo se produce en la interfase de reacción, la velocidad se expresa como moles de componente “i” consumidos o generados por unidad de área de la interfase, S, por unidad de tiempo.

$$r_i = \frac{dn_i}{S dt} \quad (5)$$

Donde en caso que el componente “i” sea un producto de la reacción, la velocidad r_i será positiva, y si el componente “i” es un reactivo de la reacción, la velocidad r_i será negativa.

Para los ripios que se procesan en la GEL el tipo de reacción química que ocurre corresponde a la heterogénea, ya que interactúan diferentes fases, como la líquida y la sólida para lo cual se considera una reacción como la siguiente:



Donde se produce un producto sólido D sobre la superficie del reactivo sólido A.

En general el proceso de reacción heterogénea puede involucrar las tres siguientes etapas individuales:

1. Transferencia de masa de reactivos y productos entre el seno de la solución y la superficie externa de la partícula sólida.

Para el caso de la partícula esférica no porosa que reacciona isotrópicamente, sin dejar productos sólidos según la siguiente reacción:



Si la difusión del reactivo B hacia la superficie del sólido es a través de una capa límite de espesor δ , la transferencia de masa es la etapa que controla el proceso, la cual se ilustra en la Figura 6.

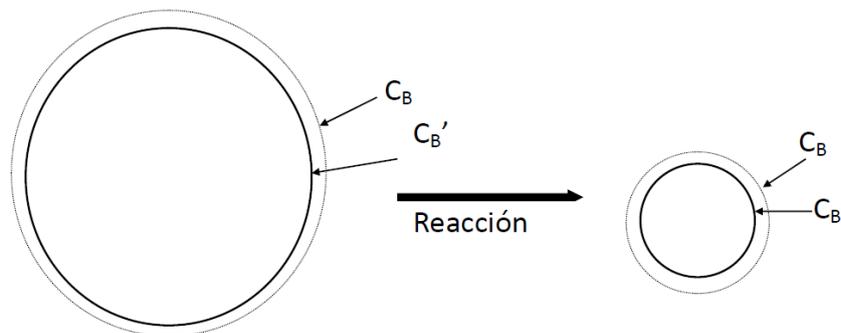


Figura 6. Partícula esférica reaccionando con control por transferencia de masa. (Ruiz C., 2013)

La velocidad de reacción puede expresarse por la ecuación:

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{-4\pi D}{\sigma} \frac{dC_B}{dr} = \frac{-4\pi r^2 (C_B - C'_B)}{\sigma \delta} \quad (8)$$

Donde n_A es el número de moles de A que quedan en la partícula al tiempo de reacción t , C_B es la concentración de B en el seno de la solución, C'_B es la concentración de B en la interfase

sólido-líquido, σ es la razón estequiométrica b/a y δ es el espesor de la capa límite de difusión. En general $C'_B \approx 0$ y con ello la ecuación anterior se reduce a:

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{-4\pi D}{\sigma} \frac{dC_B}{dr} \quad (9)$$

Si F_i corresponde a la fracción de sólido que no ha reaccionado se tiene:

$$F_i = \left(\frac{r}{r_o}\right)^3 \quad (10)$$

Entonces, la fracción de sólido que ha reaccionado, α , corresponde a $1 - F_i$, por ende se representa con la ecuación:

$$\alpha = 1 - \frac{r^3}{r_o^3} \quad (11)$$

Al diferenciar la expresión anterior se tiene:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{3r^2}{r_o^3} \frac{dr}{dt} \quad (12)$$

La cual en términos de α queda representada de la siguiente manera:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{3(1-\alpha)^2}{r_o} \frac{dr}{dt} \quad (13)$$

El número de moles, n_A , en la esfera de radio r es:

$$n_A = \frac{4\pi r^3}{3V_A} \quad (14)$$

Donde V_A es el volumen molar (volumen ocupado por un mol del sólido).

Al diferenciar la expresión anterior con respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{4\pi r^2}{V_A} \frac{dr}{dt} \quad (15)$$

Al igualar la ecuación anterior con la ecuación (8) se tiene:

$$\frac{4\pi r^2}{V_A} \frac{dr}{dt} = \frac{-4\pi r^2 DC_B}{\sigma \delta} \quad (16)$$

Entonces de forma simplificada queda expresa por:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{-V_A DC_B}{\sigma \delta} = -k_l C_B = -R_l \quad (17)$$

Donde k_l es la constante específica de velocidad lineal. Notemos que el valor de esta constante específica es igual que el obtenido para el caso de área de reacción constante, es decir,

k_l es independiente de la geometría de la partícula sólida, por lo tanto la velocidad de avance de la interfase de reacción también será la misma independientemente de la geometría de las partículas.

Al reemplazar la ecuación (13) en la ecuación anterior se tiene:

$$\frac{d\alpha}{dt} = - \frac{3V_A D C_B (1 - \alpha)^{\frac{2}{3}} dr}{\sigma \delta r_0 dt} = \frac{3k_l C_B (1 - \alpha)^{2/3}}{r_0} \quad (18)$$

Al suponer que C_B se mantiene constante en el transcurso de la reacción y al integrarse entre 0 y t se obtiene:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = \frac{V_A D C_B}{\sigma \delta r_0} t = \frac{k_l C_B}{r_0} t = kt \quad (19)$$

2. Difusión de reactivos y productos a través de un producto de reacción poroso o residuo de reacción cuyo espesor aumenta con el avance de la reacción.

Si se considera la reacción de una partícula esférica densa, cuando el control de la reacción es la difusión de reactivos a través de un producto o residuo sólido poroso. Se considera la siguiente ecuación general:



Se considera también que el producto formado ocupa el mismo volumen que la fracción de sólido que ha reaccionado. En procesos de lixiviación, esto normalmente significa que la porosidad en el producto compensa la masa neta removida durante la lixiviación, y el centro de reacción continúa moviéndose hacia el interior de la partícula manteniendo aproximadamente la misma forma de la partícula original. Esto es aplicable en muchos casos a la lixiviación de menas oxidadas y sulfuradas como también a la reacción de algunas partículas minerales puros. El resultado neto es un núcleo recesivo de sólido no reaccionado con una capa de material poroso alrededor como se aprecia en la Figura 7.

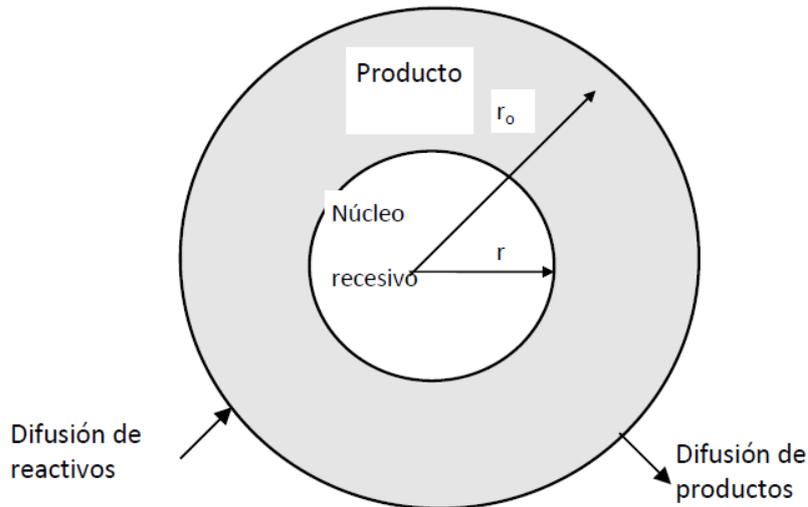


Figura 7. Partícula esférica reaccionando con control por difusión a través de una capa de producto poroso. (Ruiz C., 2013)

El radio original de la partícula es r_0 y el radio del núcleo sin reaccionar es r . La expresión cinética en este caso es:

$$\frac{dn_A}{dt} = -\frac{4\pi r^2 D_E dC_B}{\sigma dr} \quad (21)$$

La cual se puede integrar al suponer que la velocidad de movimiento del núcleo recesivo es mucho más lenta que la velocidad de difusión del reactivo y, por lo tanto, se puede considerar que el núcleo es estacionario para los efectos del gradiente de concentración de la especie en difusión (quasi steady-state condition), lo cual queda expresado a continuación:

$$dn_A \int_{r_0}^r \frac{dr}{r^2} = -\frac{4D_E}{\sigma} \int_{C_B}^{C'_{BS}} dC_B \quad (22)$$

Al desarrollar la ecuación anterior se tiene:

$$\frac{dn_A}{dt} \left(\frac{r_0 - r}{r r_0} \right) = -\frac{4\pi D_E (C_B - C'_{BS})}{\sigma} \quad (23)$$

Si se considera que $C'_{BS} \approx 0$ se tiene:

$$\frac{dn_A}{dt} = -\frac{4\pi D_E C_B r r_0}{\sigma (r_0 - r)} \quad (24)$$

Al reemplazar la expresión anterior en la ecuación (15) se tiene:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{V_A D_E C_B r_0}{\sigma r (r_0 - r)} \quad (25)$$

Luego, en función de la constante cinética específica de velocidad parabólica que corresponde:

$$k_p = \frac{V_A D_E}{\sigma} \quad (26)$$

La que también se puede escribir como:

$$\frac{r(r_0 - r)}{r_0} \frac{dr}{dt} = -k_p C_B \quad (27)$$

Si se combina la ecuación anterior con las ecuaciones (11) y (12) se tiene:

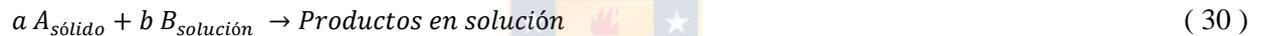
$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3k_p C_B}{\sigma r_0^2} \frac{(1 - \alpha)^{1/3}}{1 - (1 - \alpha)^{1/3}} = \frac{3k_p C_B}{r_0^2} \frac{(1 - \alpha)^{1/3}}{1 - (1 - \alpha)^{1/3}} \quad (28)$$

En caso que la concentración C_B se mantenga constante, al integrar la expresión anterior se tiene:

$$1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = \frac{2V_A D_E C_B}{\sigma r_0^2} t = \frac{2k_p C_B}{r_0^2} t \quad (29)$$

3. Reacción química entre el o los reactivos en solución y el sólido en la superficie de la reacción o interfase reaccional.

Si se considera la siguiente reacción general:



Se puede apreciar una ilustración en la Figura 8 para el caso de control químico con reacción de primer orden.

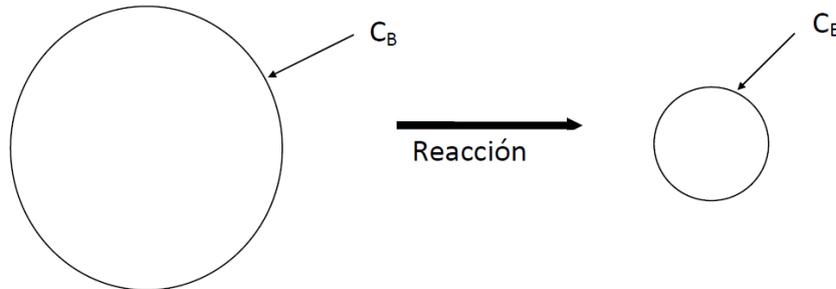


Figura 8. Partícula esférica reaccionando con control químico. (Ruiz C., 2013)

La velocidad de la reacción en la superficie de una esfera de radio r se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dn_A}{dt} = -4\pi r^2 k_0 C_S \quad (31)$$

El número total de moles n_A en la esfera de radio r está dado por la ecuación (14) y al derivar la expresión anterior con respecto al tiempo se obtiene la ecuación (15), luego al reemplazar la expresión dn_A/dt de la ecuación anterior en la ecuación (15) se tiene:

$$\frac{dr}{dt} = -V_A k_0 C_B = k_l C_B = -R_l \quad (32)$$

Donde k_l es la constante específica de velocidad lineal que para el caso de control químico queda definida por $k_l = V_A k'_0$ ($\text{cm}^4 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$) y R_l (cm/s) es la velocidad de avance de la interfase de reacción.

En función de la fracción reaccionada se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{3k_l C_B}{r_0} (1 - \alpha)^{2/3} \quad (33)$$

En caso que la concentración sea constante se puede integrar la ecuación anterior y se obtiene:

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = \frac{k_l C_B}{r_0} t = kt \quad (34)$$

Donde $k = k_l C_B / r_0$.

Existe otro mecanismo que también puede controlar la transformación y es la transferencia de calor desde o hacia el volumen o interfase reaccional, sin embargo este tipo de control es significativo solo en reacciones a alta temperatura, generalmente sobre los 800-1000°C. Como en la lixiviación de ripios de la GEL no se trabaja a altas temperaturas no se detalla el funcionamiento de este último mecanismo.

3.4 Mineralogía

La mineralogía es la ciencia que estudia las condiciones de formación de los minerales, las diferencias que existen entre ellos, y posibles modificaciones para cambiar sus propiedades.

El mineral que se procesa en la GEL corresponde a una mezcla de ripios previamente lixiviados con la técnica de lixiviación en bateas, esta mezcla está compuesta por ripios verdes y rojos en proporción 70/30, estos últimos son los ricos en cobre con una ley de 0.35%; sin embargo, a la vez son los que poseen una alta humedad de 12%, para ello se realiza la mezcla con los ripios rojos, con el objetivo de disminuir el porcentaje de humedad de la mezcla.

El mineral corresponde mayoritariamente a óxidos mixtos, óxidos de cobres negros, que son compuestos y mineraloides de composición variable, difíciles de reconocer, además poseen una cinética de disolución lenta en procesos tradicionales de lixiviación, asociaciones polimetálicas refractarias al ácido sulfúrico, de colores oscuros y con una compleja mineralogía. En general este

mineral se encuentra en yacimientos del tipo exótico, que cuenta con presencia elevada de cobre, hierro y manganeso, el cual se ve representado en la Figura 9.

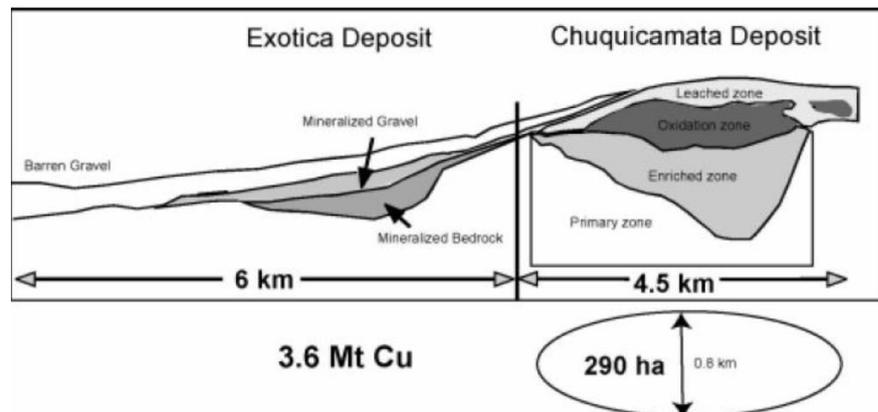


Figura 9. Depósito de mineralización exótica. (Maksaev V., 2007)

3.5 Extracción por solvente

Proceso de purificación de soluciones a través del cual se extrae selectivamente el ion metálico de interés mediante un reactivo específico para él, que lo concentra y purifica dejándolo apto para las etapas posteriores, mientras que los demás iones metálicos presentes permanecen en solución acuosa.

Los objetivos del proceso de extracción por solvente pueden ser:

1. Separar un metal o metales de otros contaminantes. Esto se puede lograr extrayendo el metal deseado desde la solución de modo que las impurezas permanecen en ésta, o en ocasiones extrayendo la impureza y dejando el o los metales de interés en la solución.
2. Concentrar los metales de interés en una solución acuosa de modo de reducir los costos del proceso siguiente de recuperación del metal.
3. Convertir el metal a una forma que simplifique su recuperación. Por ejemplo, traspaso de medio básico a medio ácido, y/o traspaso del metal de un medio complejante como el medio cloruro o amoniacal a medio sulfato.

Este método utiliza una fase orgánica que actúa como medio de intercambio para efectuar la separación efectiva de un componente dado, y se lleva a cabo en 2 etapas:

Extracción

Consiste en el contacto de la solución acuosa que contiene varios metales con una fase orgánica inmiscible que contiene un reactivo orgánico capaz de combinarse con el ion metálico de interés.

El proceso se realiza en un estanque mezclador, mediante la dispersión de una fase en la otra fase a la forma de pequeñas gotas, mediante agitación mecánica, seguido de la separación de las dos fases por gravedad en un estanque de decantación. Etapa en que se produce la transferencia de una especie metálica desde la fase acuosa a la fase orgánica. Como producto de esta etapa se producen una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una fase acuosa residual con baja concentración del metal extraído denominada refino.

Se puede describir de forma simplificada a través de la siguiente reacción:



Esta es una reacción reversible, donde M representa el ion metálico de interés en fase acuosa, \bar{E} es el reactivo orgánico y \overline{ME} es el complejo formado entre el reactivo orgánico y el ion metálico (las especies en la fase orgánica se representan usando una barra en la parte superior). En esta etapa, el proceso requiere que el equilibrio de la reacción anterior esté desplazado hacia la derecha.

Re-extracción

Donde la fase orgánica que ahora contiene el metal de interés se contacta nuevamente por dispersión de un mezclador, con una nueva fase acuosa de distintas propiedades a la primera para transferir el ión metálico de la fase orgánica a la nueva solución acuosa, este proceso es inverso a la extracción, donde una vez separada la dispersión del estanque de decantación, se obtiene una solución acuosa pura y concentrada del metal de interés y un orgánico descargado. Por lo tanto, este método sirve para recuperar la especie metálica extraída y para regenerar el reactivo orgánico dejándolo apto para una nueva extracción.



En esta etapa, el proceso requiere que el equilibrio de la reacción anterior esté desplazado hacia la izquierda, y una vez separada la dispersión en un estanque de decantación, se obtiene una solución acuosa pura y concentrada del metal de interés y un orgánico descargado. Por lo tanto se aprecia claramente que es una reacción reversible, y se puede representar así:



En algunos casos, la extracción del metal de interés no es completamente selectiva y hay otras especies que son co-extraídas o son arrastradas mecánicamente en la fase orgánica durante la etapa de extracción (en pequeñas gotas de fase acuosa que no sedimentaron). Cuando los arrastres mecánicos de impurezas son de gran magnitud, puede ser necesario agregar una etapa intermedia de lavado de la fase orgánica con una fase acuosa apropiada, para descargar las impurezas contaminantes, antes de realizar la re-extracción del metal de interés.

La Figura 10 corresponde a una ilustración de los 3 procesos fundamentales de la hidrometalurgia del cobre (lixiviación, extracción por solvente y electroobtención), donde se aprecia su relación directa y consecutiva en ese mismo orden, por lo que una correcta operación del proceso lixiviación se relaciona directamente con la extracción por solvente e indirectamente con la electrodeposición, por lo que estas últimas se ven perjudicadas en caso de existir una dificultad que afecte la calidad de la solución de lixiviación rica en cobre (PLS), y por último se obtendrá una menor calidad catódica.

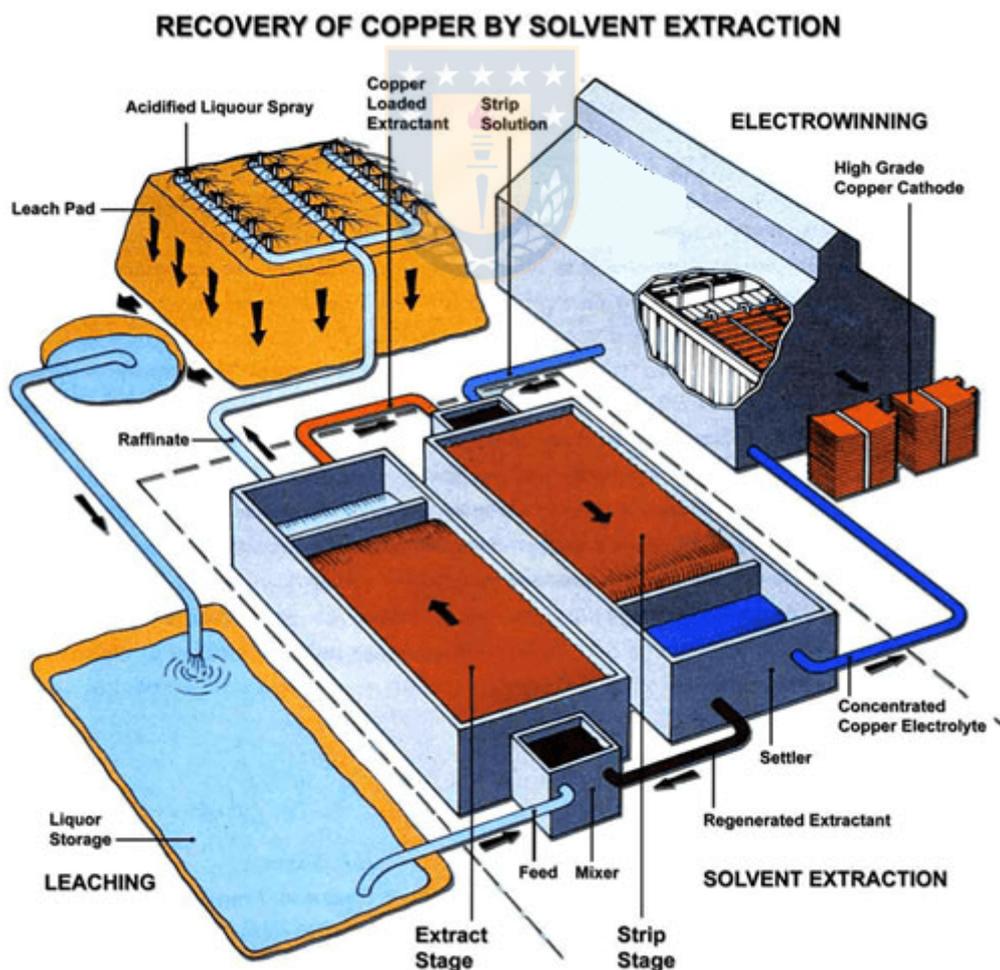


Figura 10. Esquema característico para recuperar cobre por medio de lixiviación-extracción por solvente-electroobtención. (Michaud D., 2015)

Una representación más sencilla y esquemática se expresa mediante el diagrama de la Figura 11, en que comienza con el ingreso de ácido sulfúrico y refino en el proceso de lixiviación, y se obtiene una solución rica en cobre que se incorpora junto con la fase orgánica al proceso de extracción que a su vez produce refino para la etapa anterior, y orgánico cargado (rico en cobre o extracto) que pasa al ciclo de re-extracción, al cual también entra electrolito agotado denominado spent, cuyo producto es electrolito rico en cobre o de avance, que se dirige finalmente a la electrowinning para obtener cátodos de cobre mediante la aplicación de corriente.

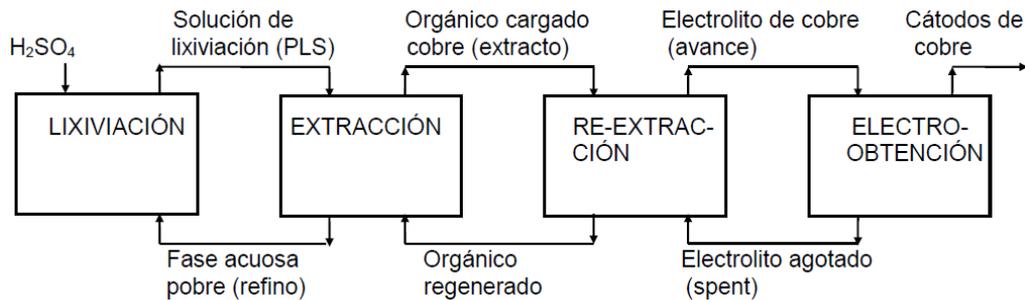


Figura 11. Diagrama secuencial de la lixiviación-extracción por solvente-electroobtención. (Ruiz C., 2013)



4. DESARROLLO

4.1 Metodología utilizada

El alcance que se establece en el presente estudio corresponde al área de lixiviación de la planta de tratamiento de minerales en pilas, con un volumen circulante de soluciones de 2450 m³/h, donde el sector se subdivide en el área 200 (correspondiente al proceso de aglomeración), área 700 que contempla el manejo de soluciones donde las principales son PLS, PDS y refino, y las secundarias con ácido sulfúrico y agua, área 705 (estación de reimpulsión de bombas booster), y área 800 (contención de las soluciones para el riego).

Para el presente estudio se utilizó un programa computacional denominado PI ProcessBook que permite obtener datos medidos con equipos en terreno, como flujómetros, válvulas Bermad, bombas verticales, entre otros. Además, se emplea el complemento de PI ProcessBook para Microsoft Excel con el objetivo de obtener la información necesaria en cada caso.

En primer lugar, se visitó la planta de tratamiento de minerales en pilas, donde se realizaron diferentes inducciones teóricas y prácticas, a la vez se recopiló información referente al proceso de lixiviación y sus principales características, como el rango de capacidades del sistema de transporte y almacenamiento de soluciones.

Luego, se efectuó un diagrama esquemático del manejo de soluciones, además se realizó un balance volumétrico con los caudales reales que se transportan en la PTMP, donde se recopiló información del software computacional PI ProcessBook.

A continuación, se implementaron mejoras al diagrama de flujos, donde se incorporaron recientes instalaciones de líneas, este diagrama se plasmó de forma manual, en Excel, en PI ProcessBook y finalmente en Power Point.

Posteriormente se realizó un catastro de todos los parámetros influyentes (determinantes) para el proceso de lixiviación, los cuales se obtuvieron a través de la observación en terreno del área abarcada y también mediante la teoría de lixiviación en pilas aplicada a ripios de mineral. Con ello se realizó un diagnóstico de las problemáticas primordiales que padece la planta en el área estudiada.

Después, se realizó un filtro de los datos que no arrojaban información fidedigna, por ende, se descartaron dado que se debían principalmente a fallas en los equipos de medición, intervenciones de mantenimiento de los equipos, contingencias por situaciones inesperadas, entre

otras, todas las cuales perjudican sustancialmente el rendimiento del proceso, pues implican la detención momentánea de la planta.

Finalmente se trabajó con el programa computacional llamado “Design Expert” al cual se le ingresan datos históricos de una cierta cantidad de variables, donde sugiere el tipo de modelo que mejor se ajusta de acuerdo a los antecedentes recabados, este software además escoge las variables que tienen mayor efecto en la respuesta, que para este caso corresponde a la concentración de cobre en el PLS, desechando los parámetros que no son significativos para este estudio. Luego, con los indicadores más importantes genera una sencilla ecuación lineal, donde se tiene una constante independiente y varias dependientes de dichas variables escogidas anteriormente, para finalmente calcular la concentración de cobre en el PLS para un instante determinado. De igual manera se desfazan los parámetros considerados en el tiempo para obtener una proyección de la concentración de cobre en el PLS.

Parámetros a evaluar

- Tasa de curado
- Dosificación de agua
- Humedad
- Altura del ripio
- Ley
- Masa
- Tiempo del primer efluente
- Concentraciones del primer efluente
- Razón de lixiviación
- Soluciones de riego: PDS y refino
- Granulometría
 - +3/4”
 - +1/2”
 - +1/4”
 - +10#
 - +50#
 - +100#
 - +200#
 - -200#
- Ciclo de lixiviación



- Ramp up (6x18, 9x15, 15x9), donde las primeras son horas de riego y las siguientes horas de reposo.
- Continuo
- ON/OFF

4.2 Manejo de soluciones

Dentro del sistema de bombas que se encuentra instalado se debe considerar que en el sector de reimpulsión (booster), se cuenta con 5 bombas de las cuales comúnmente 3 de ellas se encuentran operativas y las otras 2 en stand-by, donde es primordial saber que las 4 bombas que impulsan la línea 1 de PLS hacia la SX, se encuentran ubicadas en serie, lo que indica que el operador que debe abrir las válvulas debe tener la precaución y conocimiento que la primera de ellas debe tener una mayor abertura, e ir disminuyendo esta hacia la cuarta, este tipo de disposición conlleva una mayor pérdida de carga en el sistema, en comparación con una distribución en paralelo, a su vez la bomba que impulsa el PLS por la línea 2 hacia SX se encuentra en paralelo con respecto a las 4 anteriores, esto también se debe conocer por parte del operador para evitar que ocurra la generación de vacío que dañe la cañería.

Un alcance importante es considerar la forma en que se deben realizar las aberturas de las válvulas instaladas, ya que existen distintos tipos de válvulas, ya sean manuales o automáticas, donde estas últimas son controladas, también existen válvulas check o antiretorno, las cuales no permiten la posibilidad de realizar un despiche, debido a que frena la solución involucrada con una especie de globo, con el cual también se generan pérdidas de carga.

Para evitar que se produzcan el efecto manguera y se produzca la generación de vacío en las cañerías de la planta se hace necesario contar con más puntos de venteo, en que se escape el gas producido en el interior de las líneas, tal como se tiene en la estación booster, dado que es un problema bastante frecuente, que acarrea adicionalmente una serie de consecuencias posibles de evitar, dado que es un riesgo contar con ese gas intermedio entre la solución, pues ocurren despiches indeseados, fugas de solución por la presión interna, desacoples en el sistema de transporte de soluciones, cargas y descargas de solución sin control, entre otros.

Es necesario mencionar que la posición en donde están instalados los tubos magnéticos es muy significativa y, en este caso, se ubican en la parte inferior de cada módulo. En cuanto al variador de frecuencia, que se regula por el personal de terreno, se ajusta predeterminadamente a 45m³/h; sin embargo, este posee una alta variabilidad y, generalmente, a los pocos minutos de haber realizado el ajuste cambia la medición del caudal a un valor igual o inferior a 40m³/h. Por

ende, se hace primordial tener un control preciso, sin necesidad de tener una persona para verificar a cada instante esas variaciones, porque obviamente no es práctico ni efectivo.

En las cañerías por donde fluye solución se tienen intersecciones donde se realiza la unión de dos tuberías, y es precisamente en ese lugar donde ocurren más desacoples, debido a que en ese lugar se ubica un collar con pernos para la asociación de dichas líneas, sin embargo debido a la fuerza y presión con que viene la solución esa parte se desmonta y provoca la causa principal de fugas, por lo tanto se hace estrictamente necesario verificar la correcta ejecución para montar el collar, evaluando la goma de empaque pues esta se desgasta con el tiempo, acidez de la solución, fricción de los sólidos que circulan junto al líquido, y por ende se hace necesario saber la presión en cada sector para con ello evaluar si se requiere un soporte tras el collar, con el objetivo de aguantar la presión con la que se realiza el traspaso de cañería.

Se hace primordial realizar un estudio acabado respecto a la adición de ácido sulfúrico, pues lo realizan de manera inexacta, prácticamente por método del tanteo, y junto con ello evaluar la manera de evitar la pérdida de este compuesto que es fundamental para el proceso de lixiviación, podría ser a través de mezcladores electrostáticos eficientes, además hoy en día la contención de este se encuentra poco regulada, debido a que los 3 tanques de ácido están en mal estado, se pierde capacidad en el traslado de los camiones abastecedores, donde generalmente se utilizan 2 de 3 camiones y 1 se pierde por completo, entonces con el objetivo de no quedar sin stock de ácido se debe realizar una estrategia estandarizada para resguardar y proteger esta sustancia, que es sumamente corrosiva y peligrosa para el ser humano, por ende la precaución debiera ser primordial para evitar futuros incidentes y accidentes dentro de la planta.

También se hace necesario mencionar que in situ se han realizado distintas modificaciones de tuberías sin el estudio de las condiciones y necesidades, esto debido a que en general surgen emergencias que deben ser abordadas lo antes posible y por lo tanto se abordan de la forma más rápida pensando en la solución inmediata para no detener por más tiempo el sistema de circulación fluido dinámica, sin embargo con ello no se realizó registro técnico de codos, diámetros, intersecciones, presión, solución, material con que se ejecutaron dichas modificaciones, entonces después se requiere un análisis de las pérdidas de carga, de la capacidad de porteo de las líneas y es imposible que circule el caudal para el cual estuvo programada la cañería, dado que con las nuevas condiciones no se pensó previamente y se fue reactivo al problema, sin pensar en el futuro, por ende al fin y al cabo generó nuevos conflictos y perjudicó claramente el funcionamiento normal de la planta, teniendo un ciclo continuo de falencias imposibles de abordar a la vez, y teniendo que priorizar por las más críticas a resolver y dejando de lado las demás.

Es necesario mencionar que las cantidad de módulos que se encuentran aportando solución de forma continua son 70, y cómo se construye un módulo en un día se estipula que durante 70 días se está aportando solución al PLS, mientras que los demás módulos se encuentran en otras etapas como construcción, lavado, desarme, o reposo, además los 3 primeros días desde que comienza a salir la solución de un módulo no se tiene un flujo constante de solución, pues va saliendo un caudal intermitente y menor al que se le ingresa, por ende se establece que al tercer día ya se cumple que el flujo que ingresa es igual al que sale ($40\text{m}^3/\text{h}$).

Existen entre 5 y 10 drenaflex por módulo, los drenaflex están instalados cada 4 metros; sin embargo, se cree necesario considerar una menor distancia debido a que la malla, o red de riego abarca menos área entre más separados se encuentren. No obstante, también corresponde realizar un estudio más acabado para obtener un mejor comportamiento del lecho filtrante en la pila, de hecho, mientras más drenaflex, más rápido se produciría el drenaje de la pila, y sería más corto el ciclo de lixiviación. Además, con ello se obtendría un volumen de solución lixiviada más rápidamente, pero disminuiría la concentración de cobre de dicha solución, pues para aumentar esta concentración el riego en sistema continuo debiera realizarse en una mayor cantidad de días.

4.3 Problemas Identificados

Dentro de las dificultades que se tienen actualmente en la planta está el desconocimiento detallado del sistema de transporte de soluciones, a pesar que se cuenta con un sistema sofisticado de medición y análisis de datos, como lo es el programa computacional “PI ProcessBook”. Además, se debe considerar que la mayoría de los planos originales o P&D de la planta se encuentran en formato DGN, al cual es imposible acceder dentro de las instalaciones de CODELCO, debido a que no posee el software adecuado para su visualización. Por lo tanto, se debió trabajar los 2 últimos meses con 2 computadores al mismo tiempo para extraer la información relevante de dichos planos.

Otro problema que posee esta gerencia consiste en la falta de comprensión del sistema modificado en que circulan las soluciones, pues se han cambiado las direcciones por las que pasan los fluidos relevantes, las diferentes transformaciones (rectificaciones) que se realizaron se produjeron al adecuarse al cambio en la manera de lixiviar. Donde se pasó de una lixiviación por bateas a una lixiviación en pilas, donde se ha ido examinando la forma de canalizar y contener las soluciones con que se trabaja. Adicionalmente, el sistema ha debido adaptarse al creciente aumento de tonelaje apilado en las pilas, entonces se incrementa el caudal circulante del proceso, lo que trae consigo ventajas a corto plazo para cumplir la producción de cátodos de cobre comprometida; sin embargo, con ello a la vez disminuye la vida útil del proyecto, en especial al considerar que la

reciente modificación que se realizó el 2017 contempla procesar hasta los 7 años siguientes, pero con las alteraciones que se realizaron no se consideró el área de lixiviación, de lo cual se desprende que no se efectuaron formalmente actualizaciones del sistema, a pesar de haber cambiado la ubicación de cañerías in situ, ya sea adicionando, reemplazando o sacando los conductos mencionados, todo ello para solucionar emergencias puntuales propias del manejo operacional incorrecto, entre las cuales se tienen rebalses de piscinas en que se contienen los fluidos, desacoplamiento de intersecciones críticas, roturas de líneas, entre otras.

Con respecto a los tubos magnéticos, es una dificultad el sector en que se encuentran instalados, que corresponde a la parte inferior de cada módulo, puesto que implica que realicen una medición imprecisa.

Un problema puntual y recurrente que se tiene en la GEL es el arrastre de ripios que llega a la recirculación, ya que se tienen planificadas determinadas mantenciones en el sector, sin embargo cada vez se ha complicado la situación hasta el punto de adelantar dichas modificaciones, pues se ha tenido que detener la recirculación de PDS debido a esta causa, por lo que se debiera crear un sistema simple de contención para estos ripios, que permita realizar una limpieza rápida sin perder operatividad del sistema.

4.4 Estrategia de Simulación

En primer lugar, se comienza con la extracción de la base de datos, donde se considera el inicio desde el 4 de febrero del 2018, debido a que los datos anteriores a esa fecha la planta trabajó muy diferente considerando las bateas de lixiviación, y el estudio contempla el alcance de lixiviación en pilas solamente, por ende, desde la fecha mencionada hasta fines de agosto del 2019.

La interpretación de los datos necesita una base de antecedentes suficientes para que se genere un modelo adecuado con un error inferior al 5 %, estos datos mínimos son 365 días, pero para los más de 600 días que se analizaron, apenas se obtuvieron 188 valores confiables, ya que en el resto no habían datos, o no se pudieron registrar debido a problemas en el sistema eléctrico, además también se descartó valores ceros o nulos que no tienen inferencia en el sistema.

Para priorizar las variables de estudio, se realiza una clasificación de los parámetros que más influyen en la concentración de cobre para el PLS. En una primera instancia se realiza una selección teórica, pero más adelante se utiliza un software computacional llamado “Design Expert”, el cual mediante una considerable cantidad de datos selecciona las variables determinantes para la respuesta que se desea obtener, que en este caso corresponde a la concentración de cobre en el PLS.

Cabe mencionar que se requiere una mayor cantidad de datos para disminuir el error porcentual, dado a que estadísticamente para acotar la exactitud de un modelo lineal es necesario tener por lo menos 365 puntos. Por lo anterior, se decide trabajar con los datos fidedignos que entrega el programa “PI System”, que desde febrero del 2018 hasta agosto de 2019 corresponden a 600 datos en total; sin embargo, de ellos permanecen entre 100 y 200 fidedignos, pues existe una cantidad importante de antecedentes sin medición o que arrojan valores de cero, debido a problemas operacionales, mantenciones, paradas de planta, incidentes, condiciones meteorológicas adversas, entre otras. También existe una cantidad considerable de valores negativos que se debe a problemas de medición en los equipos, que ante cualquier alteración arrojan valores irreales, los cuales se dejaron de lado.

Finalmente, existen datos que no se rescataron del programa computacional, debido a problemas eléctricos cuando se detuvo el sistema de control de la planta en el área de lixiviación, por ende, el software “PI Processbook” arroja datos escritos de no conectividad, apagado, detención, entre otros. Los antecedentes recién mencionados también fueron descartados de los parámetros finales con los que se hizo la aproximación mediante el programa computacional “Design Expert”.

Suavización de los datos, donde la dispersión de los valores estimados es menor a la de los reales, por lo que se tiende a subestimar los valores altos y sobreestimar los valores bajos. También se debe asumir que la simulación manual es incapaz de producir valores futuros cercanos a los reales, lo que se debe a la alta variabilidad de los datos considerados, donde a pesar de realizar una exhaustiva segregación la proximidad para la primera aproximación mediante el “Design Expert” es lejana.

Se realizó un análisis gráfico de los datos que se depuraron previamente, con el objetivo de obtener una tendencia que simule el comportamiento de los antecedentes recabados, donde se espera idealmente encontrar un modelo lineal para que sea sencilla su estimación, y futura proyección; sin embargo debido al comportamiento erróneo en la mayoría de las variables, que se observa en las gráficas que se realizaron, de lo cual se desprende información de un rango en que fluctúan los datos, pero se hace imposible llegar a obtener una ecuación para dicha tendencia, sin embargo es posible establecer una tolerancia aceptable por donde se debieran mover los datos.

Para la utilización del software computacional, en primer lugar, se ingresan los datos de las variables con sus respectivas unidades de medida en el programa “Design Expert”, luego se añade el valor mínimo y máximo para cada variable, donde se sugiere el modelo que mejor se ajusta a la

respuesta requerida que en este caso corresponde a la concentración de cobre en el PLS, para finalmente obtener una ecuación sencilla que en este caso es de primer orden.

Posteriormente para la construcción del modelo a través de las variables primarias, la ejecución de la simulación se realizó mediante la herramienta computacional “Microsoft Excel”, donde se agregó una línea de tendencia a los datos graficados, hasta que se obtuvo una ecuación que simule el comportamiento de los datos depurados, ello se verificó mediante el valor de R^2 que corresponde al coeficiente de determinación en la regresión lineal, donde a medida que R^2 se acerque a 1 indica la proximidad de las cifras reales a la curva simulada.



5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Manejo de soluciones

Se comienza con la interpretación del movimiento de los flujos involucrados en el sistema hidráulico de la planta, para ello se separan los tres fluidos más importantes que corresponden a PLS, PDS y refino, para ello se realiza un diagrama de flujos actualizado en “PI Processbook” que representa su circulación. En las Figuras 12 y 13 se observan las representaciones mencionadas y en la Figura 14 la compilación de las tres corrientes mencionadas en un diagrama general de la planta.

En la Figura 12 se distinguen números rojos que representan el porcentaje de llenado que tienen las piscinas, los números con fondo amarillo representan los flujos que están circulando momentáneamente en el sistema y los números con fondo negro representan las últimas mediciones de pH, concentración de cobre y acidez de la solución.

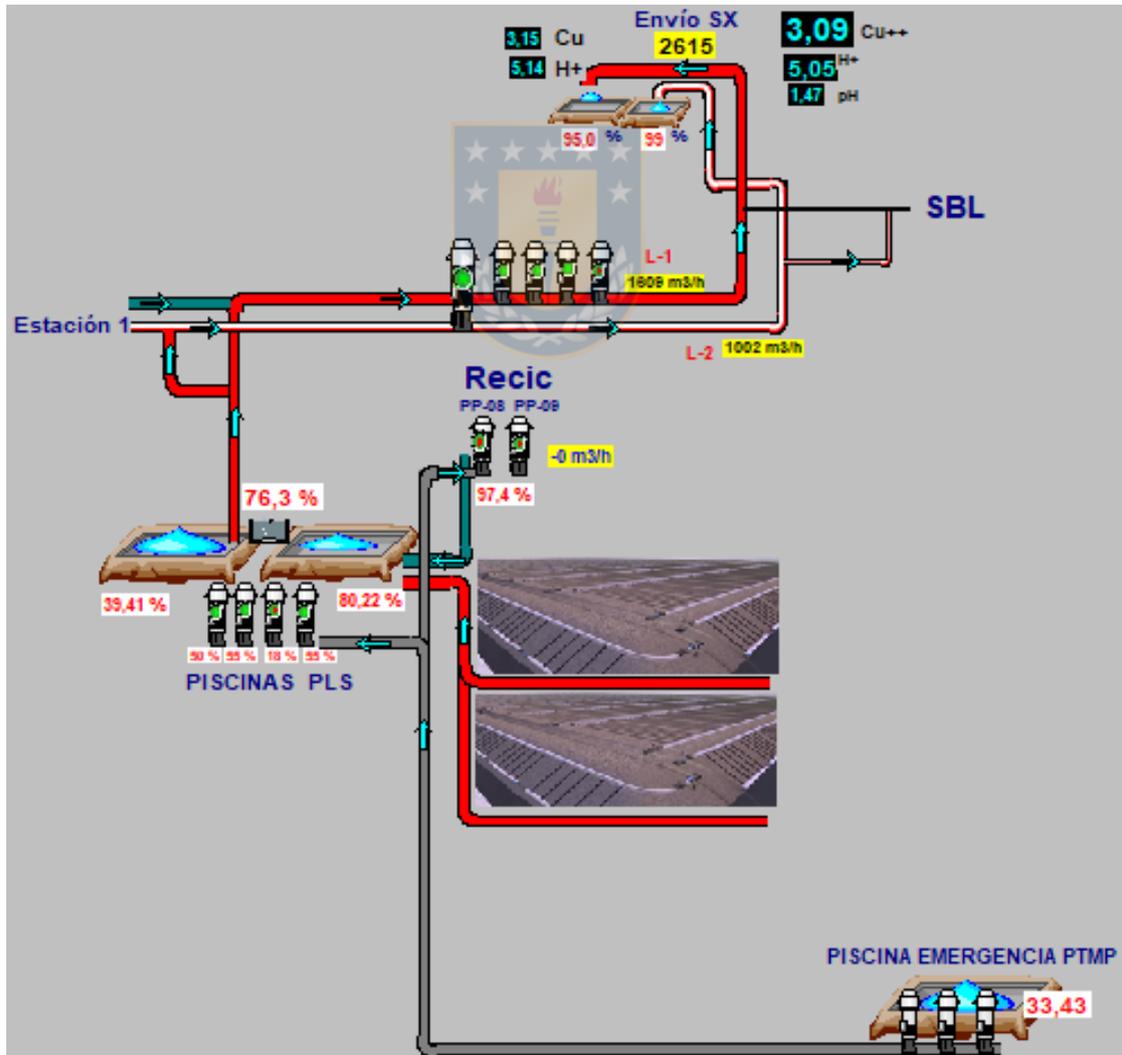


Figura 12. Circulación del PLS en la PTMP.

En la Figura 13 se observan las rectas de color negro que representan al refino, de color verde al PDS, de color café y morado a la mezcla de concentración intermedia entre PDS y refino, de color celeste al refino proveniente de la División Ministro Hales (DMH) y de color plomo al PDS proveniente de ecometales (ECL).

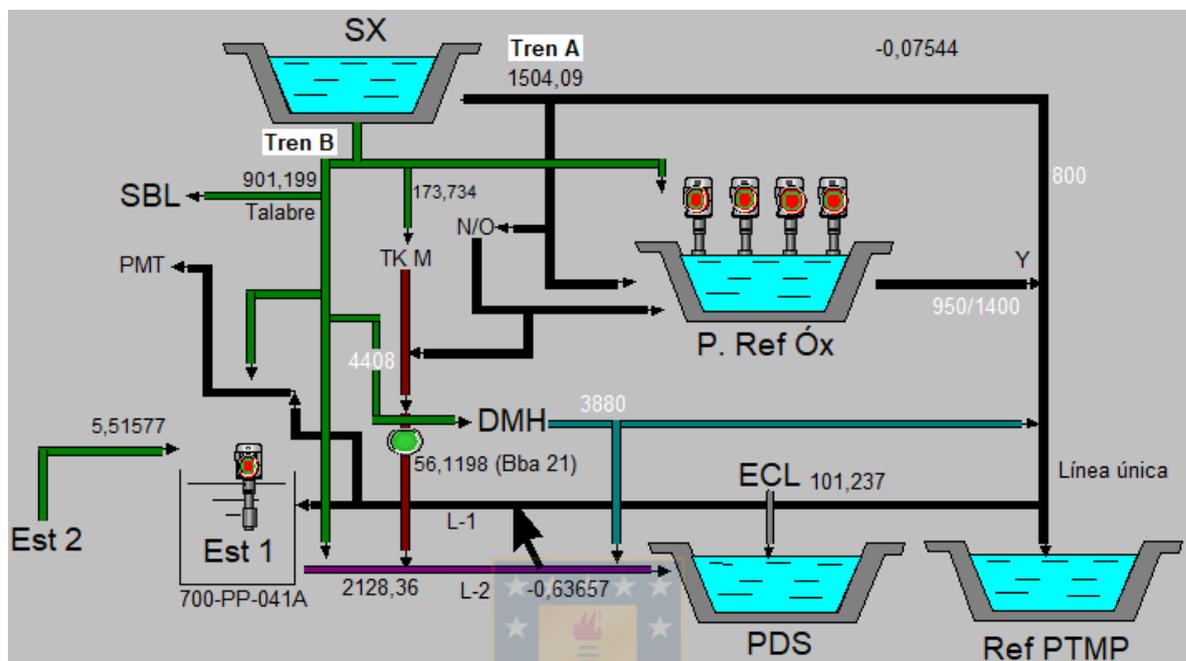


Figura 13. Circulación del PDS y refino en la PTMP.

En la Figura 14 se observa el diagrama general del transporte de soluciones, donde las rectas negras representan la solución de refino, las rectas azules la solución de PDS y las rectas rojas la solución de PLS, éstas tres corresponden a los fluidos primarios de la planta, mientras que las rectas verdes representan la circulación del agua, las recta celeste la solución intermedia proveniente de ecometales y la recta morada la solución intermedia entre refino y PDS, la cual proviene de la lixiviación de los ripios.

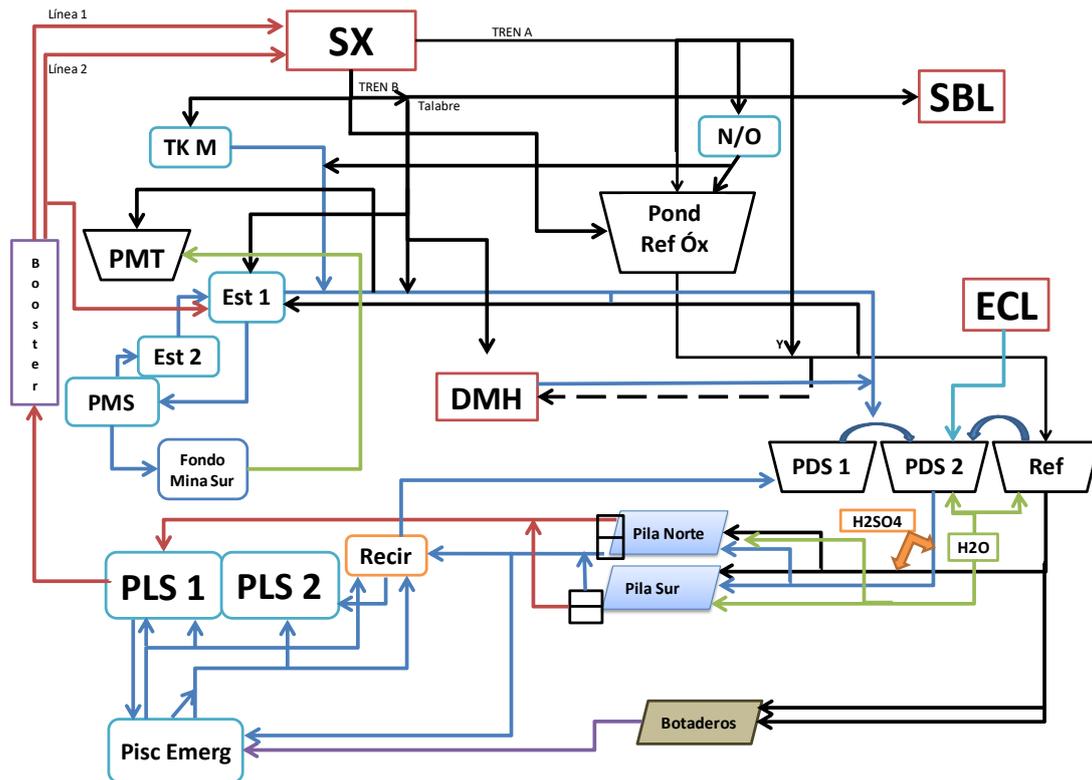


Figura 14. Diagrama general del movimiento de fluidos en "Microsoft Excel" de la PTMP.

Se realizó un levantamiento de la capacidad de contención de soluciones por los contenedores y pond existentes en la actualidad, donde se debe considerar que entre el 35 y 65% del volumen de contención se encuentra con desechos o desperdicios en el fondo de cada contenedor, y se observan las capacidades de cada estanque en la Tabla 1.

Tabla 1: Capacidad de contención de soluciones de la GEL.

N°	Ubicación	Volumen de contención (m ³)	Volumen útil (m ³)	Volumen mínimo (m ³)	Volumen recomendable (m ³)	Volumen máximo (m ³)	Fluctuación de nivel (%)
1	Pond Refino Óxido	13021	7162	4297	5371	6087	60 -- 80
2	Estación 1	1200	730	263	438 -- 584	730	98 -- 102
3	Estación 2	1000	650	293	422,5 -- 487,5	650	101 -- 102
4	Pond Mina Sur	34000	18700	6732	11220 -- 14960	18700	98 -- 100
5	PDS 1, 2 y Refino	11845	6515	4235	5863	6515	85 -- 103
6	Recirculación	1164	640	416	576	640	95 -- 102
7	PLS 1 y 2	9545	5250	1995	4200	5145	40 -- 97
8	Pond SX	14000	6300	5670	6111	6300	90 -- 100
9	Piscina Emergencia	43200	23760	2138	7128	23760	18 -- 98

También se realizó un levantamiento de la capacidad de transporte de soluciones por medio de las líneas existentes en la actualidad, donde se menciona el sector de partida, término y alguna característica de cada cañería, lo que se observan en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2: Transporte de soluciones parte 1 de la PTMP.

Inicia	Termina	Características	Caudal (m ³ /h)
Refino Tren A	Pond Ref Óxido	Gravedad	750 - 850
Refino Tren A	Estanques N/O	Gravedad válvula manual	650 - 750
Estanques N/O	Pond Ref Óxido	Gravedad válvula manual	325 - 375
Estanques N/O	Intersección TKM	Gravedad válvula manual	325 - 375
Pond Refino Óxido	Intersección Y	Bba (4, 2 operativas)	880 - 1150
Pond Refino Óxido	Intersección Y	Bba (4, 2 operativas)	1390 -1460
Línea Única	Estación 1	Gravedad válvula manual	Depende del exceso
Intersección Y	Refino PTMP	Bbas P.Ref Óx y Grav Tren A	1700 - 2000
Intersección Y	Refino PTMP	Bbas P.Ref Óx y Grav Tren A	2150 - 2300
ECL	PDS PTMP	Gravedad válvula manual	98-102
Refino Tren B	TK M o Pond Ref Óxido	Mínimo y Máximo	150 - 200
Refino Tren B	TK M o Pond Ref Óxido	Rango de movimiento	160 -180
Intersección TKM	Intersección Línea 2	Bomba 21	150 - 180
Intersección TKM	Intersección Línea 2	Bomba 21	380 - 420
Refino Tren B (Talabre)	SBL	Depende del requerimiento	1

Tabla 3: Transporte de soluciones parte 2 de la PTMP.

Inicia	Termina	Características	Caudal (m ³ /h)
Refino Tren B (Talabre)	Estación 1	Diferencia	250 - 350
Refino Tren B (Talabre)	Estación 1	Diferencia	500 - 600
Refino Tren B (Talabre)	Intersección Línea 2	Alternativa DMH	Depende del exceso
Refino Tren B (Talabre)	DMH	Considerar caudal día	200 - 240
Refino Tren B (Talabre)	DMH	Mínimo y Máximo	165 - 195
Refino Tren B (Talabre)	DMH	Rango de movimiento	170 -190
DMH	Línea 2 PDS	Considerar caudal día	160 - 180
DMH	Línea única	Considerar caudal día	160 - 180
Línea 2 PDS	Línea 1 PDS	Por exceso de flujo	Depende del exceso
Línea 2 PDS	PDS PTMP	Depende del juego de válvula	Sumatoria
Línea 2 PDS	PDS PTMP	Depende del juego de válvulas	800 - 950
Estación 2	Estación 1	Bomba	450 - 750
Estación 2	Estación 1	Actualmente	500 - 600
Línea 2 PDS	PMT	Regulación válvula manual	Depende del exceso

Tabla 4: Transporte de soluciones parte 3 de la PTMP.

Inicia	Termina	Características	Caudal (m ³ /h)
Agua	PDS o Ref PTMP	Depende del requerimiento	80 - 120
Refino	PTMP	Se estima por el riego	1200 - 1400
PDS	PTMP	Se estima por el riego	1800 - 2000
Total ingreso PTMP		Depende válvula de bajada abiertas	3000 - 3400
Total salida PTMP		Estimación	2600 - 2800
Pilas	PLS	Gravedad regulado con tablón	1750 - 1900
Pilas	Recirculación	Gravedad regulado con tablón	800 - 900
Refino PTMP	Botaderos	Gravedad máximo y mínimo	80 - 180
Refino PTMP	Botaderos	Gravedad rango de movimiento	155 - 175
Refino PTMP	Botaderos	Gravedad estimación	155 - 175
Total ingreso Botaderos		Gravedad sumatoria anteriores	310 - 350
Total salida Botaderos		Gravedad	220 - 260
Recirculación	PLS	Gravedad válvula manual	Depende de la [Cu+2]
Recirculación	Piscina Emergencia PTMP	Gravedad válvula manual	Depende del exceso
Piscina Emergencia PTMP	Recirculación o PLS	3 Bombas (2 operativas) y regulación de válvula	180 - 220
Piscina Emergencia PTMP	Recirculación o PLS	3 Bombas (2 operativas) y regulación de válvula	180 - 220
PLS	Piscina Emergencia PTMP	Depende exceso nivel	Depende del exceso
PLS	Estación BOOSTER	5 Bombas (4 o 3 operativas)	2400 - 2600
Estación BOOSTER	SX	5 Bombas (4 o 3 operativas)	2400 - 2600
Estación BOOSTER	Línea 1 PLS	4 Bombas (3 o 2 operativas)	1400 - 1600
Estación BOOSTER	Línea 2 PLS	1 Bomba	700 - 1000

5.2 Estándar Operacional

Para el estándar operacional se describen las actividades que debe realizar el jefe de turno, el operador mayor o de consola y el operador especialista o de terreno, ya que en esa secuencia tienen mayor responsabilidad en la planta, donde los jefes de turno deben rendir los informes detallados de todo lo sucedido antes del término de cada turno, este a su vez recibe un resumen del operador de consola que le rinde lo que le informó el operador especialista de todos los sectores que recorrió en terreno y de lo que observó en la consola, los tres están en constante comunicación mediante walkie talkie, pues ante cualquier eventualidad deben gestionar las acciones a desarrollar e informarle al ingeniero de operaciones a cargo.

Las actividades que debe desarrollar el jefe de turno corresponden:

- Instruir y cumplir la aplicación del plan, entregando evidencia objetiva al ingeniero de operaciones.
- Distribuir al personal a cargo para la ejecución del trabajo e instruirlos con respecto a los procedimientos, instructivos, normas y riesgos relacionados con la actividad a realizar.

- Coordinar la solicitud y entrega de equipos con personal de mantención y eléctrico para mantención y/o reparación. Si por razones de servicio no puede efectuar dicha solicitud, designará a una de las personas del equipo de trabajo que se encargará de la tramitación respectiva.

- Realizar charla de seguridad para el personal a su cargo advirtiéndole sobre los riesgos a los que pueden estar expuestos al realizar la tarea.

- Instruir a todo el personal involucrado en las tareas, la aplicación de este instructivo.

- Controlar que todo trabajo a su cargo se realice de acuerdo a los procedimientos, instructivo o normas establecidas para tal efecto.

- Supervisar, coordinar y dirigir las actividades realizadas por los operadores.

Las actividades que debe desarrollar el operador mayor corresponden:

- Aplicar plan y solicitar apoyo a los operadores de terreno para verificar y/o ejecutar acciones enfocadas al cumplimiento del plan. Registrar y enviar todas las novedades del turno, al Ingeniero de operaciones y Jefe de Turno.

- Utilizar obligatoriamente los elementos de protección personal, recomendados para la actividad a desarrollar.

- Ejecutar la tarea, cumpliendo con las actividades, aplicando el procedimiento establecido para tal efecto.

- Verificar operativos: accesos despejados, comunicaciones radiales, cortes de energía de los involucrados en la actividad (cuando aplique), limpieza del área de trabajo y dispositivo de iluminación (si fuere necesario).

- Cumplir adecuadamente con los trabajos dentro de los plazos y especificaciones establecidas.

- Emplear adecuadamente los equipos, herramientas, materiales y elementos de mantención asignados.

Las actividades que debe desarrollar el operador especialista corresponden:

- Entregar el soporte en terreno y ejecutar las maniobras operacionales necesarias para el cumplimiento del plan.

- Opera e inspecciona en terreno los equipos de proceso.

- Controla y ajusta en conjunto con el operador mayor y/o jefe de turno las mediciones de variables y parámetros para mantener controlado el proceso.

- Cumplir con las pautas establecidas para el turno, utilizando los equipos y vehículos conforme a las normas de seguridad.

- En conjunto con los jefes de turno u operador mayor deben verificar que estén operativos: los puntos de acceso despejados, las comunicaciones radiales y la limpieza del área de trabajo.

- Encargado de la puesta en marcha y detención de los equipos desde terreno.

- Verificar en conjunto con el jefe de turno u operador mayor que estén operativos los accesos despejados, comunicaciones radiales, limpieza del área de trabajo y duchas de emergencia en óptimas condiciones.

- Dar estricto cumplimiento al procedimiento de trabajo seguro, procurando que estén todas las condiciones para desarrollar la actividad con seguridad, protegiendo la salud ocupacional y el medio ambiente, sosteniendo un proceso y un producto de calidad.

- Cumplir con todas las normativas corporativas internas, herramientas preventivas en seguridad y salud ocupacional y medio ambiente.

5.3 Comportamiento de la concentración de cobre del PLS en el tiempo

Como una primera aproximación para la generación de un modelo predictivo para la concentración de cobre en el PLS se distingue a continuación la tendencia que tiene esta con respecto al tiempo en días para el 2018; sin embargo, mejora la tendencia realizando un promedio mensual de dicha concentración en el tiempo, lo que se aprecia en la Figura 15, 16 y 17. Además el análisis para el 2019 no tenía una buena aproximación en días por ello se desprecia.

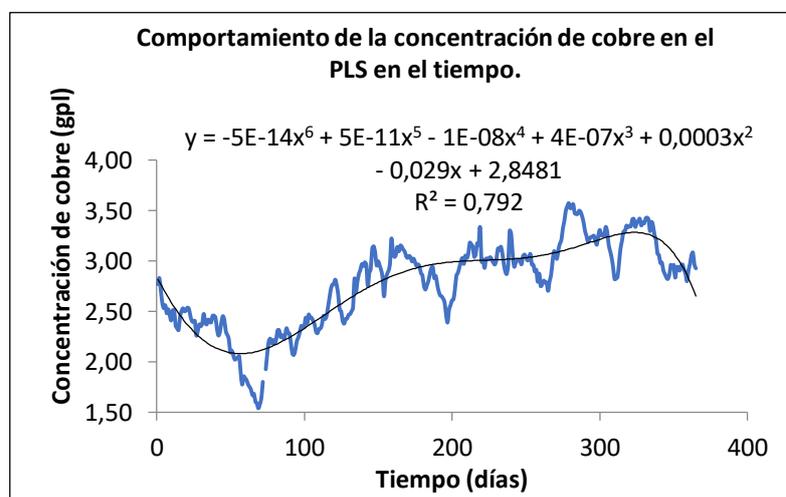


Figura 15. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (días) durante el 2018.

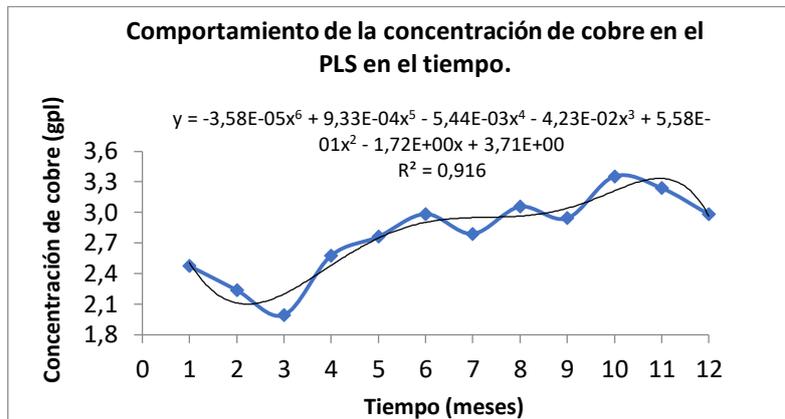


Figura 16. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (meses) durante el 2018.

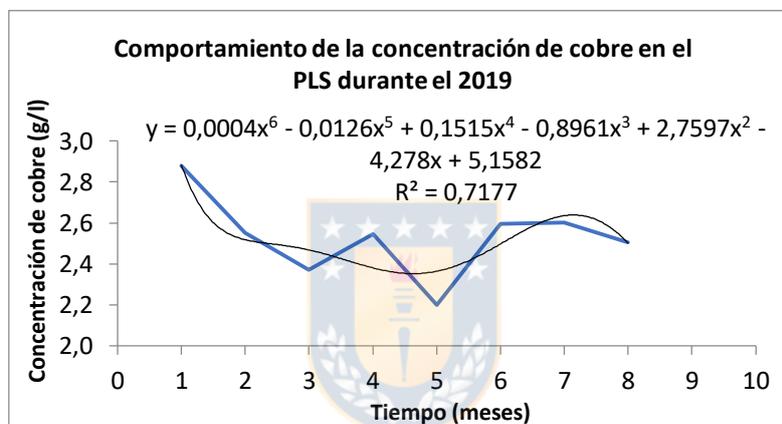


Figura 17. Comportamiento de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo (meses) durante el 2019.

A continuación en la Figura 18 se observa el comportamiento de la concentración de cobre promedio registrada en el primer efluente para todos los módulos de ambas pilas desde el ciclo de lixiviación 26 hasta el 28, en que alterna la pila norte y la pila sur, comenzando por la primera de estas, donde se descartan los módulos desde el 17 al 54 sur del ciclo 26, todos los módulos de la pila norte del ciclo 27, el módulo 1 y 2 de la pila sur del ciclo 27, porque el sistema no rescató antecedentes de la concentración de cobre en ellos.

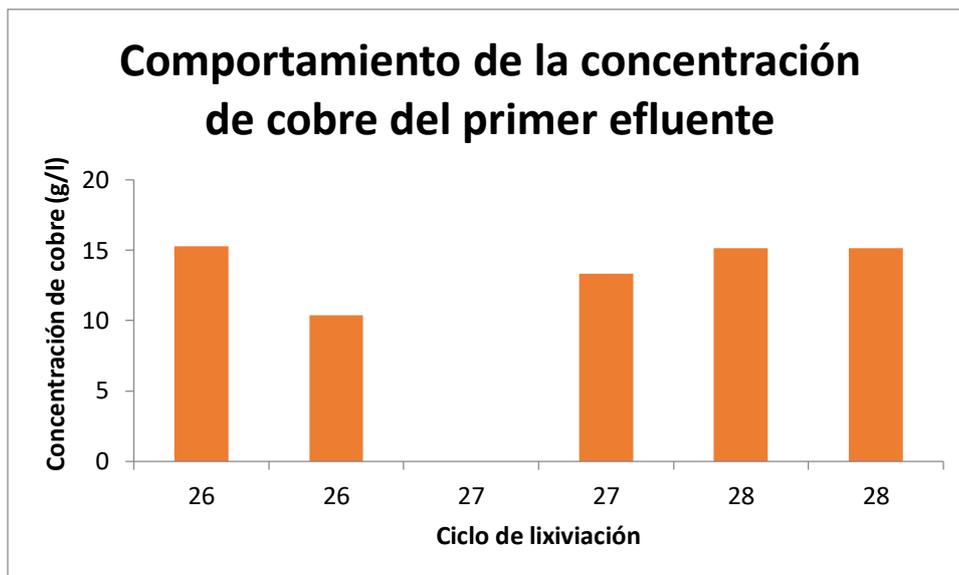


Figura 18. Comportamiento de la concentración de cobre del primer efluente (PLS).

La Figura 19 muestra el comportamiento de la concentración de cobre en el refino en función del tiempo durante el 2018, donde se comenzó a obtener datos a partir del primero de junio, se observa que el rango de fluctuación de la concentración de cobre en el refino se mueve entre 0.07 y 0.37 gpl, donde se apartan los peak de 0.34, 0.36 y 0.37 para obtener un promedio de 0.14 gpl de cobre en el refino en 2018.

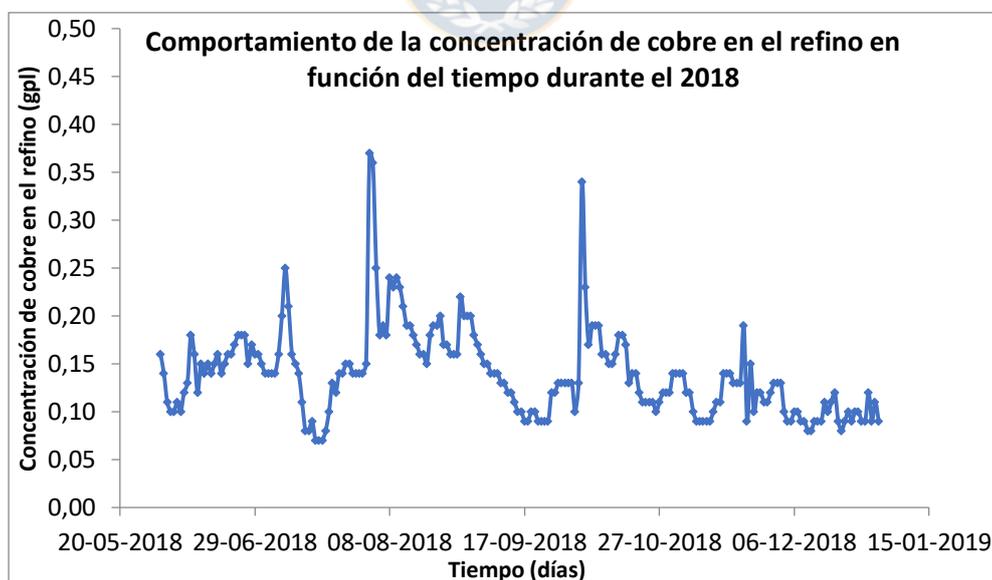


Figura 19. Comparación de la concentración de cobre en el refino en función del tiempo durante el 2018.

De igual manera se presenta la gráfica para el 2019 en la Figura 20, donde se obtienen antecedentes hasta el 30 de agosto, se aprecia que la concentración de cobre en el refino fluctúa

entre 0.03 y 3.44 gpl, además sin considerar los datos de concentración de cobre mayor a 1 gpl, se tiene un promedio de 0.16 gpl de cobre en el refino.

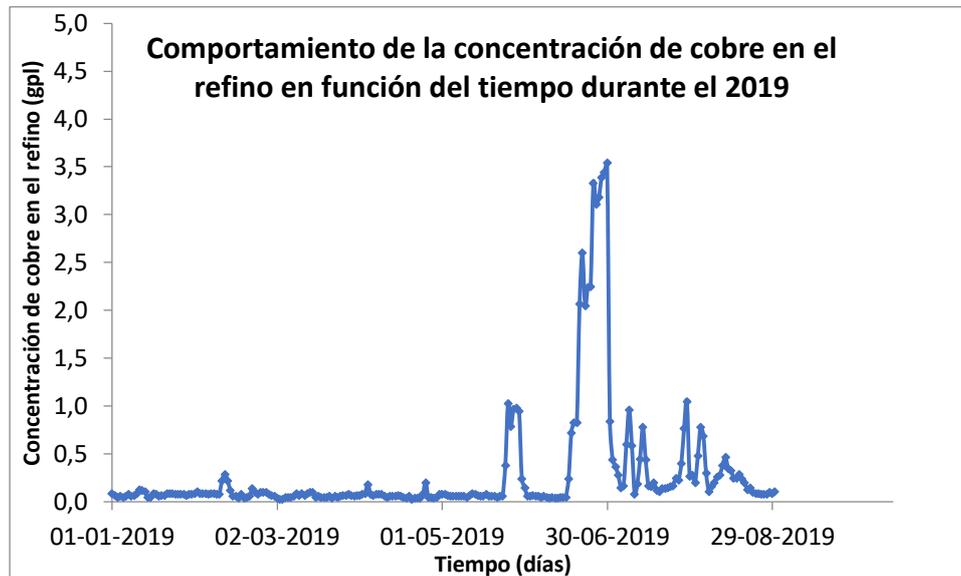


Figura 20. Comparación de la concentración de cobre en el refino en función del tiempo durante el 2019.



5.4 Resultados de la simulación

El programa computacional “Design Expert” sugiere que el modelo para predecir la concentración de cobre en el PLS debe ser lineal, además distingue las variables dependientes que influyen en la simulación de dicha concentración, con estos parámetros genera una ecuación sencilla para pronosticar la tendencia que seguirá la concentración de cobre en el tiempo.

Dentro de las variables que se ingresaron al programa “Design Expert” se encuentran: masa húmeda de los glómeros, altura de apilamiento, granulometría de $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{1}{2}$ ”, $\frac{1}{4}$ ”, 10#, 50#, 100#, 200# y -200#, razón de cobre soluble y total, tasa de curado y razón de agua, humedad del glómero, concentración de cobre del PDS y refino del tren A y del tren B, acidez del PDS y refino del tren A y tren B. Para que el programa “Design Expert” seleccione las variables más significativas para la concentración de cobre en el PLS, que corresponden a la granulometría de $\frac{3}{4}$ ”, 100# y 200#, la razón de cobre soluble y total (CuS/CuT), la concentración de cobre del refino del tren A y la acidez del refino del tren B.

Además, se obtiene una desviación estándar de 0.8453 lo que indica la proximidad del modelo simulado arrojado, la ecuación del modelo es la siguiente:

$$[Cu^{+2}]_{PLS} = a + b * 3/4" + c * 100\# + d * 200\# + e * \frac{CuS}{CuT} + f * [Cu^{+2}]_{RefA} + g * [H^+]_{RefB} \quad (38)$$

Donde las letras a, b, c, d, e, f y g corresponden a las siguientes constantes: a = 0.362016, b = 0.031158, c = -0.15169, d = -0.007982, e = 0.016082, f = 4.46769 y g = 0.182987, donde solamente a es una constante independiente de las variables seleccionadas.

En la representación que se muestra a continuación se observa la concentración de cobre en el PLS real y simulada, donde se aprecian bruscas caídas que corresponden a días en que no habían datos en el sistema de una de las variables, los primeros 5 descensos corresponden a la ausencia de la concentración de ácido en el refinado del tren B, los 2 siguientes a la falta de la concentración de cobre en el refinado del tren A, luego nuevamente existe una caída por carencia de la concentración de ácido en el refinado del tren B, y las 3 últimas declinaciones por escasez de concentración de ácido y cobre en el refinado de ambos trenes. Además, se distinguen ascensos en que la concentración de cobre simulada se dispara por sobre la real: el primero se debe a que la concentración de cobre del refinado en el tren A era bastante más alto que lo normal (0.445 g/l), ya que su media es de 0.082 g/l; la segunda alza es notoriamente más brusca y se debe a que la concentración del ácido registrada el 23 de enero de 2019 incrementó a 24.467 g/l. Esto probablemente es un error asociado al experimentador, que se podría deber a una errónea toma de la muestra o traspaso de los datos al sistema; la tercera elevación es causada por el leve aumento de la concentración de cobre y ácido en el refinado, a pesar de que el resto de las variables se encuentran bajo el promedio, en especial la granulometría de 100# que está demasiado disminuida con respecto a la media (es de 0.020 en comparación a 4.214).

Todo lo anterior permite advertir que las soluciones lixiviantes son más significativas que la granulometría y la ley para una buena predicción de la concentración de cobre en el PLS, finalmente el último ascenso se debe al incremento de la concentración de cobre en el refinado del tren A, que corresponde a 0.268 gpl.

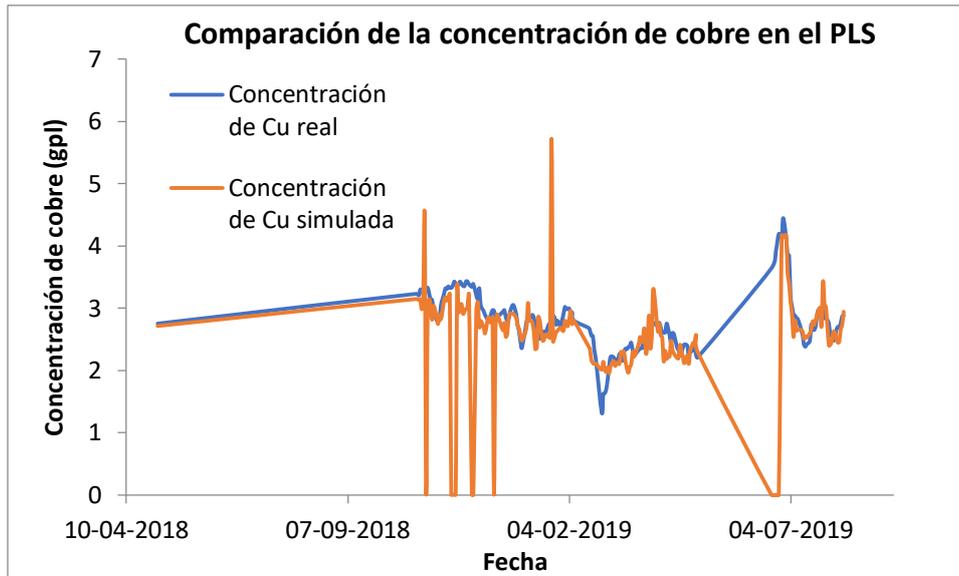


Figura 21. Comparación de la concentración de cobre real y simulada en el PLS con “Design Expert”.

En la Figura 22 se presenta la gráfica anterior con los datos segregados, en que se eliminaron los datos que no eran significativos, como cuando no existían datos de algunas variables, o había ausencia de la concentración de cobre en el PLS por ciertas eventualidades, como mantenencias, huelgas, o emergencias, con lo cual se tienen 188 datos válidos desde el 1 de octubre del 2018 hasta el 9 de agosto del 2019, en que generalmente la concentración de cobre real es mayor a la simulada, diferencia que se plasma con un error promedio de 7.7%, además dentro de las limitaciones y problemáticas que posee esta aproximación se encuentra su sensibilidad a los ruidos del sistema, cambios operacionales externos a los datos extraídos, tiene un error involucrado mayor al 5% y falta de datos disponibles.

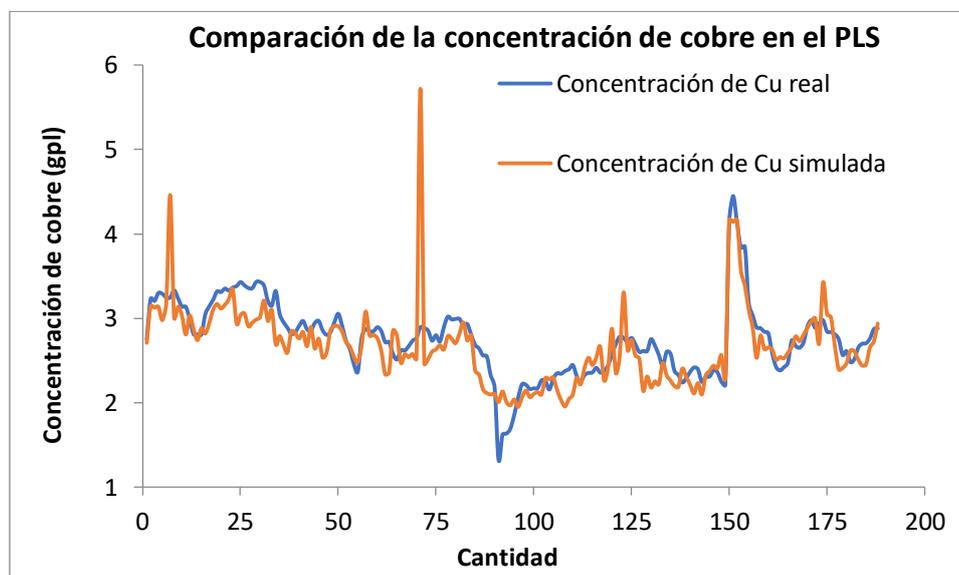


Figura 22. Comparación de la concentración de cobre real y simulada en el PLS con datos depurados utilizando “Design Expert”.

También el programa arroja el comportamiento de las variables importantes para el modelo con la respuesta (concentración de cobre en el PLS), donde tiene un comportamiento directo para la granulometría $\frac{3}{4}$ ”, la razón de cobre soluble y total, la concentración de cobre en el refino del tren A y la acidez del refino del tren B, la variable menos influyente de las mencionadas es la granulometría de 200# pues con su variación la concentración de cobre en el PLS permanece constante, y esta respuesta tiene un comportamiento inverso con la granulometría de 100#, lo cual se observa en las Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28.

En la Figura 23 se aprecia la relación directa entre la granulometría de $\frac{3}{4}$ ” con la concentración de cobre en el PLS, donde con el aumento de 0.031% en la granulometría de $\frac{3}{4}$ ” incrementó en 3.5% la concentración de cobre en el PLS, y la granulometría de $\frac{3}{4}$ ” fluctúa entre 3 a 13.2%.

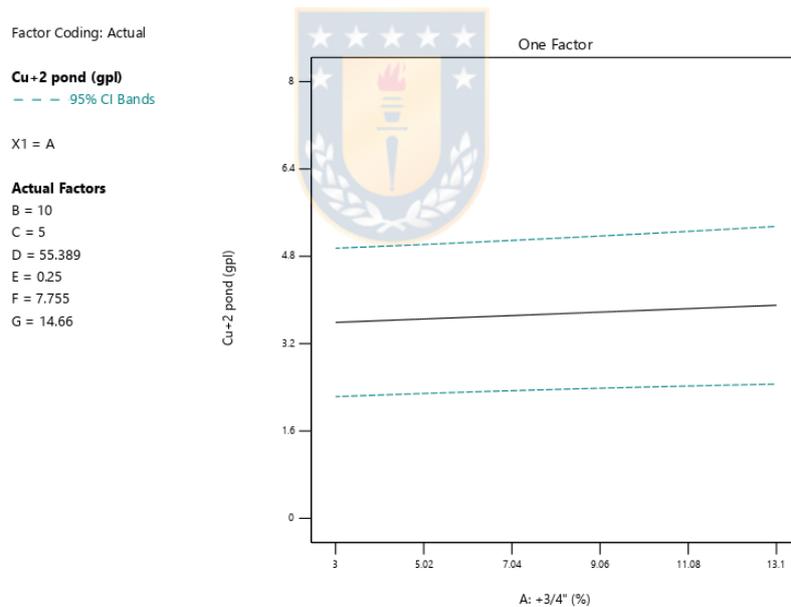


Figura 23. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de $\frac{3}{4}$ ”.

En la Figura 24 se observa el comportamiento de la granulometría de 100# y la concentración de cobre en el PLS, donde tienen una relación inversa, donde la granulometría de 100# fluctúa entre 0 y 20%, y además con un descenso de dicha granulometría en 0.15% aumenta la concentración de cobre en el PLS en 5.25%.

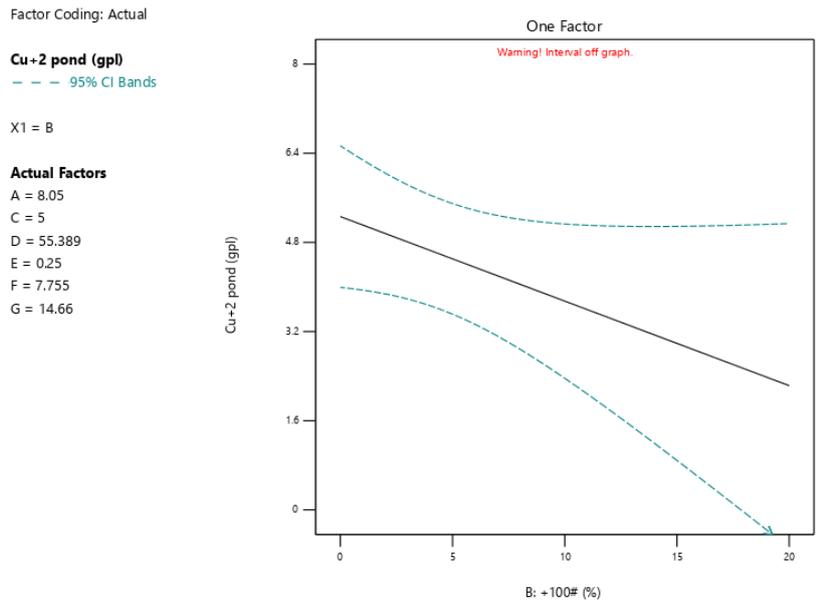


Figura 24. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de 100#.

En la Figura 25 se distingue que la granulometría de 200# no tiene influencia en la concentración de cobre en el PLS, pues permanece prácticamente constante, además con una disminución de 0.008% en la granulometría de 200# la concentración de cobre en el PLS aumenta 3.79%, y donde dicha granulometría fluctúa entre 0 y 10%.

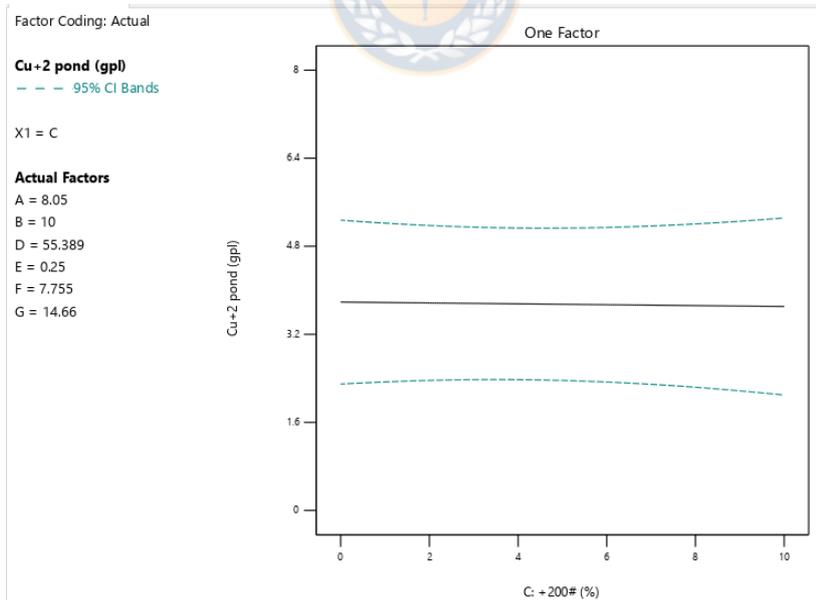


Figura 25. Comportamiento de la concentración de cobre con la granulometría de 200#.

En la Figura 26 se aprecia la relación directa de la ley como la razón de cobre soluble y cobre total con la concentración de cobre en el PLS, donde dicha razón fluctúa entre 25 y

86, además con un incremento de 0.016% en la razón CuS/CuT aumenta en 2.85% la concentración de cobre en el PLS.

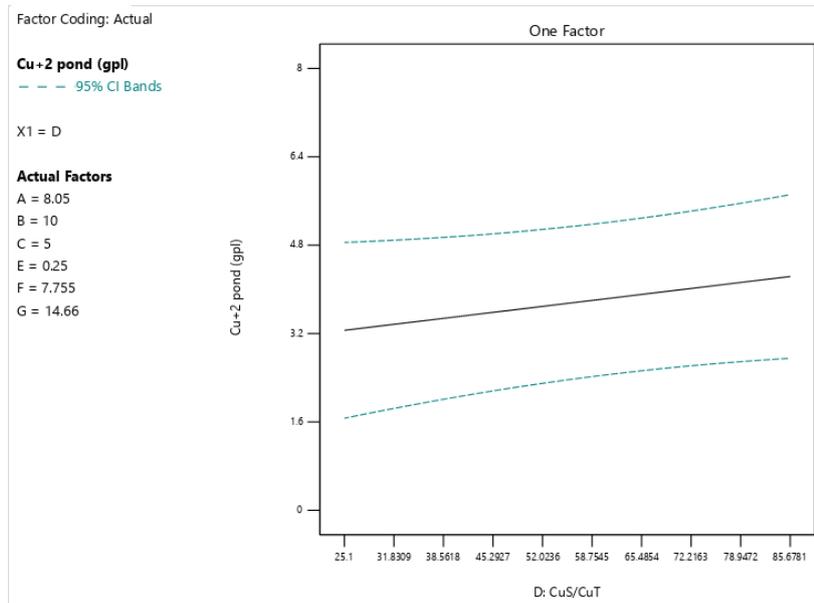


Figura 26. Comportamiento de la concentración de cobre con la razón CuS/CuT.

En la Figura 27 se observa una relación directa entre la concentración de cobre del refino del tren A y la concentración de cobre en el PLS, donde la concentración de cobre del refino del tren A fluctúa entre 0.04 y 0.46 g/l, además cuando la concentración de cobre en el refino del tren A aumenta un 4.46% la concentración de cobre en el PLS asciende en un 2.63%.

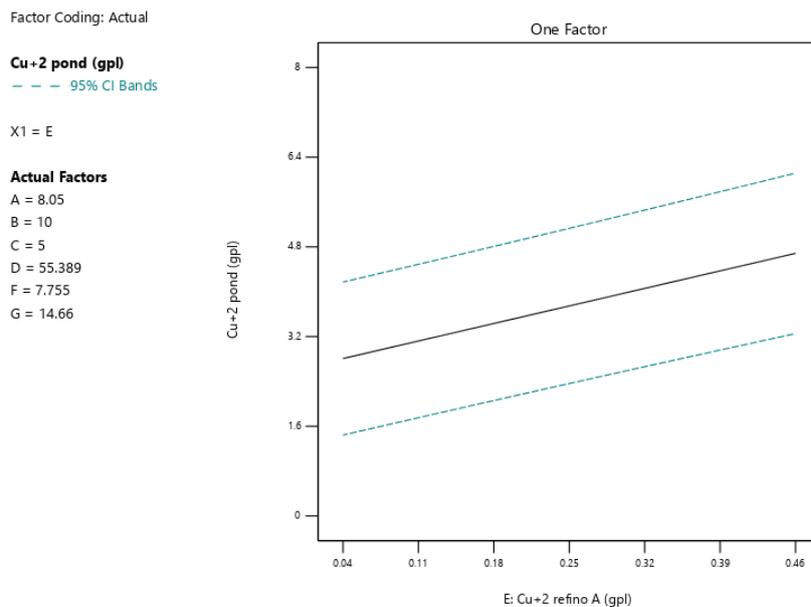


Figura 27. Comportamiento de la concentración de cobre con la concentración de cobre del refino del tren A.

En la Figura 28 se distingue el comportamiento entre la acidez en el refino del tren B con la concentración de cobre en el PLS, donde tienen una relación directa en que la acidez en el refino del tren B fluctúa entre 4.85 y 24.5 g/l, y además con el ascenso de dicha acidez en un 0.18% aumenta la concentración de cobre en el PLS en 1.06%.

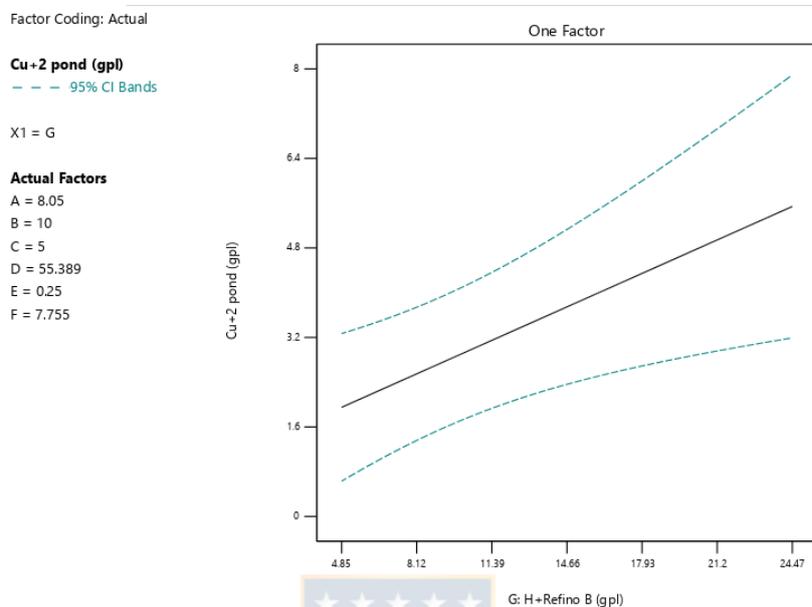


Figura 28. Comportamiento de la concentración de cobre con la acidez del refino del tren B.

Luego, como el PLS es la combinación de la suma del cobre extraído de cada módulo el razonamiento lógico que se realiza es simular lo que se extrae de cada módulo. Para el análisis del comportamiento que tienen los módulos, en primera instancia se intentó ajustar el comportamiento de los módulos según el tipo de control cinético correspondiente de acuerdo a la teoría, que, para este caso, pertenece al control por difusión a través de un sólido poroso, ya que corresponden a ripples conformados principalmente por óxidos de cobre. Sin embargo, al igual que muchos casos, no se cumple en la práctica operacional de la planta, ya que se evaluó la ecuación cinética del control por difusión, sin tener un comportamiento adecuado o similar al de los módulos.

Por lo tanto, para casos prácticos, se empleó el modelo de reacción química entre el o los reactivos en solución y el sólido en la superficie de la reacción o interfase reaccional, y de transferencia de masa de reactivos y productos entre el seno de la solución y la superficie externa de la partícula sólida. Para ambos controles cinéticos la ecuación se logró ajustar bien al modelo propuesto y se determinó que se aproximaba a dos comportamientos: una regresión de segundo orden para los primeros datos y una ecuación lineal para los últimos datos, permaneciendo prácticamente constante en la última parte sin tener mayor influencia en la concentración de cobre del PLS, ya que en los últimos efluentes no se obtenía una extracción de cobre significativa. Por

lo tanto, se determinó que el foco corresponde a la parte cuadrática del modelo donde la extracción de cobre es importante.

Para ello se realizó una simulación con todos los módulos de la pila norte y sur, la cual reafirma el comportamiento similar a un modelo cuadrático y lineal, donde la parte de segundo orden es la más determinante, ya que durante esta etapa que corresponde al 20% de la parte efectiva del ciclo se extrae en promedio alrededor de un 47% del cobre que ingresó al módulo, pues la concentración de cobre del PLS permanece prácticamente constante en los días en que el modelo se comporta de forma lineal. En la Figura 29 se representa el comportamiento de un módulo de la pila norte y de la pila sur seleccionado al azar, ya que todos los demás tienen el mismo comportamiento.

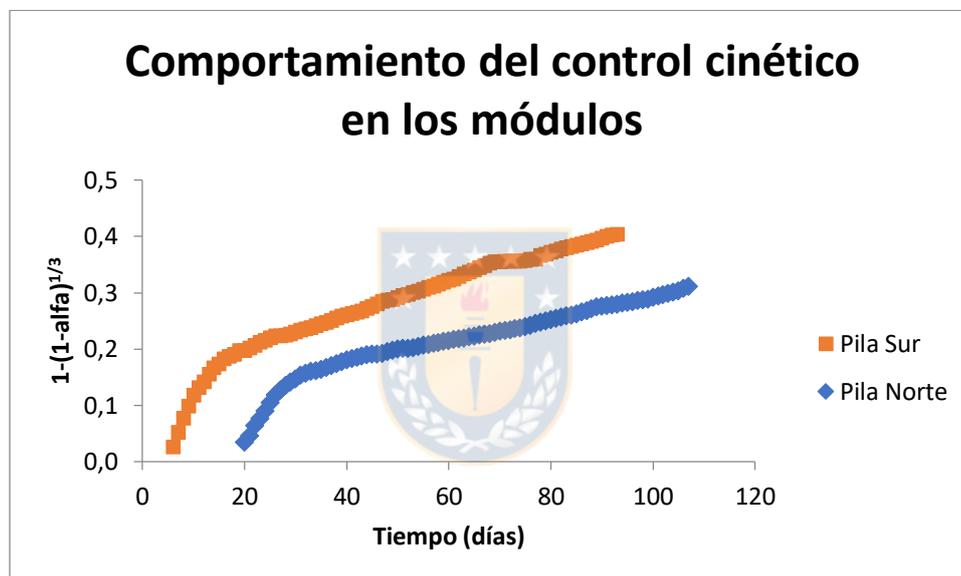


Figura 29. Comportamiento del control cinético en los módulos.

Donde alfa corresponde a la fracción que va reaccionando de cobre y la ecuación $1-(1-\alpha)^{1/3}$ es la representación de la solución del tipo de control cinético en los módulos.

Por lo tanto se puede concluir que en la primera etapa de la lixiviación se extrae mayor cantidad de cobre, y como se había mencionado anteriormente la concentración de cobre del PLS está directamente ligada a las soluciones lixiviantes, se hace necesario evaluar el PDS y refinado como variables críticas, a pesar que para el modelo anterior el software computacional “Design Expert” no establece como variable crítica al PDS, por ello se hace necesario crear una simulación que se ajuste a los cambios que afecta la variabilidad de la concentración de cobre del PLS con cambios en el PDS, lo que conlleva a buscar otro modelo que sí considere la importancia de dicha variable.

A continuación en la Figura 30 se distingue que la concentración de cobre del PLS se encuentra estrechamente relacionada a la concentración de cobre del PDS, confirmando que los ruidos de esta variable afectan rotundamente la concentración de cobre en el PLS, y no tiene mayor influencia con la solución de refino, donde se consideran los datos levantados desde el 1 de marzo del 2019, ya que los antecedentes del mes de febrero se encontraban alterados debido al aluvión acontecido en esa época, hasta el 23 de agosto del 2019, último mes en que se levantaron datos.

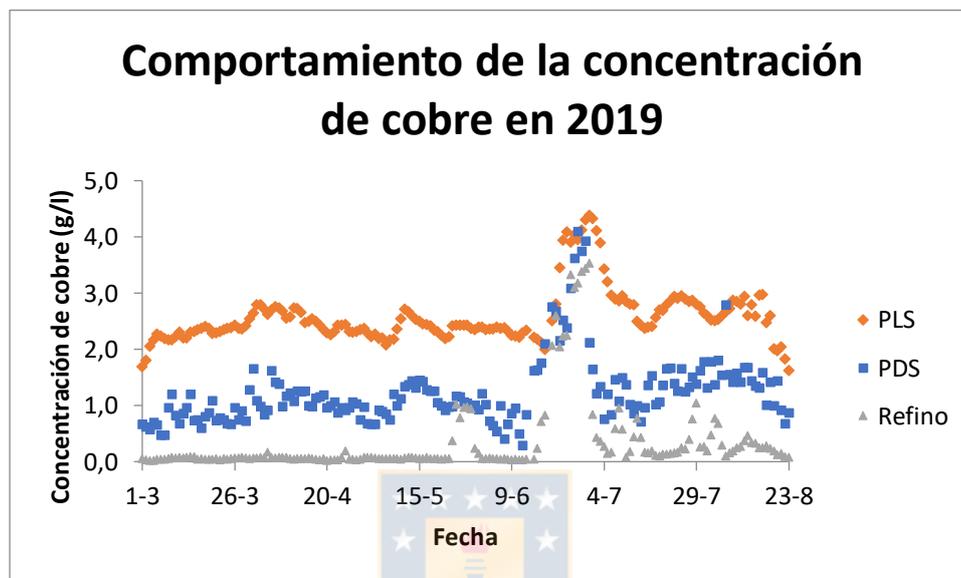


Figura 30. Comportamiento de la concentración de cobre en 2019.

Con las constantes de ambas ecuaciones (cuadrática y lineal) que se consideran antes que el módulo termine de arrojar el cobre, se hizo un análisis con el programa computacional “Design Expert” con los datos previos de la formación de la pila y las soluciones de riego, y posteriormente se obtuvo una relación entre estas variables y las constantes con lo cual se puede predecir el comportamiento que tendrá cada módulo. Con ello también se podrá simular la concentración de cobre en el PLS. A partir de las variables conocidas previas al proceso de lixiviación se determinan las constantes del comportamiento lineal y cuadrático de los módulos, además de la importancia del PDS en el PLS, y teóricamente, el PLS se forma a partir del valor de 70 módulos equivalentes a 70 días, suponiendo que los módulos rompen uno tras otro; por lo tanto, en 70 días se aporta solución al PLS porque solo se puede regar esa cantidad de módulos en simultáneo.

Como ya se demostró que en la primera etapa del ciclo se extrae la mayor cantidad de cobre, donde se tiene un efecto marcado en la recuperación de cobre durante los primeros días del ciclo de lixiviación, lo que también influye en la variabilidad del PLS pues con un 20% del ciclo se llega a extraer casi un 50% del cobre lo que se ve reflejado en un alza en la concentración de cobre, lo

que implica que la recuperación de cobre es significativa y se establece la necesidad de estudiar el efecto de dicha recuperación con las variables de entrada, de este modo se observará si son influyentes para el proceso de lixiviación.

En la Figura 31 se ilustra el comportamiento promedio de la recuperación de cobre en todos los módulos de ambas pilas (norte y sur respectivamente), desde el ciclo de lixiviación 26 hasta 28, donde se descartan los módulos 35, del 43 al 47, 53 y 54 de la pila norte, del 50 a 54 de la pila sur del ciclo 26, los módulos 1, 2, 31, 32, 33, 45, 46, 47 de la pila sur del ciclo 27, los módulos 16, 26, 32, 33, del 44 al 48 de la pila sur del ciclo 28, porque el sistema no rescató antecedentes de la recuperación de cobre para ellos.

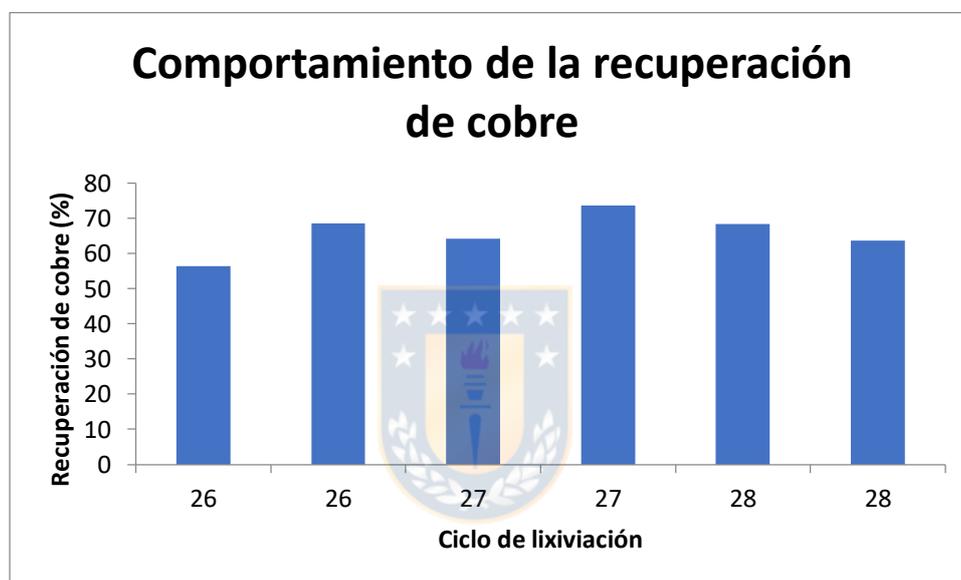


Figura 31. Comportamiento de la recuperación de cobre.

El estándar de riego por el cual se rige la PTMP comienza con el riego ramp up, que consiste en la irrigación de solución lixiviante intermedia o PDS durante 9 días de forma intermitente, donde los 3 primeros días se riegan 6 horas por día, las cuales se distribuyen en 2 horas por turno, en que cada turno dura 8 horas, luego los siguientes 3 días se riegan 9 horas al día distribuidas en 3 horas por turno, y finalmente los últimos 3 días del ramp up se riegan 15 horas al día distribuidas en 5 horas por turno. Luego se realiza el riego continuo con la misma solución de PDS, este se lleva a cabo por 44 días, para continuar con el riego intermitente con solución de refinación, donde se riega un día y se reposa el día siguiente, así se continúa por 45 días, y finalmente se riega con agua durante un día para lavar el módulo.

Se realizó un análisis para evaluar el cumplimiento del estándar de riego recién mencionado, donde se seleccionaron 12 módulos de cada pila al azar para comparar el comportamiento real de

ellos con lo establecido en dicho estándar, donde se obtuvo un ramp up que fluctúa entre 5 a 6 días, y en solo un módulo de los 24 analizados se cumplió el riego programado durante 9 días.

Además con respecto al riego continuo se tiene un mejor control, ya que la mayoría de los módulos estudiados cumplen con los 44 días estipulados, sin embargo este se ve interrumpido al menos en 8 módulos por detenciones, mantenciones o imprevistos inesperados, que perjudican la operación, y finalmente para el riego intermitente se estipula una muy mala operación, ya que son muy pocos los módulos que cumplen esas 24 horas tanto de riego como de reposo, en general son menos las horas de riego efectivo, incluso se encuentra entre 5 y 9 días, siendo muy inferior a los 45 días estipulados en el estándar, ya que operacionalmente siempre están adelantando el sistema, o sea efectúan un riego en menos días de los programados y finalmente con ello no logran extraer el cobre ocluido, ya que no permiten una completa interacción entre el ácido sulfúrico y los rípios, lo que se corrobora en la Figura 33 en que se observa que el PLS tiene un comportamiento similar al PDS.

Lo anterior está directamente relacionado con el consumo de ácido en la pila de lixiviación, ya que el gráfico representa el ácido que no reaccionó en el proceso, además se sabe que el ácido sulfúrico concentrado tiene un alto precio y es esencial en el proceso de lixiviación, pues sin este insumo se hace imposible la penetración en los glómeros para poder extraer el cobre que se encuentra ocluido en ellos, lo que indica que es sumamente crítico el control de este aditivo, sin embargo actualmente en la GEL no llevan un control exhaustivo del consumo real de ácido sulfúrico en la pila, debido a que por costumbre y experiencia adicionan entre 12 y 14 g/l, también es importante mencionar que cada vez se hace más escasa la generación de este insumo debido a que las plantas de ácido pertenecientes a la fundición no se encuentran operativas de manera constante, escasez que, con la nueva normativa medio ambiental, restringe la emisión de azufre y arsénico en el país. Con respecto a la siguiente representación se observa que al inicio el consumo de ácido sulfúrico concentrado fue mayor, con lo cual la recuperación de cobre es alta lo que es obvio, luego en la segunda parte disminuye en consumo de este insumo y también cae la recuperación de cobre, lo que indica que en los últimos módulos no se extrajo tanto cobre y se atribuye a una mala operación en terreno, ya que no permiten que el ácido esté el tiempo necesario en el interior de la pila y adelantan el lavado de la misma, con lo cual frenan la interacción entre el ácido y el glómero impidiendo la extracción de cobre ocluido.

En las Figuras 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 y 39 se ordenaron los valores de la recuperación de cobre de manera ascendente, también se organizaron los valores de cada una de las variables asociadas con la respectiva recuperación de cobre, el objetivo del orden mencionado es evaluar el

efecto que tiene cada variable con dicha recuperación, además se representan los módulos mediante puntos discretos que representan la tendencia de estos.

En la Figura 32 se aprecia que al incrementar la diferencia entre el ácido que ingresa y sale de la pila aumenta la recuperación de cobre, lo que implica que hay una relación directa entre ellas. Sin embargo con un aumento excesivo en la adición del reactivo las moléculas de ácido sulfúrico se entorpecen para reaccionar con el cobre, esto significa que en vez de encontrarse con el cobre se encuentran con otras moléculas de ácido. Finalmente, de acuerdo a la Figura 32, existe un óptimo de adición que se establece en los 13 g/l de ácido sulfúrico, pues con una cantidad mayor de ácido se ve afectada la cinética de reacción que conlleva a tener una menor extracción de cobre.

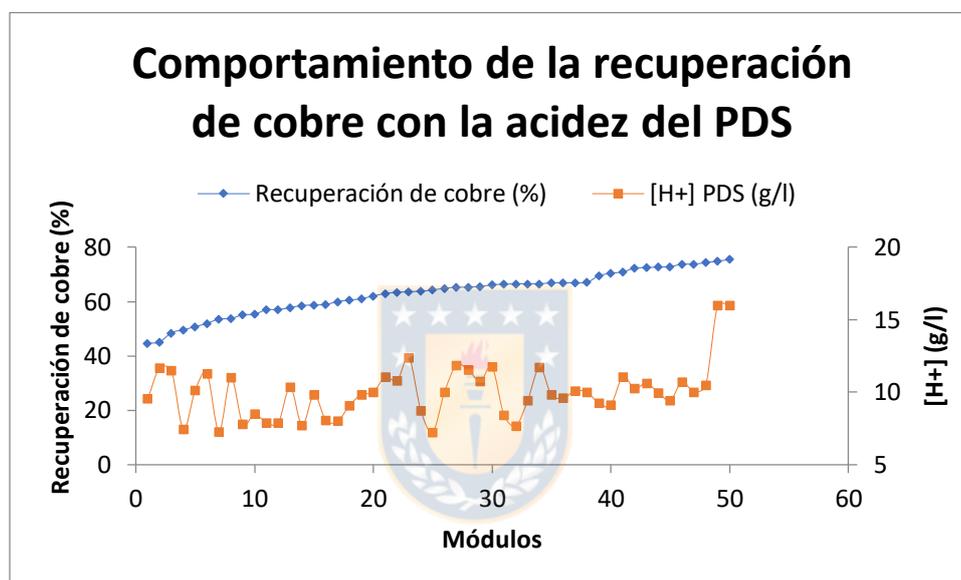


Figura 32. Acidez del PDS y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

Se puede observar en la Figura 33 que la concentración de cobre del primer efluente es significativa para la recuperación de cobre, ya que cuando disminuye la concentración de cobre del primer efluente también existe una caída en la recuperación de cobre, por ende se comportan de forma directa. Por esta razón la primera etapa del ciclo de lixiviación será influyente en la recuperación global de cobre del módulo, por lo que se debe hacer hincapié en optimizar las variables que actúan en esta etapa para poder maximizar la recuperación.

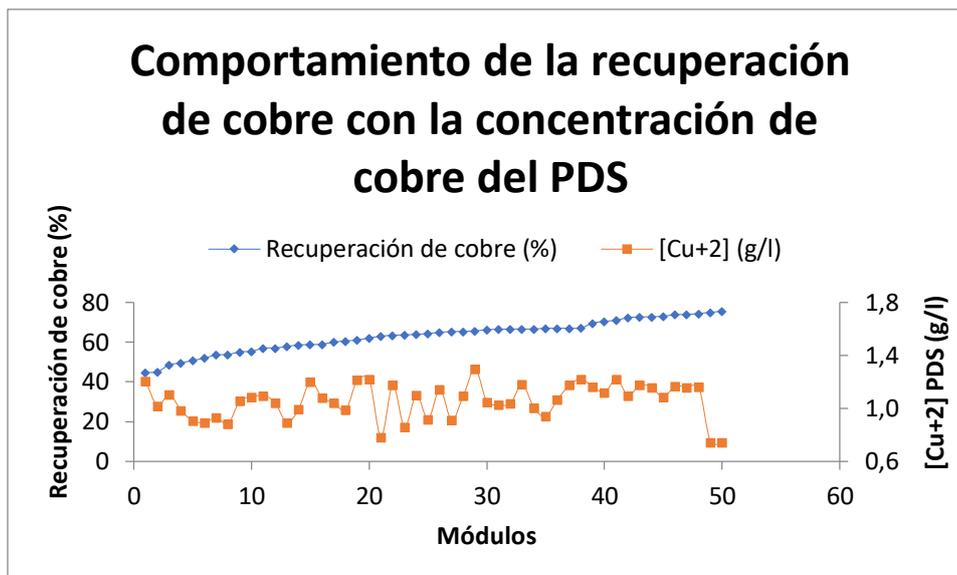


Figura 33. Concentración de cobre del PDS y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

Para evaluar qué variables del primer ciclo de lixiviación son más influyentes en la recuperación de cobre se utiliza el programa “Design Expert” ingresando los datos depurados de la concentración de cobre y acidez del PDS, tiempo en días en que se obtiene el primer efluente de la pila, la granulometría de los glómeros que conforman la pila, dentro de los cuales se encuentra el ¾”, ½”, ¼”, 10#, 50#, 100#, 200# y -200#, la masa húmeda en tonelaje, los 3 ciclos del ramp up en días, que se separan en 6x18, 9x15 y 15x9 horas de riego y reposo respectivamente, la razón de lixiviación, la altura de apilamiento, la ley de cobre, la razón de curado y de agua, donde sólo algunos de estos parámetros son significativos para la recuperación de cobre y ellos son los que se muestran en las imágenes que se presentan a continuación.

En la Figura 34 se aprecia la manera en que afecta la granulometría ¾” en la recuperación de cobre, donde se observa un comportamiento directo en que ambas disminuyen con el avance de los módulos, siendo más pronunciado el descenso para el tamaño de partícula que para la recuperación, donde con una granulometría mayor al 4% se obtiene una mayor recuperación.

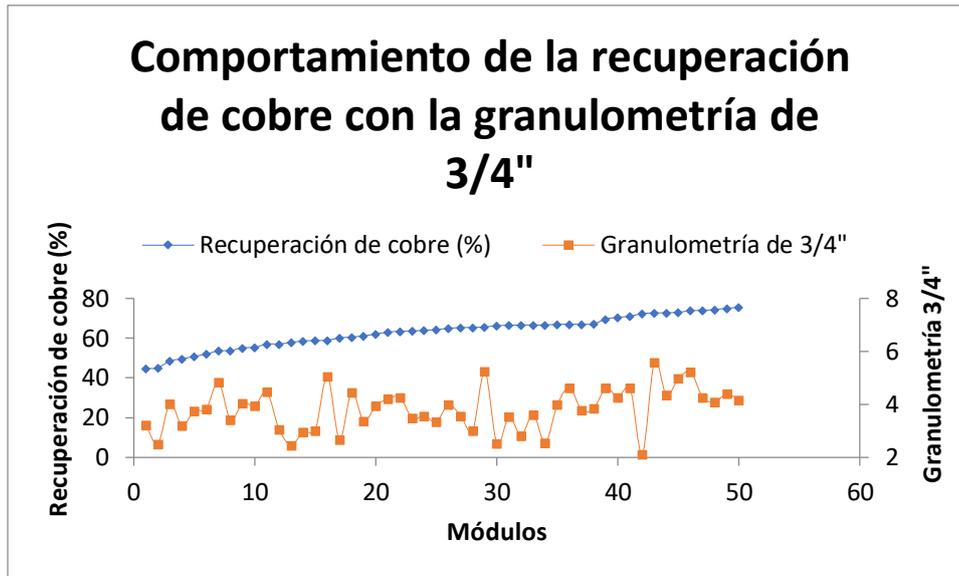


Figura 34. Granulometría 3/4" y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

A continuación en la Figura 35 se observa que la granulometría de +1/4" tiene un comportamiento inverso con la recuperación de cobre donde al aumentar dicho tamaño de partícula disminuye la recuperación de cobre. Esta granulometría corresponde al porcentaje que quedó en la malla de 0.25", además se aprecia que para tener una mayor recuperación de cobre se debe tener una malla menor al 23%.

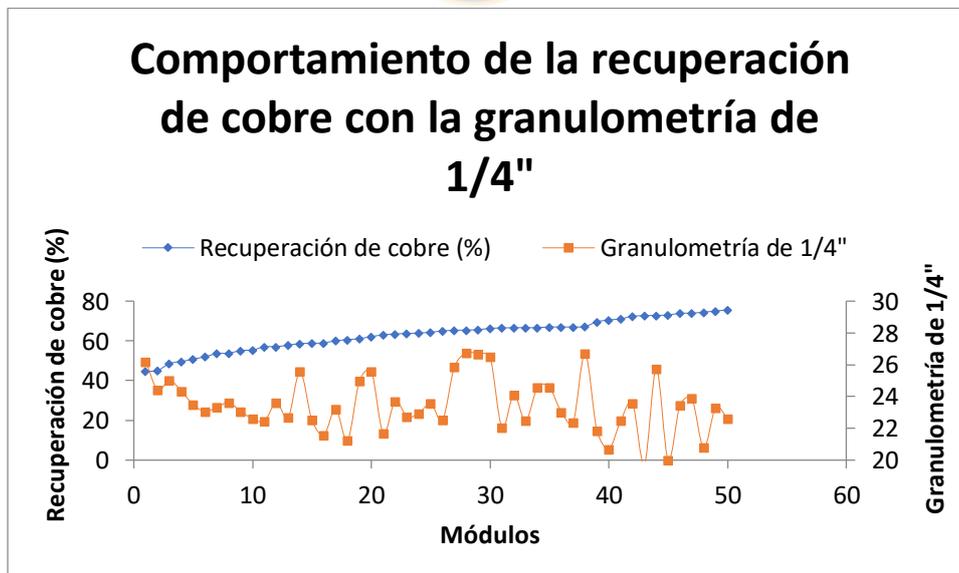


Figura 35. Granulometría 1/4" y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

En la Figura 36 se aprecia la relevancia de la granulometría de 200# en la recuperación de cobre, donde al principio ambas se mantienen prácticamente constantes, luego cuando el tamaño de partícula disminuye también desciende la recuperación, y al aumentar la granulometría también aumenta la recuperación, lo que significa que tienen un comportamiento directo, luego la recuperación de cobre no tiene alteraciones aún con la variación de la granulometría de 200#.

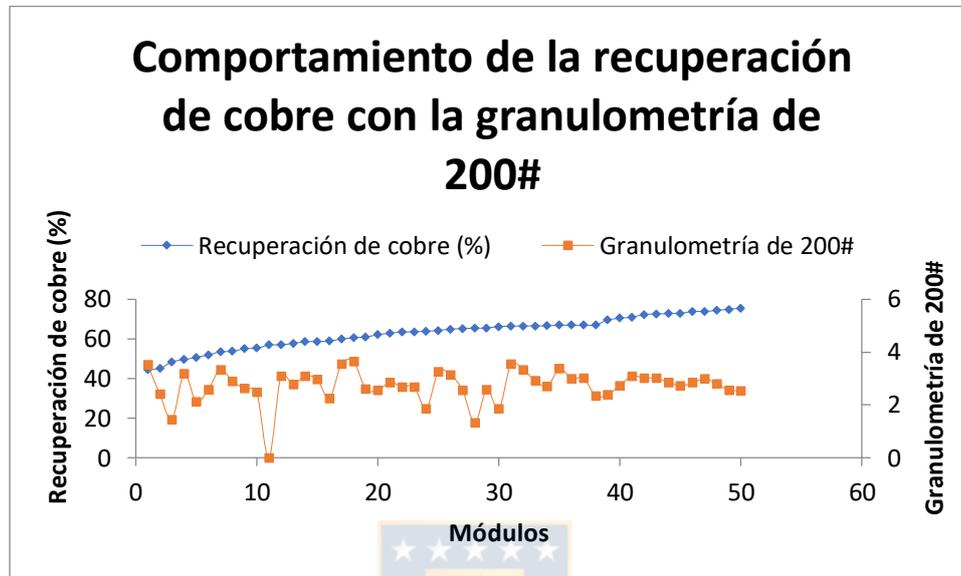


Figura 36. Granulometría 200# y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

En la Figura 37 se distingue que la razón de agua es significativa para la recuperación de cobre, debido a que cuando la razón de agua es menor a 20 kg de agua por tonelada de mineral seco la recuperación es mayor al 70%, mientras que si la razón de agua es mayor a 20 kg de agua por tonelada de mineral seco la recuperación de cobre disminuye a cerca del 60%, lo que indica que tienen un comportamiento inverso, además se requiere un ácido sulfúrico concentrado para lograr agrietar los glómeros y penetrar su superficie, por ende al aumentar la razón de agua se disuelve parte de este ácido impidiendo la extracción del cobre ocluido, por ende es razonable que exista un descenso en la recuperación de cobre.

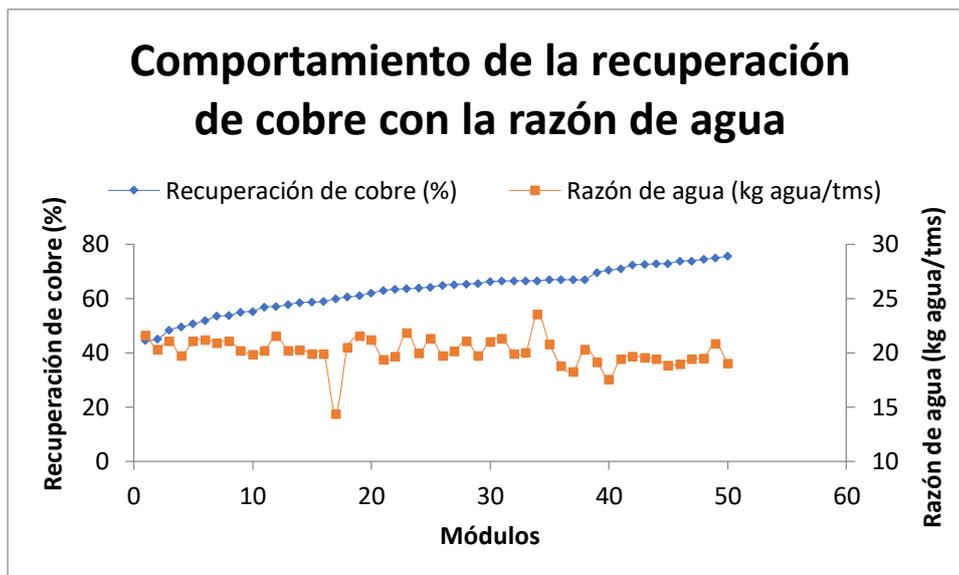


Figura 37. Razón de agua y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

Antes de analizar la Figura 38 es necesario mencionar que al principio la GEL trabajaba con una tasa de curado fija de 12 kg de ácido por tonelada de mineral seco, pero luego en el transcurso del presente estudio se aumentó a 14 kg de ácido por tonelada de mineral seco, ya que se percataron que la cantidad de ácido sulfúrico concentrado adicionada no era suficiente, sin embargo lo que se puede apreciar en el gráfico anterior es que la recuperación de cobre es baja tanto para 12 kg ácido/tms como para 14 kg ácido/tms, y la tasa de curado con que se obtiene una mayor recuperación de cobre es cercana a los 13 kg ácido/tms, por ende este valor es el apropiado para trabajar bajo las mismas condiciones en que se encontraba la planta.

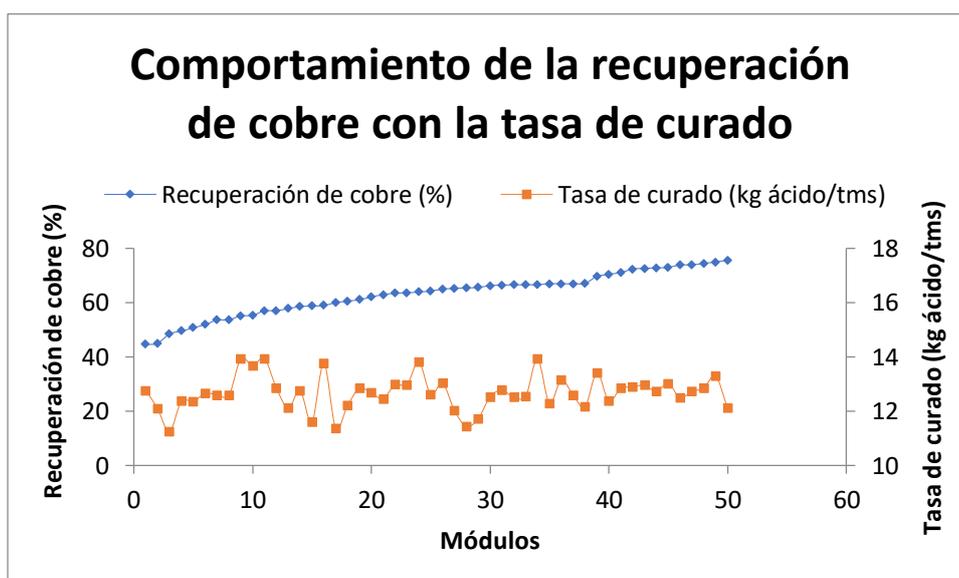


Figura 38. Tasa de curado y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

En la Figura 39 se observa la importancia de la masa en la recuperación de cobre, ya que mientras esta variable fluctúa entre 40000 y 450000 tonH la recuperación de cobre es alta, pero al sobrepasar las 450000 tonH la recuperación disminuye incluso a menos del 60% en algunos casos, con lo cual se puede asegurar que si se incrementa la masa es necesario cambiar otras variables en la lixiviación en pilas para mantener la recuperación óptima, como por ejemplo: aumentar el tiempo de lixiviación para que llegue a extraer la cantidad de cobre necesario, y de este modo evitar el descenso mencionado.

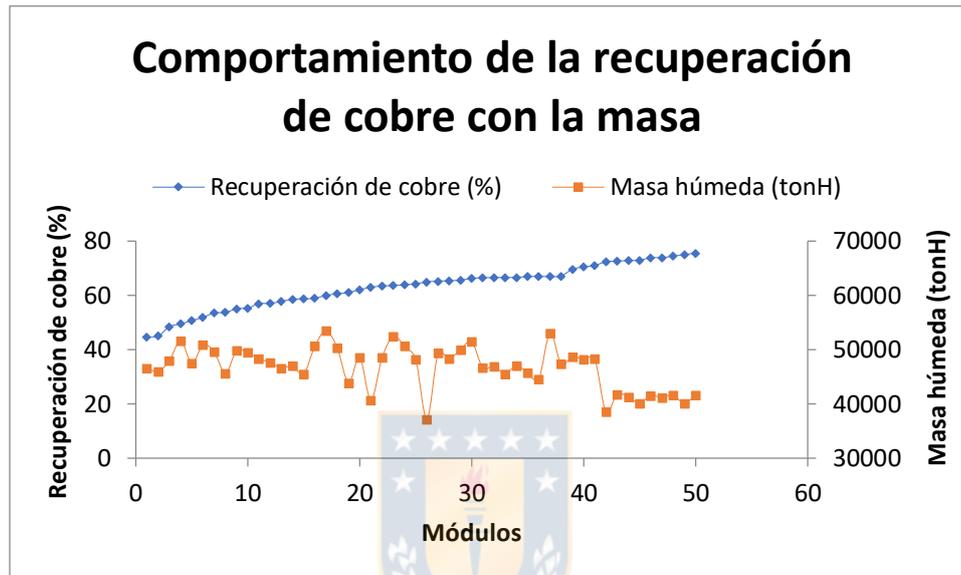


Figura 39. Masa húmeda y recuperación de cobre por módulo del último ciclo de lixiviación.

Ahora con el software “Design Expert” se determinó que las variables más significativas para la recuperación de cobre corresponden a: la concentración de cobre y acidez del PDS, el tiempo en que se demora en salir el primer efluente, la masa húmeda, la ley de cobre total, la tasa de curado, la razón de agua, los tamaños de partículas de 50, 200 y -200 #, la concentración de cobre y acidez del primer efluente, con una cercanía del 0.6536 correspondiente a la proximidad del modelo simulado, como se distingue en la Figura 40.

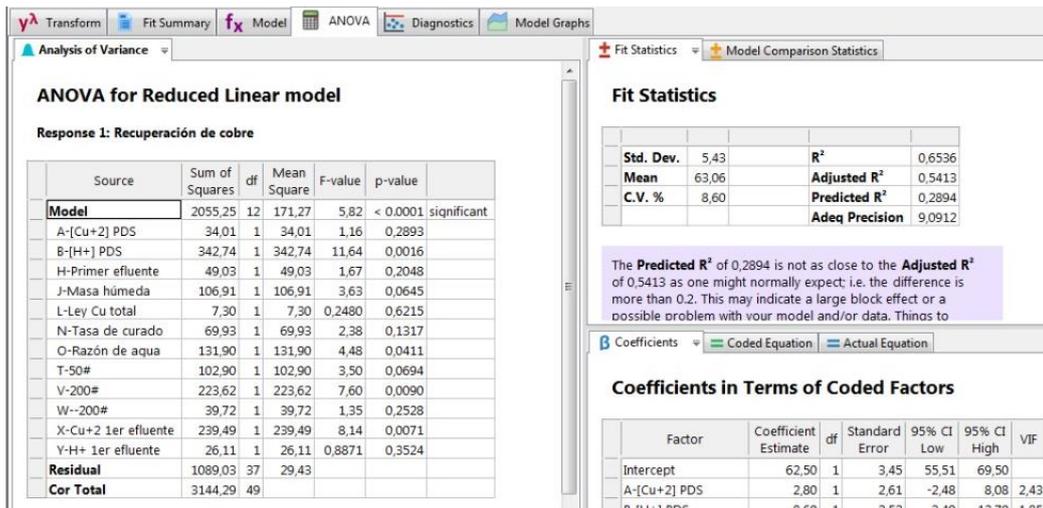


Figura 40. Variables significativas de "Design Expert" para la recuperación de cobre.

A continuación en las Figuras 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51 y 52 se muestran las gráficas de las variables recién mencionadas con respecto a la recuperación de cobre, donde se observa la relación o comportamiento entre ambas.

En la Figura 41 se aprecia que la recuperación tiene una relación directa con la concentración de cobre del PDS, donde esta variable fluctúa entre 0.7 y 1.4 g/l, además con el aumento de 9.74% la concentración de cobre del PDS la recuperación tiene un alza de 52.9%.

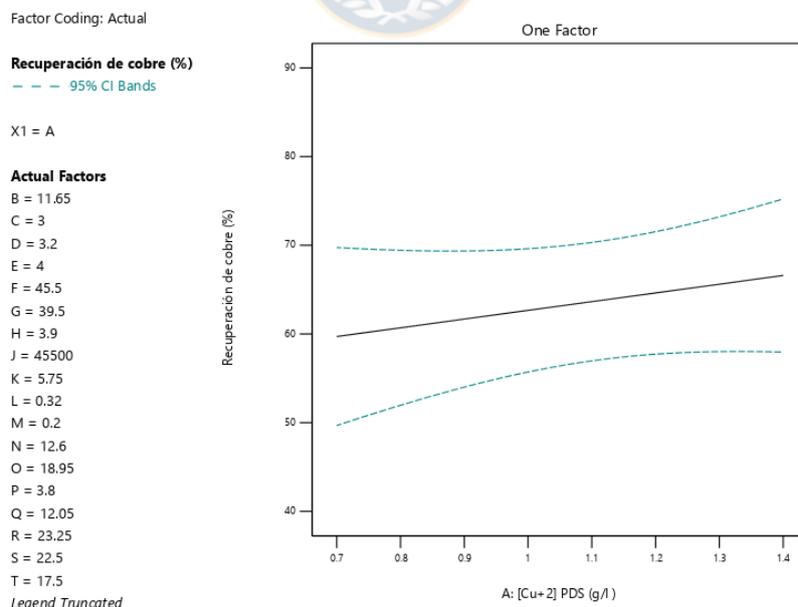


Figura 41. Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del PDS.

En la Figura 42 se distingue el comportamiento de la acidez del PDS con la recuperación de cobre, donde operacionalmente la concentración de ácido sulfúrico del PDS se mueve entre 7.2 y 16.1 g/l, además la relación entre ambas establece que con un aumento del 1.95% de la concentración de cobre en el PDS incrementa la recuperación de cobre en 40.5%.

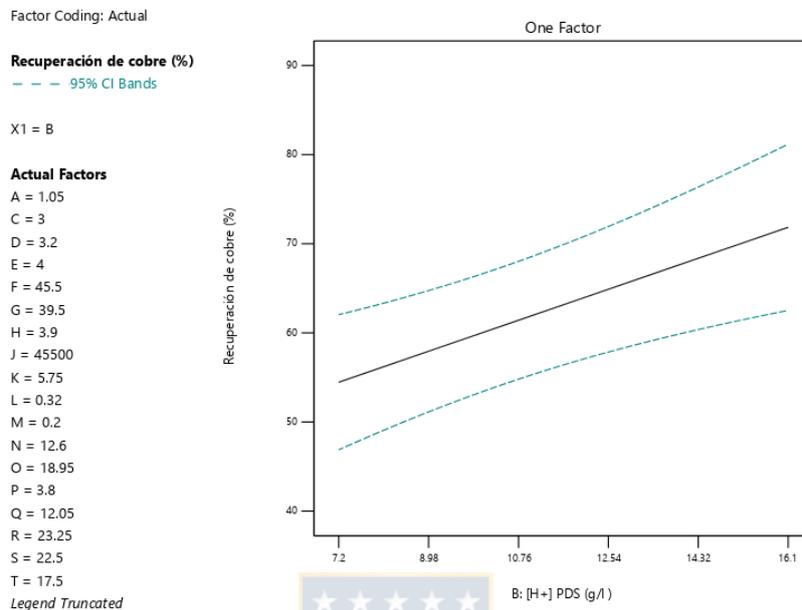


Figura 42. Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del PDS.

En la Figura 43 se aprecia el comportamiento del tiempo que se demora en romper el módulo con la recuperación de cobre, donde dicho parámetro fluctúa entre 1 y 7 días, y con el aumento de 1.08% de los días en que revienta el módulo incrementa la recuperación de cobre en 58.95%.

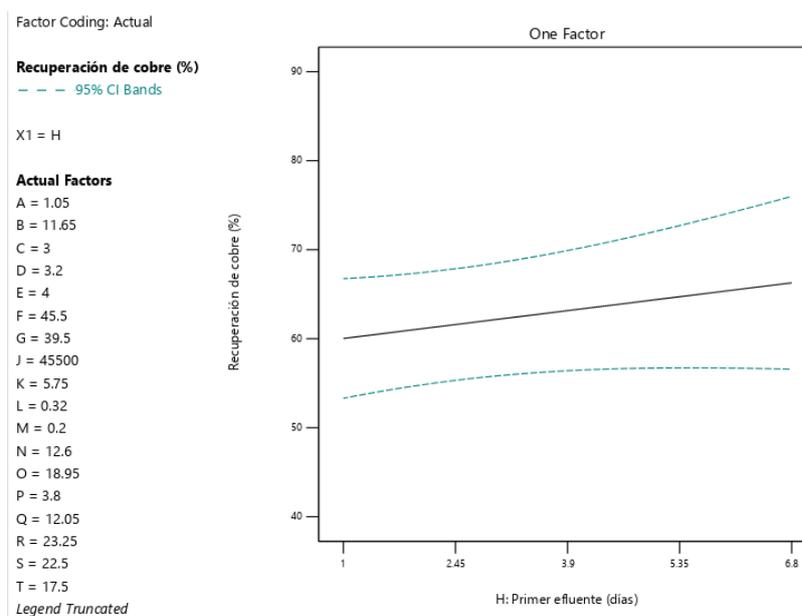


Figura 43. Comportamiento de la recuperación de cobre con el tiempo del primer efluente.

En la Figura 44 se observa la relación inversa que existe entre la masa húmeda y la recuperación de cobre, donde para un aumento de 83.46% esta última se debe disminuir 0.0004% la masa húmeda apilada, además esta fluctúa entre 37000 y 54000 toneladas.

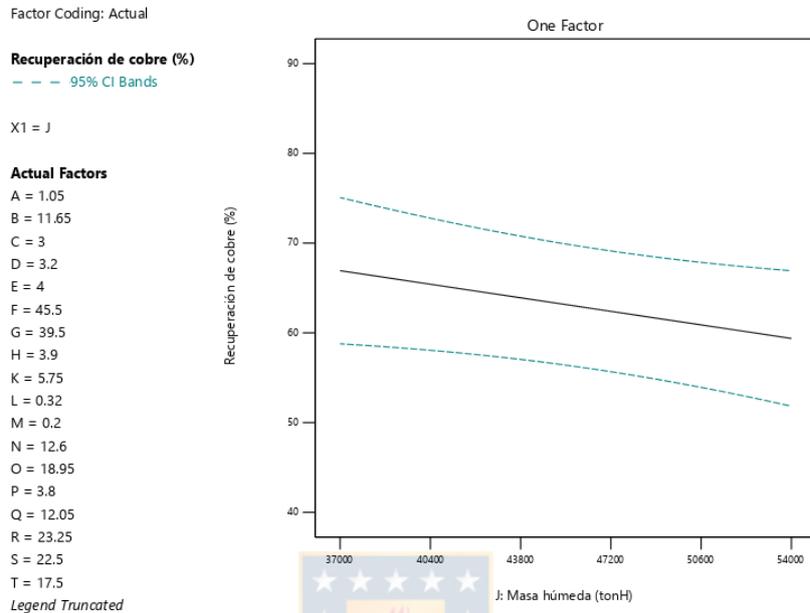


Figura 44. Comportamiento de la recuperación de cobre con la masa húmeda.

En la Figura 45 se aprecia la relación entre la ley de cobre total y la recuperación de cobre que tienen una relación inversa, donde la ley de cobre total se mueve entre 0.2 y 0.44, además con la disminución de un 16.3% de dicha ley la recuperación aumenta un 68.36%.

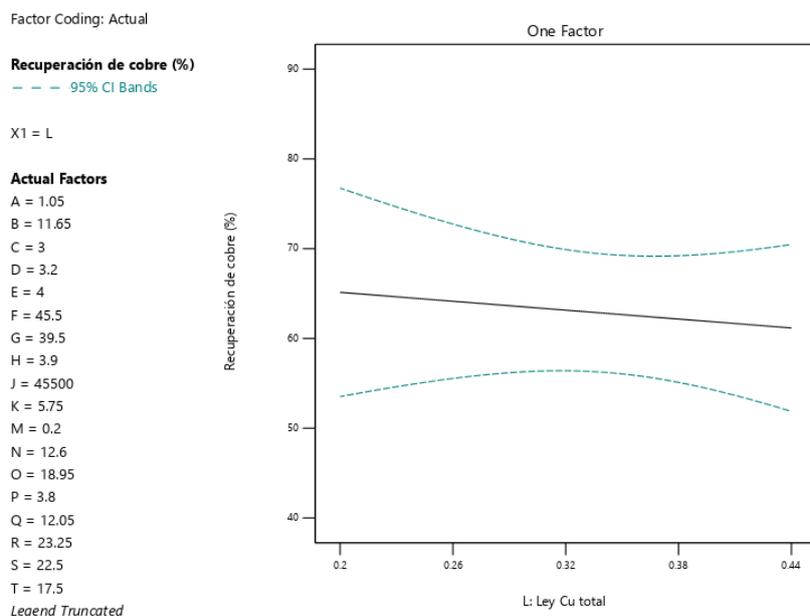


Figura 45. Comportamiento de la recuperación de cobre con la ley de cobre total.

En la Figura 46 se distingue el comportamiento de la tasa de curado con la recuperación de cobre en que tienen una relación directa, donde con un incremento de la tasa de curado en 2.23% la recuperación de cobre aumenta en 35.09%, además el rango en que fluctúa la tasa de curado es de 11.2 a 14 kg ácido/tms.

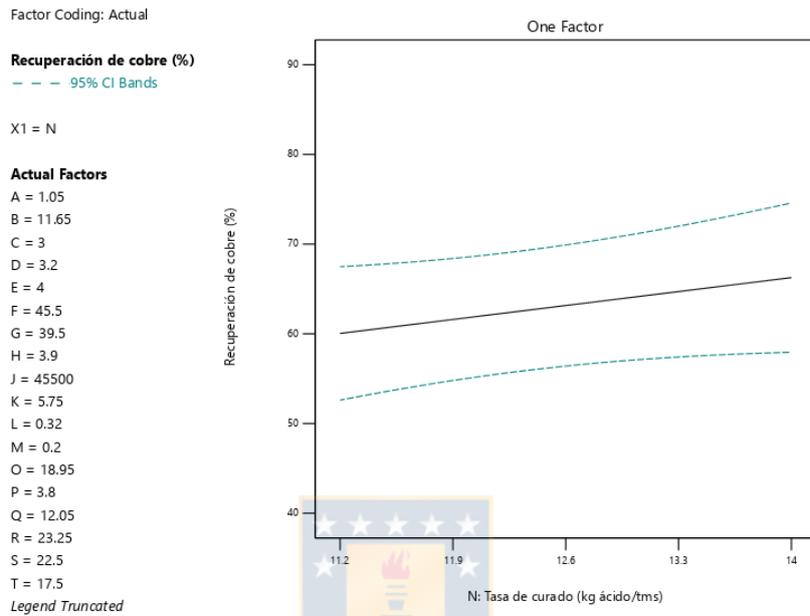


Figura 46. Comportamiento de la recuperación de cobre con la tasa de curado.

En la Figura 47 se observa que existe una relación inversa entre la recuperación de cobre y la razón de agua, donde con un descenso en 1.5% de la razón de agua la recuperación incrementa en 91.62%, además la razón de agua fluctúa entre 14.3 y 23.6 kg agua/tms.

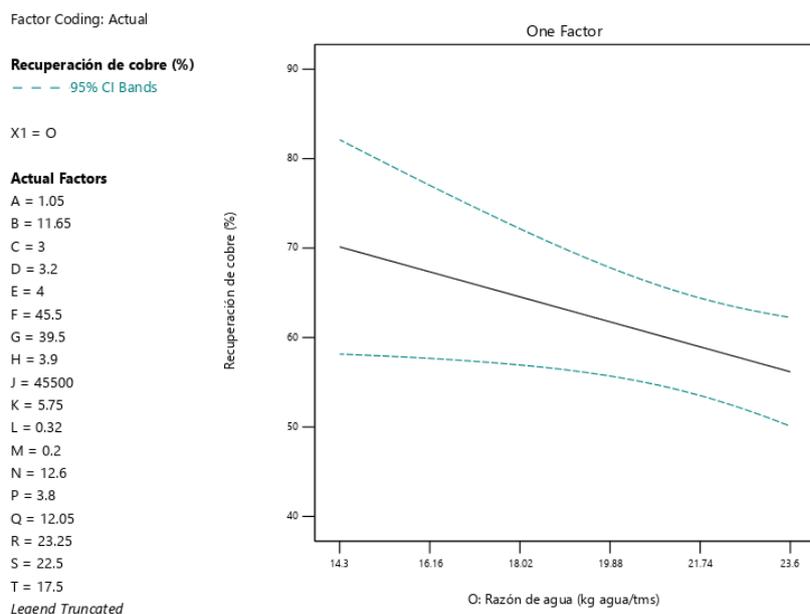


Figura 47. Comportamiento de la recuperación de cobre con la razón de agua.

En la Figura 48 se aprecia el comportamiento de la granulometría de 50# con la recuperación de cobre, donde dicha granulometría se mueve entre 0 y 35%, y con una disminución del 0.54% de la granulometría de 50# incrementa un 72.61% la recuperación de cobre.

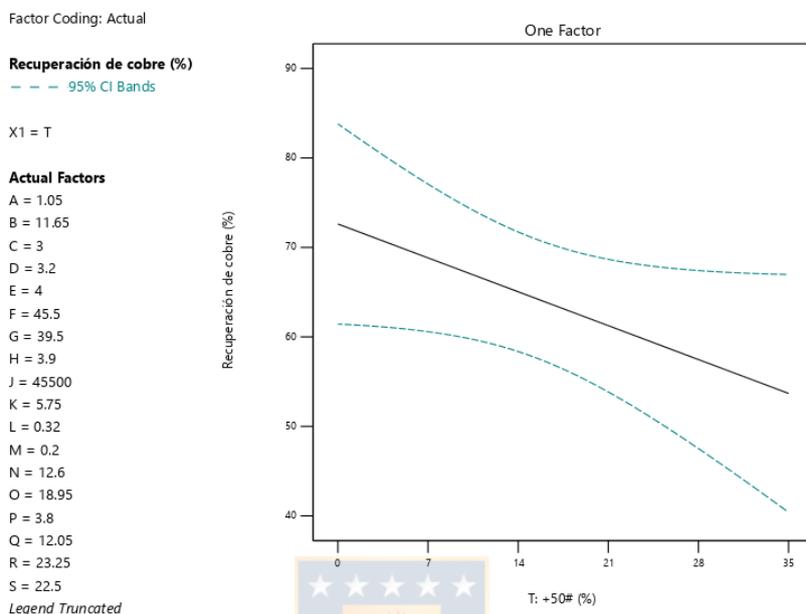


Figura 48. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 50#.

En la Figura 49 se distingue que la relación entre la granulometría de 200# y la recuperación de cobre es directa, donde la granulometría fluctúa entre 0 y 3.7%, además con el ascenso de 4.67% de la granulometría 200# la recuperación de cobre incrementa 54.55%.

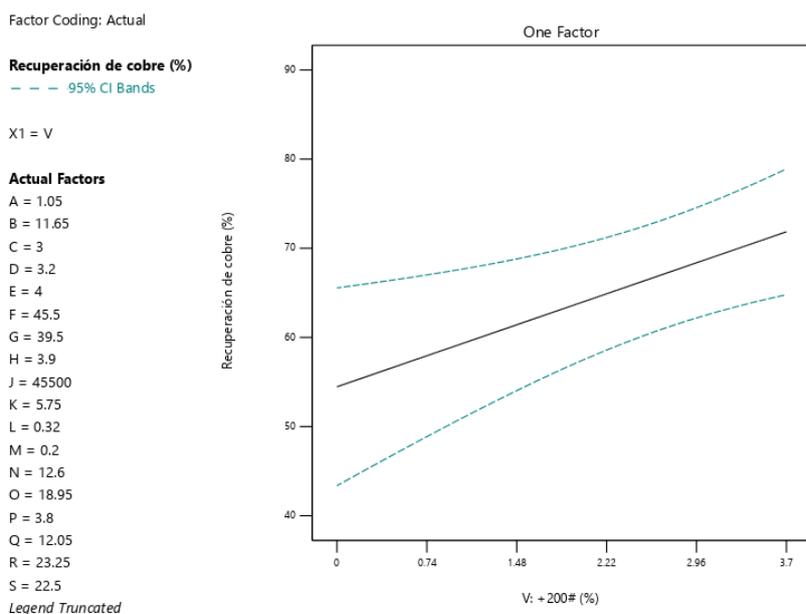


Figura 49. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 200#.

En la Figura 50 se observa un comportamiento directo entre la recuperación de cobre y la granulometría de -200#, la cual fluctúa entre 0 y 32.7%, donde con un aumento de 4.3% de la granulometría -200# incrementa la recuperación de cobre en 57.9%.

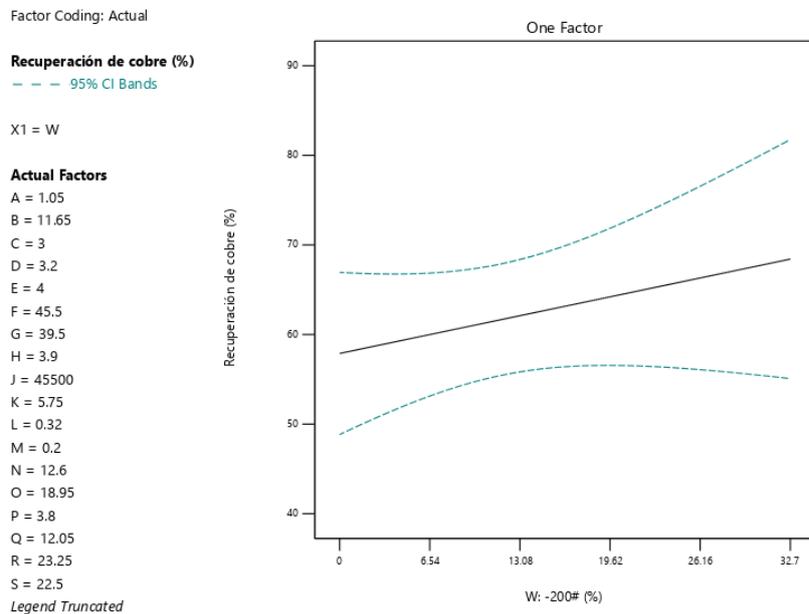


Figura 50. Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de -200#.

En la Figura 51 se observa el comportamiento inverso de la acidez del primer efluente con la recuperación de cobre, además con un descenso de 0.6% de la acidez del primer efluente aumenta un 66.1% la recuperación de cobre y el rango de dicha acidez fluctúa entre 0.6 y 9.2 g/l.

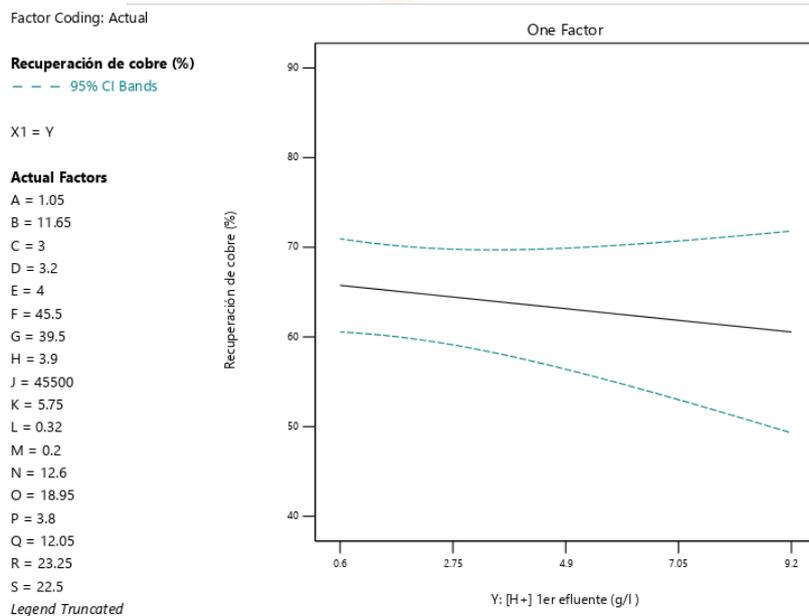


Figura 51. Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del primer efluente.

En la Figura 52 se aprecia la relación directa entre la concentración de cobre del primer efluente y la recuperación de cobre, donde con un alza de 0.9% de dicha concentración la recuperación aumenta un 50.88%, además dicha concentración fluctúa entre 0.6 y 9.2 g/l.

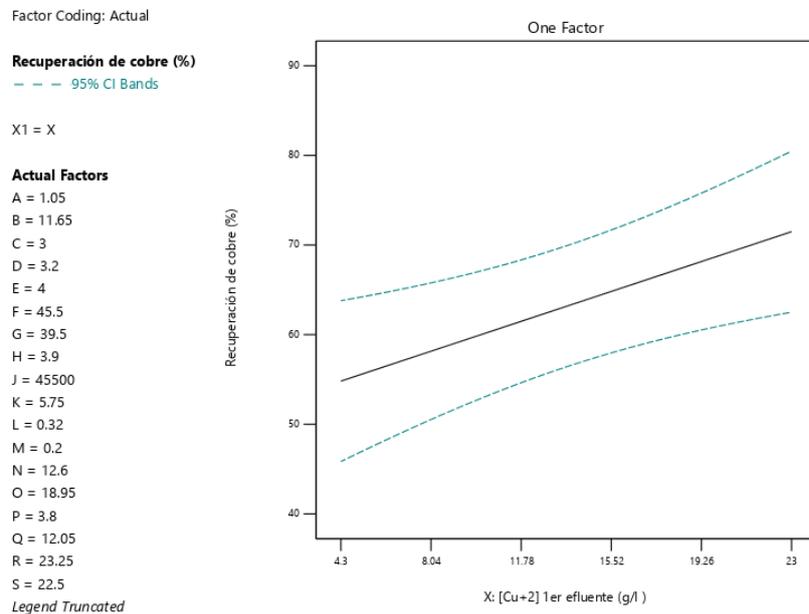


Figura 52. Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del primer efluente.

Finalmente, el modelo logró aproximar la predicción a la concentración real de cobre en el PLS, a pesar que faltaba una cantidad considerable de datos para poder iterar de forma más exacta y no poseer las herramientas necesarias para desarrollar un modelo estadístico sofisticado, se puede apreciar en la siguiente imagen que se aproxima bien en los últimos datos la concentración de cobre del PLS y de esta forma al continuar retroalimentando diariamente el sistema con datos seguirá la misma tendencia del cobre en el PLS real, esta retroalimentación explica el comportamiento del PLS simulado en la gráfica donde parte cuando rompe un módulo con una alta concentración, pero luego con el avance del tiempo va disminuyendo su concentración, además se determinó que la concentración de cobre del PLS depende específicamente de lo que se le ingresa en el riego a través de la suposición que se comporta como una caja negra, en que se considera desde que rompen las pilas sale lo mismo que ingresa. Considerando que el flujo de riego se establece como $40\text{m}^3/\text{h}$, se omiten los 3 primeros días desde que rompe el módulo, ya que el flujo que abandona la pila es poco en comparación a cuando el flujo se hace constante, y son 70 días de extracción real de cobre, ya que los días anteriores corresponden a valores con muy baja concentración de cobre y se recircula al sistema; sin embargo, aún con esas condiciones el modelo se aproxima de buena manera el PLS real, como se aprecia en la Figura 53.

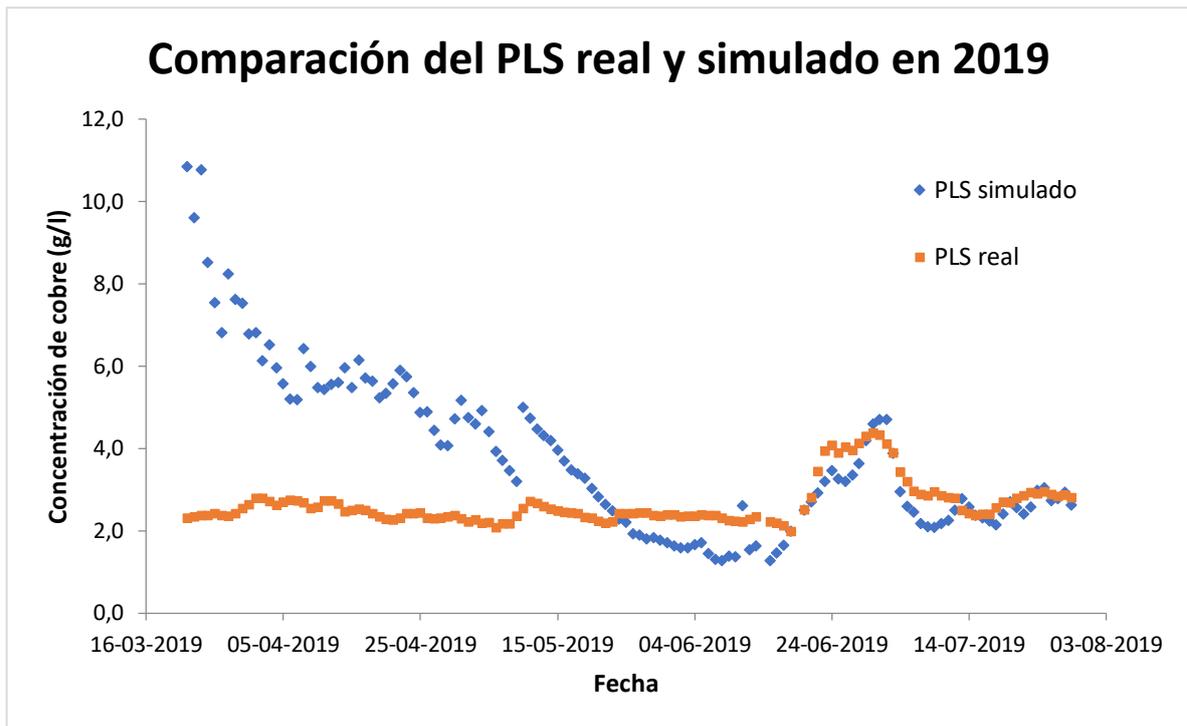


Figura 53. Comparación del PLS real y simulado en 2019.



6. CONCLUSIÓN

A partir de la investigación realizada se puede concluir que con respecto al estándar de riego que tiene la planta, este no se lleva a cabo correctamente, puesto que para el ramp up que debieran ser 9 días, este se realiza en mayor o menor cantidad, el riego continuo si se efectúa en los 44 días estipulados, pero el riego intermitente (ON/OFF) no se desarrolla de forma correcta, con menos días de lo que se establece en el estándar, el lavado tampoco se realiza de acuerdo a lo establecido incluso en varios módulos no se realiza el lavado. Con el reposo sucede lo mismo, lo que perjudica la extracción de cobre, ya que esta manera de operar impide que el ripio reaccione con el ácido sulfúrico pues solo humecta una parte del lecho que conforma la pila.

La concentración de cobre en el PLS se encuentra estrechamente relacionada al efecto del PDS, específicamente de su concentración de cobre, también se relaciona con la irrigación de la parte inicial del ciclo de lixiviación de cada módulo, la granulometría y la fracción de cobre que reacciona.

Con respecto al cobre extraído, este depende del ácido adicionado, pero existen dificultades técnicas y condiciones operacionales que no permiten trabajar con el rango óptimo de ácido sulfúrico concentrado; sin embargo, es posible fijar la tasa de curado en 13 kg ácido/tms para tener una mayor recuperación de cobre.

Las variables críticas para optimizar la recuperación de cobre en la planta son: la concentración de cobre y acidez del PDS y del primer efluente, la masa con que se efectúa el apilamiento, la granulometría, la tasa de curado y la razón de agua, de las cuales solo se puede controlar operacionalmente la masa de apilamiento que debe estar cercana a 40000 tonH, la tasa de curado y la razón de agua debe aproximarse a los 19 kg agua/tms.

Se concluye que se obtuvo un modelo provisorio para simular la concentración de cobre en el PLS, el cual se logró ajustar al valor real dado que tiene un error promedio de 6.4% para los últimos 16 datos, donde a medida que aumenta la cantidad de antecedentes almacenados dicho error disminuirá considerablemente, pues existe esa tendencia que no está relacionada con los ruidos del sistema, o variación en los parámetros determinantes para la respuesta que es la concentración de cobre en el PLS.

7. RECOMENDACIONES

Mediante la investigación que se realizó en la GEL se sugiere instalar tubos magnéticos en las bombas ubicadas en la recirculación y piscina de emergencia de la PTMP, con el objetivo de establecer cuando se está perdiendo eficiencia en el sistema.

En la estación de reimpulsión booster, impulsión del área 700, estación de refino óxido, y en todos los sectores donde se utilicen bombas, se recomienda trabajar de forma dinámica de modo que se intercale la operación y siempre quede al menos una bomba no operativa a la cual se le realice mantenimiento, para que de esta manera todas las bombas pasen operativas un tiempo y en mantenimiento cuando no estén activas.

Dado que la corriente principal corresponde al PLS, se debe comenzar por renovar los sistemas de medición respectivos (700FIT004 correspondiente a la línea 2 de PLS, 705FIT003 que está expuesto a altas temperaturas, donde los sensores externos se encuentran descalibrados, y por ello no registra de manera fidedigna los datos), posteriormente se continúa con los caudales correspondientes al refino y PDS, entre ellos se encuentran: 700FIT007 (alimentación de refino), 705FIT001B (refino que baja desde el tren A y su inyección), 705FIT712 (descarte o bajada del PMT), 700FIT0041 (alimentación principal para los módulos, lo que permitiría determinar el PDS de riego real a las pilas). Además se recomienda invertir en un flujómetro y tubo magnético en el sector de la rampa 67 del tren A de refino, debido a que se pierde demasiado tiempo intentando de regularlos; también en los drenajes hacia los puntos bajos.

Se sugiere realizar un estudio detallado de la aglomeración de esta mezcla de ripios, debido a que la mineralogía indica que se tiene una diversidad importante de compuestos, que se podría conocer su comportamiento por separado, pero para la mezcla realizada es muy difícil predecir su comportamiento, este análisis debe considerar al menos el tiempo de residencia efectivo en cada tambor aglomerador, la velocidad de giro en rpm, la adición de ácido y agua, ángulo de inclinación de los tambores y la calidad del glómero formado, de esta manera no sólo se podrá conocer el tipo de partícula con la que se realiza el apilamiento, sino que también la efectividad de la lixiviación realizada, ya que los ripios con los cuales se trabaja hoy en día en la planta tienen una granulometría demasiado fina, y la comparación del tamaño de partícula previo y posterior al proceso de aglomeración debiera mejorar considerablemente la recuperación metalúrgica e incluso podría reducirse el tiempo de lixiviación, puesto que mejora la permeabilidad del lecho en las pilas favoreciendo la percolación del fluido y aumentaría la cinética de extracción de cobre en las pilas.

Se aconseja habilitar el tiempo en que tienen operativos los caudales en el sistema operacional de la consola, ya que de este modo es posible identificar el comportamiento en el tiempo, o sea su ascenso o descenso en caso de las diferentes eventualidades que ocurren frecuentemente en el proceso, en las pilas específicamente se tienen cárcavas, deslizamiento de taludes, arrastre de sólidos, entre otros. A la vez se podría crear una planilla en PI similar a las que tienen en consola, que permita saber si el riego se realiza con PDS o refino desde un módulo a otro, o también podría ser el estado en que se encuentran dichos módulos, por ejemplo del módulo 13 al 21 se encuentran en riego continuo.

Se recomienda realizar una macro que ingrese automática y instantáneamente los datos a Excel para evitar subir de forma manual los mismos, esto se debe dar a través de un botón en el mismo programa computacional (Microsoft Excel), además de esta manera la modelación gráfica comparativa de la concentración de cobre en el PLS se determinaría de forma inmediata sin necesidad de ir graficando los nuevos valores.

Se sugiere realizar un análisis del grado de sulfatación de la mezcla de ripios con la que se realiza la aglomeración, y posterior lixiviación, debido a que el ácido a adicionar tanto en el curado como en los efluentes lixiviantes depende de esta variable, que teóricamente es significativa y el consumo de ácido es de vital importancia para el proceso, además económicamente involucra una alta inversión, pues el ácido sulfúrico tiene un alto costo.

Finalmente, se hace primordial reconocer la falta de conocimiento y necesidad de actualización en algunos temas para poder progresar y producir un cambio positivo en la mentalidad de las personas, desde la gerencia hasta el último eslabón en la cadena de mando, por ello se recomienda realizar una charla reflexiva de autoconocimiento y reconocimiento de la importancia que tiene una red sólida de unión en una compañía, a través de ejemplos didácticos y claros en que el rendimiento aumenta sustancialmente con un trabajo en equipo, por sobre el actual que claramente se basa en el cumplimiento individual de sus funciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aguad Jorge S., Jordan Héctor D., Vargas Tomás. (2011). Lixiviación de Minerales Oxidados de Cobre con Soluciones Ácidas de Alta Carga Iónica. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Álvarez Vásquez Cristián. (2015). Diseño de planta de lixiviación en pila para la unidad de procesos hidrometalúrgicos. CODELCO, División El Teniente. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica De Valparaíso.

Bernd Schulz E, J. Simpson. (2003). Hidrometalurgia. En Introducción a la Metalurgia (188 - 201). Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Bertoni Jara Julio Antonio. (2018). Pruebas de lixiviación en columnas de mineral oxidado Doña Elba, Compañía Minera las Cenizas, Taltal. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Bustamante R. Oswaldo. Gaviria C. Ana, Restrepo B. Óscar. (2007). Hidrometalurgia Aplicada, Línea de Metales Preciosos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales.

Contreras Cerón Yerko Alejandro. (2019). Estudio de Lixiviación de Óxidos Sintéticos de Cu-Fe-Mn como base para Explicar el Comportamiento de los Óxidos Negros. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Herrera H, Camacho J, Varela H. (2003). Mineralización Oxidada del Yacimiento Escondida, Estadística Descriptiva de Parámetros Metalúrgicos y de Elementos Químicos. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra.

López Alfaro Emilio José. (2012). Estudio experimental de la Permeabilidad de materiales Depositados en pilas de Lixiviación. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.

Maksaev Víctor. (2007). Metallic ore deposits. Londres, Inglaterra: Geological Society.

Morales Morales Fabián Alexis. (2016). Evaluación Técnico - Económica de la Implementación de un Nuevo Plan de Riego de los sectores de Lixiviación en la Operación MantoVerde – Anglo American. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología.

Ortega Silva Felipe Andrés. (2019). Estudio del efecto que produce pretratamiento realizado en un mezclador de mezcla trifásica, en la extracción de cobre para minerales sulfurados.. Santiago, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

Pincheira M., Dagnino A., Kelm U., Helle S.. (2003). "Copper Pitch y Copper Wad": Contraste entre las fases presentes en las Cabezas y en los Ripios en Pruebas de Lixiviación de Materiales de Mina Sur, Chuquicamata. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra.

Roa Giannoni Tamara Antonella. (2017). Modificación del Proceso Convencional de Aglomerado en Laboratorio de Hidrometalurgia con Mineral Mixto. Viña del Mar, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

Ruiz Paredes María Cristina. (2013). Hidrometalurgia. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Surco Álvarez Marcos. (2012). Optimización del Proceso de Aglomeración y Lixiviación en una Planta de Lixiviación de Cobre. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Vera Abara Marcelo Alejandro. (2012). Alternativas de Lixiviación de Minerales Oxidados Alimentación PTMP CODELCO Chile, División Chuquicamata. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Zabala Villanueva María Beatriz. (2013). Comportamiento de la Recuperación de Cobre en una Pila de Lixiviación a Condiciones Ambientales Extremas. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.

9. APÉNDICE

Anexo A

Concentración de cobre en el PLS

A.1 Aproximaciones al modelo de la concentración de cobre en el PLS.

Tabla 5: Variación de la concentración de cobre en el PLS en el tiempo durante el 2018.

Fecha	Concentración de cobre en el PLS	Tiempo	
	(g/l)	días	meses
01-01-2018	2,767	1	Enero
02-01-2018	2,828	2	
03-01-2018	2,705	3	
04-01-2018	2,580	4	
05-01-2018	2,530	5	
06-01-2018	2,560	6	
07-01-2018	2,480	7	
08-01-2018	2,522	8	
09-01-2018	2,463	9	
10-01-2018	2,410	10	
11-01-2018	2,510	11	
12-01-2018	2,510	12	
13-01-2018	2,360	13	
14-01-2018	2,332	14	
15-01-2018	2,315	15	
16-01-2018	2,448	16	
17-01-2018	2,502	17	
18-01-2018	2,530	18	
19-01-2018	2,500	19	
20-01-2018	2,510	20	
21-01-2018	2,537	21	
22-01-2018	2,523	22	
23-01-2018	2,453	23	
24-01-2018	2,405	24	
25-01-2018	2,393	25	
26-01-2018	2,405	26	
27-01-2018	2,262	27	
28-01-2018	2,302	28	
29-01-2018	2,370	29	
30-01-2018	2,352	30	
31-01-2018	2,377	31	
01-02-2018	2,475	32	Febrero

02-02-2018	2,397	33	
03-02-2018	2,370	34	
04-02-2018	2,417	35	
05-02-2018	2,407	36	
06-02-2018	2,390	37	
07-02-2018	2,455	38	
08-02-2018	2,457	39	
09-02-2018	2,437	40	
10-02-2018	2,323	41	
11-02-2018	2,260	42	
12-02-2018	2,298	43	
13-02-2018	2,395	44	
14-02-2018	2,453	45	
15-02-2018	2,413	46	
16-02-2018	2,300	47	
17-02-2018	2,267	48	
18-02-2018	2,225	49	
19-02-2018	2,095	50	
20-02-2018	2,112	51	
21-02-2018	2,067	52	
22-02-2018	2,022	53	
23-02-2018	2,035	54	
24-02-2018	2,037	55	
25-02-2018	2,055	56	
26-02-2018	1,900	57	
27-02-2018	1,775	58	
28-02-2018	1,855	59	
01-03-2018	1,838	60	Marzo
02-03-2018	1,820	61	
03-03-2018	1,777	62	
04-03-2018	1,753	63	
05-03-2018	1,725	64	
06-03-2018	1,670	65	
07-03-2018	1,683	66	
08-03-2018	1,607	67	
09-03-2018	1,588	68	
10-03-2018	1,540	69	
11-03-2018	1,582	70	
12-03-2018	1,640	71	
13-03-2018	1,803	72	
14-03-2018	1,865	73	
15-03-2018	1,927	74	

16-03-2018	2,080	75
17-03-2018	2,203	76
18-03-2018	2,230	77
19-03-2018	2,183	78
20-03-2018	2,217	79
21-03-2018	2,183	80
22-03-2018	2,220	81
23-03-2018	2,312	82
24-03-2018	2,313	83
25-03-2018	2,245	84
26-03-2018	2,265	85
27-03-2018	2,233	86
28-03-2018	2,257	87
29-03-2018	2,332	88
30-03-2018	2,292	89
31-03-2018	2,277	90
01-04-2018	2,185	91
02-04-2018	2,082	92
03-04-2018	2,068	93
04-04-2018	2,120	94
05-04-2018	2,205	95
06-04-2018	2,240	96
07-04-2018	2,295	97
08-04-2018	2,355	98
09-04-2018	2,347	99
10-04-2018	2,347	100
11-04-2018	2,438	101
12-04-2018	2,380	102
13-04-2018	2,468	103
14-04-2018	2,438	104
15-04-2018	2,435	105
16-04-2018	2,405	106
17-04-2018	2,372	107
18-04-2018	2,297	108
19-04-2018	2,283	109
20-04-2018	2,325	110
21-04-2018	2,330	111
22-04-2018	2,370	112
23-04-2018	2,455	113
24-04-2018	2,422	114
25-04-2018	2,448	115
26-04-2018	2,532	116

Abrii

27-04-2018	2,625	117	
28-04-2018	2,718	118	
29-04-2018	2,762	119	
30-04-2018	2,770	120	
01-05-2018	2,813	121	Mayo
02-05-2018	2,755	122	
03-05-2018	2,663	123	
04-05-2018	2,515	124	
05-05-2018	2,500	125	
06-05-2018	2,405	126	
07-05-2018	2,377	127	
08-05-2018	2,423	128	
09-05-2018	2,428	129	
10-05-2018	2,466	130	
11-05-2018	2,472	131	
12-05-2018	2,500	132	
13-05-2018	2,535	133	
14-05-2018	2,822	134	
15-05-2018	2,693	135	
16-05-2018	2,795	136	
17-05-2018	2,870	137	
18-05-2018	2,910	138	
19-05-2018	2,968	139	
20-05-2018	2,948	140	
21-05-2018	2,985	141	
22-05-2018	2,960	142	
23-05-2018	2,753	143	
24-05-2018	2,877	144	
25-05-2018	2,920	145	
26-05-2018	3,122	146	
27-05-2018	3,143	147	
28-05-2018	3,080	148	
29-05-2018	2,953	149	
30-05-2018	2,997	150	
31-05-2018	2,953	151	
01-06-2018	2,910	152	Junio
02-06-2018	2,835	153	
03-06-2018	2,648	154	
04-06-2018	2,805	155	
05-06-2018	2,867	156	
06-06-2018	2,900	157	
07-06-2018	2,965	158	

08-06-2018	3,218	159
09-06-2018	3,093	160
10-06-2018	3,038	161
11-06-2018	3,057	162
12-06-2018	3,137	163
13-06-2018	3,093	164
14-06-2018	3,150	165
15-06-2018	3,140	166
16-06-2018	3,110	167
17-06-2018	3,092	168
18-06-2018	3,043	169
19-06-2018	3,028	170
20-06-2018	3,048	171
21-06-2018	3,032	172
22-06-2018	2,993	173
23-06-2018	3,022	174
24-06-2018	2,985	175
25-06-2018	2,948	176
26-06-2018	2,965	177
27-06-2018	2,943	178
28-06-2018	2,877	179
29-06-2018	2,855	180
30-06-2018	2,752	181
01-07-2018	2,715	182
02-07-2018	2,757	183
03-07-2018	2,798	184
04-07-2018	2,868	185
05-07-2018	2,927	186
06-07-2018	2,938	187
07-07-2018	2,828	188
08-07-2018	2,850	189
09-07-2018	2,765	190
10-07-2018	2,697	191
11-07-2018	2,658	192
12-07-2018	2,648	193
13-07-2018	2,625	194
14-07-2018	2,587	195
15-07-2018	2,465	196
16-07-2018	2,390	197
17-07-2018	2,517	198
18-07-2018	2,560	199
19-07-2018	2,607	200

Juli

20-07-2018	2,620	201
21-07-2018	2,720	202
22-07-2018	2,853	203
23-07-2018	2,880	204
24-07-2018	2,937	205
25-07-2018	2,988	206
26-07-2018	3,027	207
27-07-2018	2,968	208
28-07-2018	3,050	209
29-07-2018	3,025	210
30-07-2018	3,065	211
31-07-2018	3,178	212
01-08-2018	3,163	213
02-08-2018	3,140	214
03-08-2018	3,040	215
04-08-2018	3,062	216
05-08-2018	3,173	217
06-08-2018	3,160	218
07-08-2018	3,332	219
08-08-2018	2,990	220
09-08-2018	3,012	221
10-08-2018	2,928	222
11-08-2018	3,018	223
12-08-2018	3,023	224
13-08-2018	3,023	225
14-08-2018	3,035	226
15-08-2018	3,005	227
16-08-2018	2,980	228
17-08-2018	2,963	229
18-08-2018	3,008	230
19-08-2018	3,120	231
20-08-2018	3,103	232
21-08-2018	3,140	233
22-08-2018	3,078	234
23-08-2018	2,972	235
24-08-2018	2,897	236
25-08-2018	2,870	237
26-08-2018	2,960	238
27-08-2018	3,297	239
28-08-2018	3,267	240
29-08-2018	3,070	241
30-08-2018	2,943	242

Agosto

31-08-2018	2,977	243	Septiembre
01-09-2018	3,000	244	
02-09-2018	3,007	245	
03-09-2018	3,002	246	
04-09-2018	2,965	247	
05-09-2018	3,043	248	
06-09-2018	3,062	249	
07-09-2018	3,040	250	
08-09-2018	3,003	251	
09-09-2018	3,018	252	
10-09-2018	3,067	253	
11-09-2018	2,963	254	
12-09-2018	2,960	255	
13-09-2018	2,893	256	
14-09-2018	2,910	257	
15-09-2018	2,792	258	
16-09-2018	2,873	259	
17-09-2018	2,750	260	
18-09-2018	2,765	261	
19-09-2018	2,803	262	
20-09-2018	2,785	263	
21-09-2018	2,783	264	
22-09-2018	2,702	265	
23-09-2018	2,798	266	
24-09-2018	2,858	267	
25-09-2018	2,992	268	
26-09-2018	3,093	269	
27-09-2018	3,060	270	
28-09-2018	3,020	271	
29-09-2018	3,112	272	
30-09-2018	3,170	273	
01-10-2018	3,207	274	Octubre
02-10-2018	3,320	275	
03-10-2018	3,393	276	
04-10-2018	3,497	277	
05-10-2018	3,538	278	
06-10-2018	3,570	279	
07-10-2018	3,520	280	
08-10-2018	3,532	281	
09-10-2018	3,558	282	
10-10-2018	3,472	283	
11-10-2018	3,462	284	

12-10-2018	3,463	285
13-10-2018	3,495	286
14-10-2018	3,483	287
15-10-2018	3,440	288
16-10-2018	3,380	289
17-10-2018	3,293	290
18-10-2018	3,244	291
19-10-2018	3,185	292
20-10-2018	3,215	293
21-10-2018	3,235	294
22-10-2018	3,237	295
23-10-2018	3,248	296
24-10-2018	3,197	297
25-10-2018	3,160	298
26-10-2018	3,250	299
27-10-2018	3,305	300
28-10-2018	3,252	301
29-10-2018	3,257	302
30-10-2018	3,253	303
31-10-2018	3,335	304
01-11-2018	3,285	305
02-11-2018	3,158	306
03-11-2018	3,095	307
04-11-2018	3,032	308
05-11-2018	2,935	309
06-11-2018	2,818	310
07-11-2018	2,823	311
08-11-2018	2,840	312
09-11-2018	2,975	313
10-11-2018	3,120	314
11-11-2018	3,195	315
12-11-2018	3,287	316
13-11-2018	3,292	317
14-11-2018	3,347	318
15-11-2018	3,332	319
16-11-2018	3,342	320
17-11-2018	3,342	321
18-11-2018	3,408	322
19-11-2018	3,413	323
20-11-2018	3,335	324
21-11-2018	3,383	325
22-11-2018	3,387	326

Noviembre

23-11-2018	3,417	327
24-11-2018	3,350	328
25-11-2018	3,378	329
26-11-2018	3,370	330
27-11-2018	3,418	331
28-11-2018	3,427	332
29-11-2018	3,407	333
30-11-2018	3,293	334
01-12-2018	3,383	335
02-12-2018	3,347	336
03-12-2018	3,255	337
04-12-2018	3,205	338
05-12-2018	3,072	339
06-12-2018	3,057	340
07-12-2018	2,978	341
08-12-2018	2,982	342
09-12-2018	2,903	343
10-12-2018	2,870	344
11-12-2018	2,835	345
12-12-2018	2,820	346
13-12-2018	2,860	347
14-12-2018	2,960	348
15-12-2018	2,960	349
16-12-2018	2,960	350
17-12-2018	2,832	351
18-12-2018	2,938	352
19-12-2018	2,935	353
20-12-2018	2,903	354
21-12-2018	2,950	355
22-12-2018	2,963	356
23-12-2018	2,910	357
24-12-2018	2,870	358
25-12-2018	2,797	359
26-12-2018	2,905	360
27-12-2018	2,970	361
28-12-2018	3,055	362
29-12-2018	3,080	363
30-12-2018	2,960	364
31-12-2018	2,925	365

Diciembre

Tabla 6: Variación del promedio mensual de concentración de cobre en el PLS en el tiempo durante el 2018.

Promedio de la concentración de cobre en el PLS	Tiempo
(g/l)	meses
2,476	1
2,239	2
1,993	3
2,576	4
2,761	5
2,985	6
2,791	7
3,056	8
2,943	9
3,355	10
3,240	11
2,983	12

Tabla 7: Variación del promedio mensual de concentración de cobre en el PLS en el tiempo 2019.

Promedio de la concentración de cobre	Tiempo
g/l	mes
2,88	1
2,55	2
2,37	3
2,54	4
2,20	5
2,60	6
2,60	7
2,51	8

Tabla 8: Comportamiento de la concentración de cobre del primer efluente.

Pila	Vuelta	Promedio de la concentración de cobre
		g/l
Norte	26	15,28
Sur	26	10,37
Norte	27	No existen antecedentes
Sur	27	13,32
Norte	28	15,15
Sur	28	15,14

A.2 Variables en función de la concentración de cobre en el PLS.

Tabla 9: Comportamiento de la concentración de cobre en el refino del tren A con respecto a la concentración de cobre en el PLS.

Fecha	Concentración de cobre en el refino (g/l)	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Fecha	Concentración de cobre en el refino (g/l)	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Fecha	Concentración de cobre en el refino (g/l)	Concentración de cobre real en el PLS (g/l)
01-05-2018	0,093	2,711	17-01-2019	0,043	2,477	21-04-2019	0,042	2,312
23-10-2018	0,115	3,145	19-01-2019	0,040	2,574	22-04-2019	0,045	2,216
25-10-2018	0,110	3,127	20-01-2019	0,042	2,542	23-04-2019	0,042	2,113
26-10-2018	0,115	3,137	21-01-2019	0,043	2,580	25-04-2019	0,043	2,236
27-10-2018	0,120	2,980	22-01-2019	0,047	2,522	26-04-2019	0,040	2,101
28-10-2018	0,122	3,181	23-01-2019	0,053	5,718	27-04-2019	0,042	2,326
29-10-2018	0,445	4,462	24-01-2019	0,052	2,463	28-04-2019	0,048	2,379
30-10-2018	0,113	1,535	25-01-2019	0,048	2,522	29-04-2019	0,062	2,442
31-10-2018	0,138	3,009	26-01-2019	0,038	2,607	30-04-2019	0,065	2,411
01-11-2018	0,133	3,140	27-01-2019	0,040	2,633	01-05-2019	0,060	2,567
02-11-2018	0,113	3,033	29-01-2019	0,050	2,683	02-05-2019	0,062	2,296
03-11-2018	0,098	2,810	31-01-2019	0,053	2,631	05-05-2019	0,058	2,294
04-11-2018	0,097	3,035	01-02-2019	0,068	2,791	07-05-2019	0,060	2,340
06-11-2018	0,092	2,870	02-02-2019	0,067	2,759	08-05-2019	0,060	2,379
07-11-2018	0,088	2,742	03-02-2019	0,072	2,708	09-05-2019	0,067	2,459
08-11-2018	0,085	2,886	04-02-2019	0,083	2,822	10-05-2019	0,078	2,459
09-11-2018	0,098	2,821	05-02-2019	0,082	2,952	11-05-2019	0,102	2,557
10-11-2018	0,117	2,946	06-02-2019	0,077	2,739	12-05-2019	0,083	2,468
11-11-2018	0,130	3,106	07-02-2019	0,073	2,798	13-05-2019	0,063	2,324
12-11-2018	0,142	3,170	17-02-2019	0,042	2,387	14-05-2019	0,057	2,168
13-11-2018	0,142	3,118	18-02-2019	0,038	2,336	15-05-2019	0,057	2,314
14-11-2018	0,137	3,161	19-02-2019	0,043	2,164	16-05-2019	0,057	2,342
15-11-2018	0,128	3,226	20-02-2019	0,037	2,117	17-05-2019	0,060	2,458
16-11-2018	0,104	1,448	21-02-2019	0,030	2,100	18-05-2019	0,052	2,264
17-11-2018	0,118	1,327	22-02-2019	0,030	2,106	19-05-2019	0,058	2,275
18-11-2018	0,138	1,599	26-02-2019	0,027	2,010	20-05-2019	0,052	2,374
19-11-2018	0,137	1,578	27-02-2019	0,028	2,137	21-05-2019	0,048	2,429
20-11-2018	0,135	3,344	28-02-2019	0,032	2,013	22-05-2019	0,053	2,373
21-11-2018	0,103	2,938	01-03-2019	0,032	1,972	23-05-2019	0,055	2,341
22-11-2018	0,110	3,039	02-03-2019	0,037	2,041	24-05-2019	0,062	2,397
23-11-2018	0,118	3,060	03-03-2019	0,043	1,953	25-05-2019	0,050	3,106
24-11-2018	0,110	2,907	04-03-2019	0,048	2,064	26-05-2019	0,055	3,147
25-11-2018	0,110	2,950	06-03-2019	0,050	2,147	28-05-2019	0,063	2,451
26-11-2018	0,122	2,987	07-03-2019	0,050	2,069	02-06-2019	0,062	2,233
27-11-2018	0,120	3,016	08-03-2019	0,053	2,106	04-06-2019	0,060	2,485

28-11-2018	0,117	3,213	09-03-2019	0,056	2,127	05-06-2019	0,050	2,479
30-11-2018	0,000	2,649	10-03-2019	0,067	2,101	06-06-2019	0,052	2,352
01-12-2018	0,000	2,539	11-03-2019	0,092	2,294	08-06-2019	0,043	2,275
03-12-2018	0,090	2,969	12-03-2019	0,094	2,279	09-06-2019	0,042	2,308
04-12-2018	0,112	3,101	13-03-2019	0,080	2,298	10-06-2019	0,042	2,114
05-12-2018	0,092	2,695	14-03-2019	0,058	2,152	11-06-2019	0,048	2,217
06-12-2018	0,092	2,793	15-03-2019	0,043	2,033	12-06-2019	0,057	2,511
08-12-2018	0,082	2,684	16-03-2019	0,040	1,960	16-06-2019	0,000	1,023
09-12-2018	0,087	2,595	17-03-2019	0,043	2,045	21-06-2019	0,000	1,035
11-12-2018	0,085	2,849	18-03-2019	0,040	2,099	24-06-2019	0,000	0,879
12-12-2018	0,103	2,825	19-03-2019	0,042	2,298	26-06-2019	0,000	0,951
13-12-2018	0,090	2,763	20-03-2019	0,038	2,220	28-06-2019	0,457	4,168
14-12-2018	0,110	2,840	23-03-2019	0,060	2,417	29-06-2019	0,363	4,142
15-12-2018	0,115	1,604	24-03-2019	0,062	2,535	01-07-2019	0,290	4,168
16-12-2018	0,095	2,671	25-03-2019	0,060	2,450	02-07-2019	0,183	3,566
17-12-2018	0,078	2,898	26-03-2019	0,062	2,536	03-07-2019	0,153	3,390
21-12-2018	0,088	2,644	27-03-2019	0,067	2,666	04-07-2019	0,108	3,100
22-12-2018	0,090	2,761	28-03-2019	0,055	2,266	05-07-2019	0,097	2,891
23-12-2018	0,080	2,538	29-03-2019	0,055	2,410	06-07-2019	0,078	2,534
24-12-2018	0,083	2,592	30-03-2019	0,057	2,879	07-07-2019	0,079	2,800
25-12-2018	0,087	2,859	31-03-2019	0,067	2,351	08-07-2019	0,055	2,638
26-12-2018	0,092	2,909	01-04-2019	0,093	2,561	09-07-2019	0,081	2,658
28-12-2018	0,113	2,907	02-04-2019	0,105	3,309	12-07-2019	0,080	2,629
30-12-2018	0,080	2,844	05-04-2019	0,072	2,627	13-07-2019	0,063	2,513
31-12-2018	0,075	2,719	06-04-2019	0,080	2,747	14-07-2019	0,062	2,543
01-01-2019	0,070	2,664	07-04-2019	0,073	2,559	15-07-2019	0,058	2,529
02-01-2019	0,053	2,548	08-04-2019	0,067	2,525	17-07-2019	0,065	2,594
03-01-2019	0,055	2,482	09-04-2019	0,053	2,143	18-07-2019	0,083	2,661
06-01-2019	0,070	2,684	10-04-2019	0,053	2,313	19-07-2019	0,090	2,788
07-01-2019	0,082	3,081	11-04-2019	0,058	2,181	20-07-2019	0,078	2,731
08-01-2019	0,100	2,798	12-04-2019	0,067	2,257	21-07-2019	0,087	2,806
09-01-2019	0,100	2,806	13-04-2019	0,062	2,221	22-07-2019	0,110	2,888
10-01-2019	0,093	2,765	14-04-2019	0,048	2,473	23-07-2019	0,127	2,963
11-01-2019	0,082	2,617	15-04-2019	0,052	2,326	24-07-2019	0,117	3,001
12-01-2019	0,053	2,339	16-04-2019	0,045	2,264	25-07-2019	0,135	2,704
13-01-2019	0,053	2,363	18-04-2019	0,040	2,200	26-07-2019	0,268	3,426
14-01-2019	0,048	2,854	19-04-2019	0,038	2,190	27-07-2019	0,135	3,053
15-01-2019	0,043	2,798	20-04-2019	0,043	2,407	28-07-2019	0,115	3,015

Tabla 10: Comportamiento de la concentración de ácido en el refino del tren B con respecto a la concentración de cobre en el PLS.

Fecha	Concentración de ácido en el refino (g/l)	Concentración de cobre en el pls (g/l)	Fecha	Concentración de ácido en el refino (g/l)	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Fecha	Concentración de ácido en el refino (g/l)	Concentración de cobre en el PLS (g/l)
-------	---	--	-------	---	--	-------	---	--

01-05-2018	7,440	2,711	17-01-2019	6,000	2,477	21-04-2019	6,285	2,312
23-10-2018	7,965	3,145	19-01-2019	6,348	2,574	22-04-2019	6,237	2,216
25-10-2018	8,740	3,127	20-01-2019	6,220	2,542	23-04-2019	6,174	2,113
26-10-2018	8,910	3,137	21-01-2019	6,390	2,580	25-04-2019	6,233	2,236
27-10-2018	8,140	2,980	22-01-2019	6,557	2,522	26-04-2019	6,187	2,101
28-10-2018	9,070	3,181	23-01-2019	24,467	5,718	27-04-2019	6,290	2,326
29-10-2018	8,081	4,462	24-01-2019	6,723	2,463	28-04-2019	6,773	2,379
30-10-2018	0,000	1,535	25-01-2019	6,184	2,522	29-04-2019	7,057	2,442
31-10-2018	7,931	3,009	26-01-2019	6,370	2,607	30-04-2019	7,277	2,411
01-11-2018	8,555	3,140	27-01-2019	6,340	2,633	01-05-2019	7,454	2,567
02-11-2018	8,310	3,033	29-01-2019	6,295	2,683	02-05-2019	7,284	2,296
03-11-2018	8,310	2,810	31-01-2019	6,455	2,631	05-05-2019	7,622	2,294
04-11-2018	8,331	3,035	01-02-2019	6,750	2,791	07-05-2019	7,579	2,340
06-11-2018	7,940	2,870	02-02-2019	7,455	2,759	08-05-2019	7,790	2,379
07-11-2018	7,815	2,742	03-02-2019	6,905	2,708	09-05-2019	7,909	2,459
08-11-2018	7,762	2,886	04-02-2019	7,180	2,822	10-05-2019	7,476	2,459
09-11-2018	8,222	2,821	05-02-2019	7,632	2,952	11-05-2019	7,423	2,557
10-11-2018	8,512	2,946	06-02-2019	7,171	2,739	12-05-2019	7,171	2,468
11-11-2018	8,755	3,106	07-02-2019	7,182	2,798	13-05-2019	7,191	2,324
12-11-2018	8,821	3,170	17-02-2019	6,065	2,387	14-05-2019	6,923	2,168
13-11-2018	8,774	3,118	18-02-2019	5,926	2,336	15-05-2019	6,994	2,314
14-11-2018	8,975	3,161	19-02-2019	5,603	2,164	16-05-2019	7,170	2,342
15-11-2018	8,805	3,226	20-02-2019	5,408	2,117	17-05-2019	7,115	2,458
16-11-2018	0,000	1,448	21-02-2019	5,344	2,100	18-05-2019	6,963	2,264
17-11-2018	0,000	1,327	22-02-2019	5,364	2,106	19-05-2019	6,882	2,275
18-11-2018	0,000	1,599	26-02-2019	4,798	2,010	20-05-2019	7,073	2,374
19-11-2018	0,000	1,578	27-02-2019	5,295	2,137	21-05-2019	6,547	2,429
20-11-2018	8,520	3,344	28-02-2019	5,206	2,013	22-05-2019	7,003	2,373
21-11-2018	8,985	2,938	01-03-2019	4,830	1,972	23-05-2019	6,862	2,341
22-11-2018	8,485	3,039	02-03-2019	5,184	2,041	24-05-2019	7,293	2,397
23-11-2018	8,230	3,060	03-03-2019	5,634	1,953	25-05-2019	7,371	3,106
24-11-2018	7,955	2,907	04-03-2019	5,352	2,064	26-05-2019	7,443	3,147
25-11-2018	7,960	2,950	06-03-2019	5,430	2,147	28-05-2019	7,173	2,451
26-11-2018	7,480	2,987	07-03-2019	4,865	2,069	02-06-2019	6,823	2,233
27-11-2018	8,175	3,016	08-03-2019	5,117	2,106	04-06-2019	6,940	2,485
28-11-2018	8,120	3,213	09-03-2019	5,230	2,127	05-06-2019	6,941	2,479
30-11-2018	8,295	2,649	10-03-2019	4,887	2,101	06-06-2019	6,417	2,352
01-12-2018	8,265	2,539	11-03-2019	5,176	2,294	08-06-2019	5,647	2,275
03-12-2018	8,115	2,969	12-03-2019	5,610	2,279	09-06-2019	5,683	2,308
04-12-2018	8,245	3,101	13-03-2019	5,316	2,298	10-06-2019	5,790	2,114
05-12-2018	7,935	2,695	14-03-2019	5,220	2,152	11-06-2019	5,997	2,217
06-12-2018	7,289	2,793	15-03-2019	5,310	2,033	12-06-2019	6,260	2,511
08-12-2018	7,386	2,684	16-03-2019	5,133	1,960	16-06-2019	0,000	1,023
09-12-2018	7,385	2,595	17-03-2019	5,701	2,045	21-06-2019	0,000	1,035
11-12-2018	7,619	2,849	18-03-2019	5,960	2,099	24-06-2019	0,000	0,879

12-12-2018	7,230	2,825	19-03-2019	6,000	2,298	26-06-2019	0,000	0,951
13-12-2018	7,470	2,763	20-03-2019	6,247	2,220	28-06-2019	6,220	4,168
14-12-2018	7,920	2,840	23-03-2019	7,091	2,417	29-06-2019	6,813	4,142
15-12-2018	0,000	1,604	24-03-2019	7,333	2,535	01-07-2019	8,295	4,168
16-12-2018	7,565	2,671	25-03-2019	7,300	2,450	02-07-2019	8,180	3,566
17-12-2018	7,496	2,898	26-03-2019	6,863	2,536	03-07-2019	7,840	3,390
21-12-2018	7,150	2,644	27-03-2019	7,691	2,666	04-07-2019	7,986	3,100
22-12-2018	7,570	2,761	28-03-2019	6,531	2,266	05-07-2019	7,210	2,891
23-12-2018	7,700	2,538	29-03-2019	6,789	2,410	06-07-2019	5,990	2,534
24-12-2018	7,570	2,592	30-03-2019	6,525	2,879	07-07-2019	6,455	2,800
25-12-2018	7,550	2,859	31-03-2019	7,070	2,351	08-07-2019	6,280	2,638
26-12-2018	7,400	2,909	01-04-2019	7,127	2,561	09-07-2019	6,720	2,658
28-12-2018	7,720	2,907	02-04-2019	7,463	3,309	12-07-2019	6,107	2,629
30-12-2018	7,670	2,844	05-04-2019	7,430	2,627	13-07-2019	6,273	2,513
31-12-2018	7,400	2,719	06-04-2019	7,403	2,747	14-07-2019	6,427	2,543
01-01-2019	7,560	2,664	07-04-2019	7,412	2,559	15-07-2019	6,560	2,529
02-01-2019	6,720	2,548	08-04-2019	7,360	2,525	17-07-2019	6,580	2,594
03-01-2019	6,480	2,482	09-04-2019	6,953	2,143	18-07-2019	6,700	2,661
06-01-2019	7,789	2,684	10-04-2019	7,113	2,313	19-07-2019	7,053	2,788
07-01-2019	8,459	3,081	11-04-2019	6,920	2,181	20-07-2019	7,153	2,731
08-01-2019	6,650	2,798	12-04-2019	7,335	2,257	21-07-2019	7,373	2,806
09-01-2019	7,052	2,806	13-04-2019	6,983	2,221	22-07-2019	8,067	2,888
10-01-2019	6,837	2,765	14-04-2019	7,080	2,473	23-07-2019	7,990	2,963
11-01-2019	6,603	2,617	15-04-2019	6,750	2,326	24-07-2019	7,750	3,001
12-01-2019	6,147	2,339	16-04-2019	6,400	2,264	25-07-2019	6,583	2,704
13-01-2019	6,147	2,363	18-04-2019	5,813	2,200	26-07-2019	6,417	3,426
14-01-2019	6,020	2,854	19-04-2019	5,913	2,190	27-07-2019	6,683	3,053
15-01-2019	5,695	2,798	20-04-2019	6,425	2,407	28-07-2019	6,667	3,015

Tabla 11: Comportamiento de la concentración de cobre en el refino en función del tiempo durante el 2018.

Concentración de cobre en el refino	Tiempo	Concentración de cobre en el refino	Tiempo
0,16	01-06-2018	0,10	16-09-2018
0,14	02-06-2018	0,09	17-09-2018
0,11	03-06-2018	0,09	18-09-2018
0,10	04-06-2018	0,10	19-09-2018
0,10	05-06-2018	0,10	20-09-2018
0,11	06-06-2018	0,09	21-09-2018
0,10	07-06-2018	0,09	22-09-2018
0,12	08-06-2018	0,09	23-09-2018
0,13	09-06-2018	0,09	24-09-2018

0,18	10-06-2018	0,12	25-09-2018
0,16	11-06-2018	0,12	26-09-2018
0,12	12-06-2018	0,13	27-09-2018
0,15	13-06-2018	0,13	28-09-2018
0,14	14-06-2018	0,13	29-09-2018
0,15	15-06-2018	0,13	30-09-2018
0,14	16-06-2018	0,13	01-10-2018
0,15	17-06-2018	0,10	02-10-2018
0,16	18-06-2018	0,13	03-10-2018
0,14	19-06-2018	0,34	04-10-2018
0,15	20-06-2018	0,23	05-10-2018
0,16	21-06-2018	0,17	06-10-2018
0,16	22-06-2018	0,19	07-10-2018
0,17	23-06-2018	0,19	08-10-2018
0,18	24-06-2018	0,19	09-10-2018
0,18	25-06-2018	0,16	10-10-2018
0,18	26-06-2018	0,16	11-10-2018
0,15	27-06-2018	0,15	12-10-2018
0,17	28-06-2018	0,15	13-10-2018
0,16	29-06-2018	0,16	14-10-2018
0,16	30-06-2018	0,18	15-10-2018
0,15	01-07-2018	0,18	16-10-2018
0,14	02-07-2018	0,17	17-10-2018
0,14	03-07-2018	0,13	18-10-2018
0,14	04-07-2018	0,14	19-10-2018
0,14	05-07-2018	0,14	20-10-2018
0,16	06-07-2018	0,12	21-10-2018
0,20	07-07-2018	0,11	22-10-2018
0,25	08-07-2018	0,11	23-10-2018
0,21	09-07-2018	0,11	24-10-2018
0,16	10-07-2018	0,11	25-10-2018
0,15	11-07-2018	0,10	26-10-2018
0,14	12-07-2018	0,11	27-10-2018
0,11	13-07-2018	0,12	28-10-2018
0,08	14-07-2018	0,12	29-10-2018
0,08	15-07-2018	0,12	30-10-2018
0,09	16-07-2018	0,14	31-10-2018
0,07	17-07-2018	0,14	01-11-2018
0,07	18-07-2018	0,14	02-11-2018
0,07	19-07-2018	0,14	03-11-2018
0,08	20-07-2018	0,12	04-11-2018
0,10	21-07-2018	0,12	05-11-2018

0,13	22-07-2018	0,10	06-11-2018
0,12	23-07-2018	0,09	07-11-2018
0,14	24-07-2018	0,09	08-11-2018
0,14	25-07-2018	0,09	09-11-2018
0,15	26-07-2018	0,09	10-11-2018
0,15	27-07-2018	0,09	11-11-2018
0,14	28-07-2018	0,10	12-11-2018
0,14	29-07-2018	0,11	13-11-2018
0,14	30-07-2018	0,11	14-11-2018
0,14	31-07-2018	0,14	15-11-2018
0,15	01-08-2018	0,14	16-11-2018
0,37	02-08-2018	0,14	17-11-2018
0,36	03-08-2018	0,13	18-11-2018
0,25	04-08-2018	0,13	19-11-2018
0,18	05-08-2018	0,13	20-11-2018
0,19	06-08-2018	0,19	21-11-2018
0,18	07-08-2018	0,09	22-11-2018
0,24	08-08-2018	0,15	23-11-2018
0,23	09-08-2018	0,10	24-11-2018
0,24	10-08-2018	0,12	25-11-2018
0,23	11-08-2018	0,12	26-11-2018
0,21	12-08-2018	0,11	27-11-2018
0,19	13-08-2018	0,11	28-11-2018
0,19	14-08-2018	0,12	29-11-2018
0,18	15-08-2018	0,13	30-11-2018
0,17	16-08-2018	0,13	01-12-2018
0,16	17-08-2018	0,13	02-12-2018
0,16	18-08-2018	0,10	03-12-2018
0,15	19-08-2018	0,09	04-12-2018
0,18	20-08-2018	0,09	05-12-2018
0,19	21-08-2018	0,10	06-12-2018
0,19	22-08-2018	0,10	07-12-2018
0,20	23-08-2018	0,09	08-12-2018
0,17	24-08-2018	0,09	09-12-2018
0,17	25-08-2018	0,08	10-12-2018
0,16	26-08-2018	0,08	11-12-2018
0,16	27-08-2018	0,09	12-12-2018
0,16	28-08-2018	0,09	13-12-2018
0,22	29-08-2018	0,09	14-12-2018
0,20	30-08-2018	0,11	15-12-2018
0,20	31-08-2018	0,10	16-12-2018
0,20	01-09-2018	0,11	17-12-2018

0,18	02-09-2018	0,12	18-12-2018
0,17	03-09-2018	0,09	19-12-2018
0,16	04-09-2018	0,08	20-12-2018
0,15	05-09-2018	0,09	21-12-2018
0,15	06-09-2018	0,10	22-12-2018
0,14	07-09-2018	0,09	23-12-2018
0,14	08-09-2018	0,10	24-12-2018
0,14	09-09-2018	0,10	25-12-2018
0,13	10-09-2018	0,09	26-12-2018
0,13	11-09-2018	0,09	27-12-2018
0,12	12-09-2018	0,12	28-12-2018
0,12	13-09-2018	0,09	29-12-2018
0,11	14-09-2018	0,11	30-12-2018
0,10	15-09-2018	0,09	31-12-2018

Tabla 12: Comportamiento de la concentración de cobre en el refino en función del tiempo durante el 2019.

Concentración de cobre en el refino	Tiempo	Concentración de cobre en el refino	Tiempo
0,09	01-01-2019	0,08	02-05-2019
0,07	02-01-2019	0,07	03-05-2019
0,05	03-01-2019	0,06	04-05-2019
0,06	04-01-2019	0,06	05-05-2019
0,05	05-01-2019	0,06	06-05-2019
0,06	06-01-2019	0,06	07-05-2019
0,08	07-01-2019	0,06	08-05-2019
0,06	08-01-2019	0,06	09-05-2019
0,07	09-01-2019	0,05	10-05-2019
0,09	10-01-2019	0,07	11-05-2019
0,13	11-01-2019	0,09	12-05-2019
0,12	12-01-2019	0,08	13-05-2019
0,11	13-01-2019	0,07	14-05-2019
0,05	14-01-2019	0,06	15-05-2019
0,05	15-01-2019	0,06	16-05-2019
0,09	16-01-2019	0,08	17-05-2019
0,08	17-01-2019	0,06	18-05-2019
0,06	18-01-2019	0,06	19-05-2019
0,07	19-01-2019	0,06	20-05-2019
0,07	20-01-2019	0,05	21-05-2019
0,09	21-01-2019	0,06	22-05-2019
0,09	22-01-2019	0,06	23-05-2019
0,09	23-01-2019	0,38	24-05-2019
0,08	24-01-2019	1,03	25-05-2019

0,08	25-01-2019	0,79	26-05-2019
0,08	26-01-2019	0,97	27-05-2019
0,08	27-01-2019	0,98	28-05-2019
0,07	28-01-2019	0,95	29-05-2019
0,08	29-01-2019	0,24	30-05-2019
0,08	30-01-2019	0,15	31-05-2019
0,09	31-01-2019	0,06	01-06-2019
0,11	01-02-2019	0,06	02-06-2019
0,09	02-02-2019	0,07	03-06-2019
0,09	03-02-2019	0,06	04-06-2019
0,09	04-02-2019	0,06	05-06-2019
0,08	05-02-2019	0,05	06-06-2019
0,09	06-02-2019	0,06	07-06-2019
0,09	07-02-2019	0,05	08-06-2019
0,08	08-02-2019	0,04	09-06-2019
0,08	09-02-2019	0,05	10-06-2019
0,22	10-02-2019	0,04	11-06-2019
0,29	11-02-2019	0,04	12-06-2019
0,22	12-02-2019	0,05	13-06-2019
0,12	13-02-2019	0,05	14-06-2019
0,06	14-02-2019	0,05	15-06-2019
0,06	15-02-2019	0,24	16-06-2019
0,04	16-02-2019	0,72	17-06-2019
0,08	17-02-2019	0,83	18-06-2019
0,04	18-02-2019	0,83	19-06-2019
0,05	19-02-2019	2,07	20-06-2019
0,06	20-02-2019	2,60	21-06-2019
0,14	21-02-2019	2,05	22-06-2019
0,10	22-02-2019	2,24	23-06-2019
0,08	23-02-2019	2,25	24-06-2019
0,10	24-02-2019	3,33	25-06-2019
0,10	25-02-2019	3,11	26-06-2019
0,10	26-02-2019	3,18	27-06-2019
0,08	27-02-2019	3,39	28-06-2019
0,07	28-02-2019	3,44	29-06-2019
0,06	01-03-2019	3,54	30-06-2019
0,04	02-03-2019	0,84	01-07-2019
0,03	03-03-2019	0,44	02-07-2019
0,03	04-03-2019	0,37	03-07-2019
0,05	05-03-2019	0,28	04-07-2019
0,05	06-03-2019	0,15	05-07-2019
0,05	07-03-2019	0,17	06-07-2019
0,06	08-03-2019	0,60	07-07-2019
0,09	09-03-2019	0,96	08-07-2019
0,07	10-03-2019	0,59	09-07-2019

0,09	11-03-2019	0,08	10-07-2019
0,07	12-03-2019	0,19	11-07-2019
0,09	13-03-2019	0,45	12-07-2019
0,10	14-03-2019	0,78	13-07-2019
0,10	15-03-2019	0,44	14-07-2019
0,05	16-03-2019	0,17	15-07-2019
0,06	17-03-2019	0,16	16-07-2019
0,05	18-03-2019	0,20	17-07-2019
0,05	19-03-2019	0,12	18-07-2019
0,05	20-03-2019	0,11	19-07-2019
0,06	21-03-2019	0,14	20-07-2019
0,04	22-03-2019	0,14	21-07-2019
0,06	23-03-2019	0,15	22-07-2019
0,05	24-03-2019	0,16	23-07-2019
0,06	25-03-2019	0,17	24-07-2019
0,07	26-03-2019	0,25	25-07-2019
0,07	27-03-2019	0,23	26-07-2019
0,08	28-03-2019	0,40	27-07-2019
0,07	29-03-2019	0,77	28-07-2019
0,06	30-03-2019	1,05	29-07-2019
0,07	31-03-2019	0,27	30-07-2019
0,07	01-04-2019	0,28	31-07-2019
0,08	02-04-2019	0,20	01-08-2019
0,09	03-04-2019	0,48	02-08-2019
0,18	04-04-2019	0,78	03-08-2019
0,08	05-04-2019	0,69	04-08-2019
0,07	06-04-2019	0,30	05-08-2019
0,08	07-04-2019	0,11	06-08-2019
0,08	08-04-2019	0,16	07-08-2019
0,08	09-04-2019	0,20	08-08-2019
0,06	10-04-2019	0,26	09-08-2019
0,05	11-04-2019	0,28	10-08-2019
0,06	12-04-2019	0,38	11-08-2019
0,06	13-04-2019	0,47	12-08-2019
0,06	14-04-2019	0,35	13-08-2019
0,07	15-04-2019	0,33	14-08-2019
0,06	16-04-2019	0,25	15-08-2019
0,05	17-04-2019	0,25	16-08-2019
0,04	18-04-2019	0,29	17-08-2019
0,06	19-04-2019	0,24	18-08-2019
0,03	20-04-2019	0,20	19-08-2019
0,04	21-04-2019	0,13	20-08-2019
0,04	22-04-2019	0,15	21-08-2019
0,04	23-04-2019	0,10	22-08-2019
0,08	24-04-2019	0,09	23-08-2019

0,20	25-04-2019	0,09	24-08-2019
0,05	26-04-2019	0,08	25-08-2019
0,05	27-04-2019	0,08	26-08-2019
0,04	28-04-2019	0,08	27-08-2019
0,05	29-04-2019	0,10	28-08-2019
0,08	30-04-2019	0,09	29-08-2019
0,08	01-05-2019	0,11	30-08-2019

Tabla 13: Variables de la granulometría de cabeza que afectan la concentración de cobre en el PLS según el modelo.

Granulometría de cabeza			Concentración de cobre en el PLS
19,05 mm	0,149 mm	0,074 mm	g/l
6,895	5,171	3,085	2,752
10,101	4,318	3,304	3,230
6,962	4,776	2,888	3,203
5,421	4,708	3,159	3,298
5,604	5,068	3,028	3,288
5,016	4,803	2,744	3,245
3,591	4,347	3,078	3,244
4,355	4,372	2,904	3,280
3,732	4,693	3,008	3,330
4,094	4,852	2,776	3,237
4,529	4,245	2,715	3,136
4,130	5,271	3,103	3,134
4,854	4,204	3,195	2,990
3,853	4,883	3,030	2,809
3,312	4,682	2,761	2,808
4,348	4,455	2,585	2,805
3,109	4,371	2,593	3,048
3,754	4,545	2,915	3,140
3,266	4,124	2,312	3,218
4,101	4,394	2,850	3,317
3,130	4,966	3,275	3,308
2,607	4,919	2,618	3,350
3,638	4,220	2,522	3,328
3,502	4,262	2,793	3,325
3,067	4,610	2,774	3,355
5,612	4,799	3,093	3,427
3,503	4,550	2,777	3,390
6,164	3,641	2,847	3,362
5,016	5,528	3,616	3,380

3,452	3,949	3,080	3,427
5,262	4,191	3,005	3,388
4,359	4,438	3,078	3,357
4,486	4,125	2,694	3,355
4,548	3,653	2,652	3,429
3,340	4,179	3,159	3,428
9,152	4,106	2,641	3,385
9,214	4,574	2,985	3,342
5,428	4,350	2,878	3,385
6,760	3,723	2,628	3,203
7,506	4,277	2,767	3,148
4,409	4,856	2,800	3,322
6,324	4,262	2,811	3,050
5,001	4,625	2,929	2,952
4,270	4,527	2,904	2,887
6,392	4,087	2,968	2,812
5,417	3,964	2,689	2,833
7,020	4,795	3,155	2,910
5,054	4,892	3,198	2,968
6,357	4,105	2,719	2,958
3,297	4,961	2,974	2,868
6,985	3,484	2,271	2,855
4,850	4,699	3,263	2,942
6,246	4,990	3,188	2,968
5,134	5,426	3,394	2,855
4,901	5,157	2,689	2,802
7,014	4,194	2,827	2,832
8,328	4,529	2,823	2,950
6,409	4,923	3,104	3,053
8,111	4,324	3,150	2,908
6,686	4,641	2,936	2,727
6,995	4,433	3,020	2,630
5,998	3,735	2,644	2,454
6,963	4,032	2,818	2,367
5,682	4,251	3,000	2,775
7,792	3,777	2,603	2,872
8,781	4,373	3,069	2,845
8,174	4,724	3,249	2,845
8,798	4,734	3,126	2,892
8,022	4,614	3,105	2,848
7,551	4,806	2,782	2,717
8,605	4,750	3,086	2,717

0,000	0,000	0,000	2,578
0,000	0,000	0,000	2,510
9,081	4,275	2,951	2,620
9,735	4,154	2,699	2,615
9,373	4,212	3,025	2,668
9,104	4,079	3,003	2,733
8,085	4,495	3,166	2,767
7,536	4,561	2,900	2,892
7,916	5,112	2,862	2,883
9,073	4,373	2,805	2,850
9,934	3,775	2,762	2,734
12,135	3,689	2,282	2,799
10,828	3,937	2,814	2,723
11,176	4,304	2,863	2,893
13,109	4,121	2,719	3,017
8,732	4,270	2,096	2,985
10,001	4,508	2,579	2,990
12,312	4,717	2,364	2,992
11,054	4,356	3,467	2,913
10,152	4,704	2,746	2,930
12,269	4,621	3,102	2,803
7,669	4,379	3,349	2,685
8,075	4,419	3,017	2,641
5,235	4,736	2,992	2,558
6,187	4,378	2,668	2,548
5,321	4,097	2,758	2,320
5,345	4,200	3,199	2,182
7,305	4,807	3,260	1,322
4,613	3,848	2,752	1,620
4,217	4,308	2,899	1,633
4,697	4,209	2,485	1,690
4,609	4,480	2,683	1,852
3,572	5,183	3,295	2,056
4,233	4,820	3,068	2,218
3,714	4,333	2,779	2,212
4,400	4,072	2,570	2,162
4,160	4,070	2,539	2,170
4,205	4,147	2,862	2,172
4,975	4,613	2,725	2,265
4,617	4,490	3,000	2,253
2,111	4,477	3,027	2,155
4,256	4,355	3,007	2,286

5,593	4,689	3,014	2,348
4,093	4,502	2,802	2,341
3,987	4,299	3,141	2,375
4,265	4,349	2,689	2,395
4,613	4,383	3,098	2,445
5,222	3,862	2,846	2,315
3,383	4,102	2,994	2,245
3,769	4,219	3,015	2,327
4,273	4,115	2,743	2,352
3,612	4,227	2,924	2,357
4,613	3,719	2,403	2,412
3,564	3,466	1,872	2,357
3,939	3,676	2,489	2,374
5,064	3,401	2,245	2,440
4,470	0,000	0,000	2,571
4,056	3,850	2,628	2,695
3,492	4,216	3,136	2,782
3,066	0,020	3,107	2,766
4,457	3,721	3,658	2,716
3,528	2,918	3,554	2,766
3,996	3,682	3,379	2,690
3,743	3,612	2,125	2,600
2,797	4,708	3,028	2,613
4,017	4,079	2,801	2,610
3,407	4,627	2,891	2,752
2,453	4,274	2,789	2,675
3,833	4,859	2,590	2,563
3,568	3,876	2,554	2,439
3,480	4,925	2,686	2,602
2,543	4,490	2,705	2,578
2,510	4,302	2,412	2,375
2,512	3,952	1,861	2,328
3,009	3,628	1,330	2,238
4,029	4,115	1,445	2,288
2,243	4,380	2,003	2,364
3,098	4,389	1,506	2,417
4,984	3,932	1,606	2,395
4,809	4,897	2,884	2,245
3,937	4,148	2,559	2,305
3,841	4,414	2,338	2,310
3,213	4,168	3,522	2,385
3,371	4,393	2,606	2,358

5,248	4,057	2,577	2,248
3,017	4,749	2,981	2,208
5,541	4,301	2,703	3,640
2,920	4,935	3,561	3,910
3,556	4,236	2,778	4,190
3,887	4,104	3,198	4,139
6,892	3,273	2,651	4,446
10,181	3,270	2,810	4,130
8,495	3,600	3,381	3,830
6,941	3,049	3,738	3,847
7,464	3,996	3,540	3,178
3,034	3,242	3,844	3,033
6,330	4,315	2,622	2,892
9,911	4,054	2,015	2,882
9,582	3,724	2,140	2,838
7,990	4,520	1,860	2,821
5,100	3,580	3,170	2,584
4,840	3,940	2,490	2,421
4,539	3,651	1,563	2,382
4,793	3,547	1,706	2,420
5,600	3,790	2,220	2,471
6,410	4,310	2,110	2,736
7,980	4,510	2,250	2,670
6,110	4,280	2,690	2,650
6,760	4,620	3,120	2,711
5,120	4,940	2,670	2,902
4,640	4,400	2,980	2,976
7,310	4,160	3,100	2,884
5,370	4,910	3,160	2,938
5,760	3,940	3,070	2,976
9,480	3,180	3,180	2,842
10,850	3,330	3,330	2,842

Tabla 14: Influencia de la ley de cobre en la concentración de cobre en el PLS.

Fecha	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Razón de cobre soluble y cobre total	Fecha	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Razón de cobre soluble y cobre total	Fecha	Concentración de cobre en el PLS (g/l)	Razón de cobre soluble y cobre total
01-05-2018	2,752	72,412	17-01-2019	75,406	2,477	21-04-2019	2,288	69,914
23-10-2018	3,230	73,240	19-01-2019	75,871	2,574	22-04-2019	2,364	69,757
25-10-2018	3,203	74,942	20-01-2019	76,202	2,542	23-04-2019	2,417	63,183
26-10-2018	3,298	74,714	21-01-2019	75,488	2,580	25-04-2019	2,395	61,802

27-10-2018	3,288	75,278	22-01-2019	75,096	2,522	26-04-2019	2,245	64,903
28-10-2018	3,245	75,225	23-01-2019	69,705	5,718	27-04-2019	2,305	71,722
29-10-2018	3,244	74,976	24-01-2019	74,110	2,463	28-04-2019	2,310	70,302
30-10-2018	3,280	75,686	25-01-2019	75,558	2,522	29-04-2019	2,385	66,723
31-10-2018	3,330	74,423	26-01-2019	74,197	2,607	30-04-2019	2,358	62,769
01-11-2018	3,237	77,571	27-01-2019	70,392	2,633	01-05-2019	2,248	64,973
02-11-2018	3,136	72,654	29-01-2019	76,380	2,683	02-05-2019	2,208	60,691
03-11-2018	3,134	73,630	31-01-2019	73,158	2,631	05-05-2019	2,470	57,981
04-11-2018	2,990	76,398	01-02-2019	70,058	2,791	07-05-2019	2,516	57,859
06-11-2018	2,809	80,254	02-02-2019	70,112	2,759	08-05-2019	2,418	55,320
07-11-2018	2,808	73,633	03-02-2019	71,739	2,708	09-05-2019	2,423	57,576
08-11-2018	2,805	79,880	04-02-2019	69,903	2,822	10-05-2019	2,488	58,829
09-11-2018	3,048	68,534	05-02-2019	72,931	2,952	11-05-2019	2,468	59,135
10-11-2018	3,140	68,463	06-02-2019	70,978	2,739	12-05-2019	2,503	61,127
11-11-2018	3,218	68,587	07-02-2019	70,727	2,798	13-05-2019	2,540	62,620
12-11-2018	3,317	69,810	17-02-2019	73,419	2,387	14-05-2019	2,660	58,379
13-11-2018	3,308	74,567	18-02-2019	72,181	2,336	15-05-2019	2,708	67,237
14-11-2018	3,350	76,631	19-02-2019	72,468	2,164	16-05-2019	2,847	67,377
15-11-2018	3,328	76,385	20-02-2019	68,067	2,117	17-05-2019	2,807	67,957
16-11-2018	3,325	73,465	21-02-2019	68,609	2,100	18-05-2019	2,920	66,636
17-11-2018	3,355	66,046	22-02-2019	69,935	2,106	19-05-2019	3,028	60,179
18-11-2018	3,427	74,441	26-02-2019	73,242	2,010	20-05-2019	2,880	68,970
19-11-2018	3,390	75,140	27-02-2019	70,955	2,137	21-05-2019	2,940	71,434
20-11-2018	3,362	74,809	28-02-2019	68,549	2,013	22-05-2019	2,995	69,647
21-11-2018	3,380	73,483	01-03-2019	68,220	1,972	23-05-2019	2,976	70,069
22-11-2018	3,427	71,419	02-03-2019	69,887	2,041	24-05-2019	2,872	70,886
23-11-2018	3,388	72,044	03-03-2019	66,413	1,953	25-05-2019	2,985	72,973
24-11-2018	3,357	72,128	04-03-2019	70,296	2,064	26-05-2019	3,153	73,173
25-11-2018	3,355	71,353	06-03-2019	70,354	2,147	28-05-2019	3,007	68,698
26-11-2018	3,429	71,296	07-03-2019	68,052	2,069	02-06-2019	2,795	66,950
27-11-2018	3,428	73,200	08-03-2019	67,002	2,106	04-06-2019	2,795	70,415
28-11-2018	3,385	74,747	09-03-2019	67,026	2,127	05-06-2019	2,875	72,029
30-11-2018	3,342	74,586	10-03-2019	69,267	2,101	06-06-2019	2,870	73,605
01-12-2018	3,385	73,243	11-03-2019	70,635	2,294	08-06-2019	3,107	73,552
03-12-2018	3,203	68,117	12-03-2019	68,912	2,279	09-06-2019	2,925	73,831
04-12-2018	3,148	72,451	13-03-2019	72,007	2,298	10-06-2019	3,033	71,936
05-12-2018	3,322	67,721	14-03-2019	70,576	2,152	11-06-2019	3,082	70,658
06-12-2018	3,050	71,870	15-03-2019	67,400	2,033	12-06-2019	3,067	78,341
08-12-2018	2,952	73,079	16-03-2019	64,203	1,960	16-06-2019	2,993	75,748
09-12-2018	2,887	66,623	17-03-2019	61,869	2,045	21-06-2019	3,640	73,010
11-12-2018	2,812	71,967	18-03-2019	63,056	2,099	24-06-2019	3,910	74,787
12-12-2018	2,833	70,410	19-03-2019	68,261	2,298	26-06-2019	4,190	71,043
13-12-2018	2,910	72,475	20-03-2019	67,418	2,220	28-06-2019	4,139	71,784
14-12-2018	2,968	71,371	23-03-2019	64,393	2,417	29-06-2019	4,446	75,607
15-12-2018	2,958	73,017	24-03-2019	66,411	2,535	01-07-2019	4,130	74,298

16-12-2018	2,868	72,964	25-03-2019	64,392	2,450	02-07-2019	3,830	74,378
17-12-2018	2,855	71,340	26-03-2019	67,308	2,536	03-07-2019	3,847	73,635
21-12-2018	2,942	72,768	27-03-2019	63,867	2,666	04-07-2019	3,178	74,383
22-12-2018	2,968	74,553	28-03-2019	57,051	2,266	05-07-2019	3,033	75,004
23-12-2018	2,855	68,359	29-03-2019	58,165	2,410	06-07-2019	2,892	74,886
24-12-2018	2,802	70,075	30-03-2019	57,885	2,879	07-07-2019	2,882	76,334
25-12-2018	2,832	72,447	31-03-2019	54,490	2,351	08-07-2019	2,838	72,525
26-12-2018	2,950	76,486	01-04-2019	64,280	2,561	09-07-2019	2,821	71,940
28-12-2018	3,053	74,727	02-04-2019	64,967	3,309	12-07-2019	2,584	74,728
30-12-2018	2,908	71,487	05-04-2019	64,661	2,627	13-07-2019	2,421	73,772
31-12-2018	2,727	73,787	06-04-2019	64,259	2,747	14-07-2019	2,382	71,754
01-01-2019	2,630	67,418	07-04-2019	60,570	2,559	15-07-2019	2,420	68,903
02-01-2019	2,454	69,598	08-04-2019	60,096	2,525	17-07-2019	2,471	71,877
03-01-2019	2,367	68,767	09-04-2019	57,340	2,143	18-07-2019	2,736	72,867
06-01-2019	2,775	66,924	10-04-2019	57,647	2,313	19-07-2019	2,670	73,789
07-01-2019	2,872	71,960	11-04-2019	56,674	2,181	20-07-2019	2,650	74,029
08-01-2019	2,845	73,798	12-04-2019	52,780	2,257	21-07-2019	2,711	76,051
09-01-2019	2,845	74,272	13-04-2019	58,721	2,221	22-07-2019	2,902	72,750
10-01-2019	2,892	74,846	14-04-2019	68,179	2,473	23-07-2019	2,976	69,643
11-01-2019	2,848	71,962	15-04-2019	71,984	2,326	24-07-2019	2,884	70,132
12-01-2019	2,717	70,253	16-04-2019	71,730	2,264	25-07-2019	2,938	70,720
13-01-2019	2,717	69,334	18-04-2019	73,942	2,200	26-07-2019	2,976	70,720
14-01-2019	2,578	73,148	19-04-2019	69,088	2,190	27-07-2019	2,842	66,966
15-01-2019	2,510	74,608	20-04-2019	71,060	2,407	28-07-2019	2,835	69,216

Tabla 15: Comportamiento de la concentración de cobre en 2019.

Fecha	Concentración de cobre (g/l)		
	PDS	PLS	Refino
01-03-2019	0,68	1,70	0,06
02-03-2019	0,63	1,81	0,04
03-03-2019	0,58	2,06	0,03
04-03-2019	0,71	2,17	0,03
05-03-2019	0,66	2,27	0,05
06-03-2019	0,48	2,25	0,05
07-03-2019	0,48	2,20	0,05
08-03-2019	0,97	2,18	0,06
09-03-2019	1,21	2,17	0,09
10-03-2019	0,83	2,24	0,07
11-03-2019	0,69	2,31	0,09
12-03-2019	0,87	2,20	0,07
13-03-2019	0,97	2,21	0,09
14-03-2019	1,21	2,30	0,10
15-03-2019	0,74	2,33	0,10

16-03-2019	0,76	2,36	0,05
17-03-2019	0,61	2,38	0,06
18-03-2019	0,81	2,41	0,05
19-03-2019	0,88	2,38	0,05
20-03-2019	1,09	2,28	0,05
21-03-2019	0,74	2,30	0,06
22-03-2019	0,79	2,32	0,04
23-03-2019	0,75	2,35	0,06
24-03-2019	0,69	2,38	0,05
25-03-2019	0,67	2,39	0,06
26-03-2019	0,97	2,43	0,07
27-03-2019	0,75	2,38	0,07
28-03-2019	0,91	2,37	0,08
29-03-2019	0,73	2,43	0,07
30-03-2019	1,29	2,55	0,06
31-03-2019	1,66	2,65	0,07
01-04-2019	1,09	2,8	0,07
02-04-2019	0,99	2,79	0,08
03-04-2019	0,85	2,72	0,09
04-04-2019	0,93	2,63	0,18
05-04-2019	1,63	2,71	0,08
06-04-2019	1,43	2,76	0,07
07-04-2019	1,39	2,75	0,08
08-04-2019	0,99	2,69	0,08
09-04-2019	1,17	2,56	0,08
10-04-2019	1,23	2,58	0,06
11-04-2019	1,08	2,74	0,05
12-04-2019	1,26	2,73	0,06
13-04-2019	1,25	2,66	0,06
14-04-2019	1,26	2,48	0,06
15-04-2019	1,00	2,50	0,07
16-04-2019	0,99	2,54	0,06
17-04-2019	1,14	2,50	0,05
18-04-2019	1,16	2,43	0,04
19-04-2019	1,20	2,35	0,06
20-04-2019	0,97	2,29	0,03
21-04-2019	1,00	2,27	0,04
22-04-2019	1,07	2,32	0,04
23-04-2019	0,88	2,43	0,04
24-04-2019	0,97	2,43	0,08
25-04-2019	0,92	2,45	0,20
26-04-2019	0,97	2,32	0,05

27-04-2019	1,07	2,31	0,05
28-04-2019	1,04	2,32	0,04
29-04-2019	0,76	2,36	0,05
30-04-2019	0,98	2,38	0,08
01-05-2019	0,69	2,30	0,08
02-05-2019	0,67	2,23	0,08
03-05-2019	0,68	2,27	0,07
04-05-2019	0,92	2,19	0,06
05-05-2019	0,90	2,21	0,06
06-05-2019	0,86	2,09	0,06
07-05-2019	0,76	2,18	0,06
08-05-2019	1,21	2,19	0,06
09-05-2019	1,01	2,36	0,06
10-05-2019	1,13	2,55	0,05
11-05-2019	1,34	2,72	0,07
12-05-2019	1,38	2,67	0,09
13-05-2019	1,45	2,60	0,08
14-05-2019	1,32	2,53	0,07
15-05-2019	1,46	2,50	0,06
16-05-2019	1,44	2,46	0,06
17-05-2019	1,29	2,44	0,08
18-05-2019	1,26	2,42	0,06
19-05-2019	1,27	2,34	0,06
20-05-2019	1,06	2,32	0,06
21-05-2019	1,01	2,25	0,05
22-05-2019	0,93	2,19	0,06
23-05-2019	0,98	2,23	0,06
24-05-2019	0,99	2,43	0,38
25-05-2019	1,18	2,43	1,03
26-05-2019	1,16	2,43	0,79
27-05-2019	1,07	2,44	0,97
28-05-2019	1,05	2,44	0,98
29-05-2019	0,97	2,38	0,95
30-05-2019	1,02	2,36	0,24
31-05-2019	0,94	2,40	0,15
01-06-2019	1,22	2,40	0,06
02-06-2019	1,03	2,36	0,06
03-06-2019	0,73	2,36	0,07
04-06-2019	0,65	2,36	0,06
05-06-2019	0,55	2,40	0,06
06-06-2019	1,00	2,38	0,05
07-06-2019	0,41	2,39	0,06

08-06-2019	0,67	2,33	0,05
09-06-2019	0,87	2,25	0,04
10-06-2019	0,96	2,24	0,05
11-06-2019	0,50	2,22	0,04
12-06-2019	0,30	2,30	0,04
13-06-2019	0,84	2,34	0,05
15-06-2019	1,63	2,22	0,05
16-06-2019	1,64	2,19	0,24
17-06-2019	1,77	2,13	0,72
18-06-2019	2,11	2,00	0,83
20-06-2019	2,76	2,52	2,07
21-06-2019	2,68	2,81	2,6
22-06-2019	2,16	3,46	2,05
23-06-2019	2,53	3,95	2,24
24-06-2019	2,39	4,09	2,25
25-06-2019	3,09	3,91	3,33
26-06-2019	3,63	4,05	3,11
27-06-2019	4,10	3,96	3,18
28-06-2019	3,75	4,13	3,39
29-06-2019	3,93	4,31	3,44
30-06-2019	2,13	4,38	3,54
01-07-2019	1,65	4,33	0,84
02-07-2019	1,22	4,12	0,44
03-07-2019	1,34	3,90	0,37
04-07-2019	0,77	3,43	0,28
05-07-2019	1,21	3,21	0,15
06-07-2019	0,84	2,97	0,17
07-07-2019	1,47	2,90	0,60
08-07-2019	1,08	2,87	0,96
09-07-2019	1,50	2,96	0,59
10-07-2019	1,38	2,86	0,08
11-07-2019	1,03	2,81	0,19
12-07-2019	0,87	2,79	0,45
13-07-2019	1,01	2,51	0,78
14-07-2019	0,72	2,43	0,44
15-07-2019	0,97	2,38	0,17
16-07-2019	1,37	2,41	0,16
17-07-2019	1,54	2,42	0,20
18-07-2019	1,03	2,58	0,12
19-07-2019	1,07	2,71	0,11
20-07-2019	1,37	2,70	0,14
21-07-2019	1,66	2,80	0,14

22-07-2019	1,68	2,86	0,15
23-07-2019	1,40	2,95	0,16
24-07-2019	1,27	2,91	0,17
25-07-2019	1,66	2,96	0,25
26-07-2019	1,25	2,90	0,23
27-07-2019	1,33	2,85	0,40
28-07-2019	1,51	2,87	0,77
29-07-2019	1,39	2,81	1,05
30-07-2019	1,63	2,76	0,27
31-07-2019	1,79	2,66	0,28
01-08-2019	1,32	2,61	0,20
02-08-2019	1,79	2,53	0,48
03-08-2019	1,38	2,51	0,78
04-08-2019	1,81	2,53	0,69
05-08-2019	1,55	2,61	0,30
06-08-2019	2,80	2,67	0,11
07-08-2019	1,56	2,73	0,16
08-08-2019	1,42	2,88	0,20
09-08-2019	1,58	2,86	0,26
10-08-2019	1,43	2,81	0,28
11-08-2019	1,69	2,95	0,38
12-08-2019	1,69	2,61	0,47
13-08-2019	1,45	2,80	0,35
14-08-2019	1,36	2,59	0,33
15-08-2019	1,32	2,97	0,25
16-08-2019	1,60	2,98	0,25
17-08-2019	1,02	2,48	0,29
18-08-2019	1,43	2,60	0,24
19-08-2019	1,01	2,02	0,20
20-08-2019	1,45	1,98	0,13
21-08-2019	0,92	2,05	0,15
22-08-2019	0,69	1,83	0,10
23-08-2019	0,88	1,63	0,09

A.3 Modelo de la concentración de cobre en el PLS.

Tabla 16: Comparación de la concentración de cobre en el PLS real y simulada.

Fecha	Concentración de cobre simulada (g/l)	Concentración de cobre real (g/l)	Fecha	Concentración de cobre simulada (g/l)	Concentración de cobre real (g/l)	Fecha	Concentración de cobre simulada (g/l)	Concentración de cobre real (g/l)
01-05-2018	2,752	2,711	17-01-2019	2,620	2,477	21-04-2019	2,288	2,312

23-10-2018	3,230	3,145	19-01-2019	2,615	2,574	22-04-2019	2,364	2,216
25-10-2018	3,203	3,127	20-01-2019	2,668	2,542	23-04-2019	2,417	2,113
26-10-2018	3,298	3,137	21-01-2019	2,733	2,580	25-04-2019	2,395	2,236
27-10-2018	3,288	2,980	22-01-2019	2,767	2,522	26-04-2019	2,245	2,101
28-10-2018	3,245	3,181	23-01-2019	2,892	5,718	27-04-2019	2,305	2,326
29-10-2018	3,244	4,462	24-01-2019	2,883	2,463	28-04-2019	2,310	2,379
30-10-2018	3,280	1,535	25-01-2019	2,850	2,522	29-04-2019	2,385	2,442
31-10-2018	3,330	3,009	26-01-2019	2,734	2,607	30-04-2019	2,358	2,411
01-11-2018	3,237	3,140	27-01-2019	2,799	2,633	01-05-2019	2,248	2,567
02-11-2018	3,136	3,033	29-01-2019	2,723	2,683	02-05-2019	2,208	2,296
03-11-2018	3,134	2,810	31-01-2019	2,893	2,631	05-05-2019	2,470	2,294
04-11-2018	2,990	3,035	01-02-2019	3,017	2,791	07-05-2019	2,516	2,340
06-11-2018	2,809	2,870	02-02-2019	2,985	2,759	08-05-2019	2,418	2,379
07-11-2018	2,808	2,742	03-02-2019	2,990	2,708	09-05-2019	2,423	2,459
08-11-2018	2,805	2,886	04-02-2019	2,992	2,822	10-05-2019	2,488	2,459
09-11-2018	3,048	2,821	05-02-2019	2,913	2,952	11-05-2019	2,468	2,557
10-11-2018	3,140	2,946	06-02-2019	2,930	2,739	12-05-2019	2,503	2,468
11-11-2018	3,218	3,106	07-02-2019	2,803	2,798	13-05-2019	2,540	2,324
12-11-2018	3,317	3,170	17-02-2019	2,685	2,387	14-05-2019	2,660	2,168
13-11-2018	3,308	3,118	18-02-2019	2,641	2,336	15-05-2019	2,708	2,314
14-11-2018	3,350	3,161	19-02-2019	2,558	2,164	16-05-2019	2,847	2,342
15-11-2018	3,328	3,226	20-02-2019	2,548	2,117	17-05-2019	2,807	2,458
16-11-2018	3,325	1,448	21-02-2019	2,320	2,100	18-05-2019	2,920	2,264
17-11-2018	3,355	1,327	22-02-2019	2,182	2,106	19-05-2019	3,028	2,275
18-11-2018	3,427	1,599	26-02-2019	1,322	2,010	20-05-2019	2,880	2,374
19-11-2018	3,390	1,578	27-02-2019	1,620	2,137	21-05-2019	2,940	2,429
20-11-2018	3,362	3,344	28-02-2019	1,633	2,013	22-05-2019	2,995	2,373
21-11-2018	3,380	2,938	01-03-2019	1,690	1,972	23-05-2019	2,976	2,341
22-11-2018	3,427	3,039	02-03-2019	1,852	2,041	24-05-2019	2,872	2,397
23-11-2018	3,388	3,060	03-03-2019	2,056	1,953	25-05-2019	2,985	3,106
24-11-2018	3,357	2,907	04-03-2019	2,218	2,064	26-05-2019	3,153	3,147
25-11-2018	3,355	2,950	06-03-2019	2,212	2,147	28-05-2019	3,007	2,451
26-11-2018	3,429	2,987	07-03-2019	2,162	2,069	02-06-2019	2,795	2,233
27-11-2018	3,428	3,016	08-03-2019	2,170	2,106	04-06-2019	2,795	2,485
28-11-2018	3,385	3,213	09-03-2019	2,172	2,127	05-06-2019	2,875	2,479

30-11-2018	3,342	2,649	10-03-2019	2,265	2,101	06-06-2019	2,870	2,352
01-12-2018	3,385	2,539	11-03-2019	2,253	2,294	08-06-2019	3,107	2,275
03-12-2018	3,203	2,969	12-03-2019	2,155	2,279	09-06-2019	2,925	2,308
04-12-2018	3,148	3,101	13-03-2019	2,286	2,298	10-06-2019	3,033	2,114
05-12-2018	3,322	2,695	14-03-2019	2,348	2,152	11-06-2019	3,082	2,217
06-12-2018	3,050	2,793	15-03-2019	2,341	2,033	12-06-2019	3,067	2,511
08-12-2018	2,952	2,684	16-03-2019	2,375	1,960	16-06-2019	2,993	1,023
09-12-2018	2,887	2,595	17-03-2019	2,395	2,045	21-06-2019	3,640	1,035
11-12-2018	2,812	2,849	18-03-2019	2,445	2,099	24-06-2019	3,910	0,879
12-12-2018	2,833	2,825	19-03-2019	2,315	2,298	26-06-2019	4,190	0,951
13-12-2018	2,910	2,763	20-03-2019	2,245	2,220	28-06-2019	4,139	4,168
14-12-2018	2,968	2,840	23-03-2019	2,327	2,417	29-06-2019	4,446	4,142
15-12-2018	2,958	1,604	24-03-2019	2,352	2,535	01-07-2019	4,130	4,168
16-12-2018	2,868	2,671	25-03-2019	2,357	2,450	02-07-2019	3,830	3,566
17-12-2018	2,855	2,898	26-03-2019	2,412	2,536	03-07-2019	3,847	3,390
21-12-2018	2,942	2,644	27-03-2019	2,357	2,666	04-07-2019	3,178	3,100
22-12-2018	2,968	2,761	28-03-2019	2,374	2,266	05-07-2019	3,033	2,891
23-12-2018	2,855	2,538	29-03-2019	2,440	2,410	06-07-2019	2,892	2,534
24-12-2018	2,802	2,592	30-03-2019	2,571	2,879	07-07-2019	2,882	2,800
25-12-2018	2,832	2,859	31-03-2019	2,695	2,351	08-07-2019	2,838	2,638
26-12-2018	2,950	2,909	01-04-2019	2,782	2,561	09-07-2019	2,821	2,658
28-12-2018	3,053	2,907	02-04-2019	2,766	3,309	12-07-2019	2,584	2,629
30-12-2018	2,908	2,844	05-04-2019	2,716	2,627	13-07-2019	2,421	2,513
31-12-2018	2,727	2,719	06-04-2019	2,766	2,747	14-07-2019	2,382	2,543
01-01-2019	2,630	2,664	07-04-2019	2,690	2,559	15-07-2019	2,420	2,529
02-01-2019	2,454	2,548	08-04-2019	2,600	2,525	17-07-2019	2,471	2,594
03-01-2019	2,367	2,482	09-04-2019	2,613	2,143	18-07-2019	2,736	2,661
06-01-2019	2,775	2,684	10-04-2019	2,610	2,313	19-07-2019	2,670	2,788
07-01-2019	2,872	3,081	11-04-2019	2,752	2,181	20-07-2019	2,650	2,731
08-01-2019	2,845	2,798	12-04-2019	2,675	2,257	21-07-2019	2,711	2,806
09-01-2019	2,845	2,806	13-04-2019	2,563	2,221	22-07-2019	2,902	2,888
10-01-2019	2,892	2,765	14-04-2019	2,439	2,473	23-07-2019	2,976	2,963
11-01-2019	2,848	2,617	15-04-2019	2,602	2,326	24-07-2019	2,884	3,001
12-01-2019	2,717	2,339	16-04-2019	2,578	2,264	25-07-2019	2,938	2,704
13-01-2019	2,717	2,363	18-04-2019	2,375	2,200	26-07-2019	2,976	3,426

14-01-2019	2,578	2,854	19-04-2019	2,328	2,190	27-07-2019	2,842	3,053
15-01-2019	2,510	2,798	20-04-2019	2,238	2,407	28-07-2019	2,835	3,015

Tabla 17: Comparación de la concentración de cobre en el PLS real y simulada con datos depurados.

N°	Concentración de cobre		N°	Concentración de cobre		N°	Concentración de cobre		N°	Concentración de cobre	
	Real	Simulada		Real	Simulada		Real	Simulada		Real	Simulada
	g/l			g/l			g/l			(g/l)	
1	2,752	2,711	48	2,832	2,859	95	1,852	2,041	142	2,395	2,236
2	3,230	3,145	49	2,950	2,909	96	2,056	1,953	143	2,245	2,101
3	3,203	3,127	50	3,053	2,907	97	2,218	2,064	144	2,305	2,326
4	3,298	3,137	51	2,908	2,844	98	2,212	2,147	145	2,310	2,379
5	3,288	2,980	52	2,727	2,719	99	2,162	2,069	146	2,385	2,442
6	3,245	3,181	53	2,630	2,664	100	2,170	2,106	147	2,358	2,411
7	3,244	4,462	54	2,454	2,548	101	2,172	2,127	148	2,248	2,567
8	3,330	3,009	55	2,367	2,482	102	2,265	2,101	149	2,208	2,296
9	3,237	3,140	56	2,775	2,684	103	2,253	2,294	150	4,139	4,168
10	3,136	3,033	57	2,872	3,081	104	2,155	2,279	151	4,446	4,142
11	3,134	2,810	58	2,845	2,798	105	2,286	2,298	152	4,130	4,168
12	2,990	3,035	59	2,845	2,806	106	2,348	2,152	153	3,830	3,566
13	2,809	2,870	60	2,892	2,765	107	2,341	2,033	154	3,847	3,390
14	2,808	2,742	61	2,848	2,617	108	2,375	1,960	155	3,178	3,100
15	2,805	2,886	62	2,717	2,339	109	2,395	2,045	156	3,033	2,891
16	3,048	2,821	63	2,717	2,363	110	2,445	2,099	157	2,892	2,534
17	3,140	2,946	64	2,578	2,854	111	2,315	2,298	158	2,882	2,800
18	3,218	3,106	65	2,510	2,798	112	2,245	2,220	159	2,838	2,638
19	3,317	3,170	66	2,620	2,477	113	2,327	2,417	160	2,821	2,658

20	3,308	3,118	67	2,615	2,574	114	2,352	2,535	161	2,584	2,629
21	3,350	3,161	68	2,668	2,542	115	2,357	2,450	162	2,421	2,513
22	3,328	3,226	69	2,733	2,580	116	2,412	2,536	163	2,382	2,543
23	3,362	3,344	70	2,767	2,522	117	2,357	2,666	164	2,420	2,529
24	3,380	2,938	71	2,892	5,718	118	2,374	2,266	165	2,471	2,594
25	3,427	3,039	72	2,883	2,463	119	2,440	2,410	166	2,736	2,661
26	3,388	3,060	73	2,850	2,522	120	2,571	2,879	167	2,670	2,788
27	3,357	2,907	74	2,734	2,607	121	2,695	2,351	168	2,650	2,731
28	3,355	2,950	75	2,799	2,633	122	2,782	2,561	169	2,711	2,806
29	3,429	2,987	76	2,723	2,683	123	2,766	3,309	170	2,902	2,888
30	3,428	3,016	77	2,893	2,631	124	2,716	2,627	171	2,976	2,963
31	3,385	3,213	78	3,017	2,791	125	2,766	2,747	172	2,884	3,001
32	3,203	2,969	79	2,985	2,759	126	2,690	2,559	173	2,938	2,704
33	3,148	3,101	80	2,990	2,708	127	2,600	2,525	174	2,976	3,426
34	3,322	2,695	81	2,992	2,822	128	2,613	2,143	175	2,842	3,053
35	3,050	2,793	82	2,913	2,952	129	2,610	2,313	176	2,835	3,015
36	2,952	2,684	83	2,930	2,739	130	2,752	2,181	177	2,810	2,681
37	2,887	2,595	84	2,803	2,798	131	2,675	2,257	178	2,752	2,398
38	2,812	2,849	85	2,685	2,387	132	2,563	2,221	179	2,564	2,414
39	2,833	2,825	86	2,641	2,336	133	2,439	2,473	180	2,610	2,470
40	2,910	2,763	87	2,558	2,164	134	2,602	2,326	181	2,480	2,618
41	2,968	2,840	88	2,548	2,117	135	2,578	2,264	182	2,514	2,611
42	2,868	2,671	89	2,320	2,100	136	2,375	2,200	183	2,651	2,513
43	2,855	2,898	90	2,182	2,106	137	2,328	2,190	184	2,697	2,443
44	2,942	2,644	91	1,322	2,010	138	2,238	2,407	185	2,703	2,456

45	2,968	2,761	92	1,620	2,137	139	2,288	2,312	186	2,760	2,658
46	2,855	2,538	93	1,633	2,013	140	2,364	2,216	187	2,870	2,728
47	2,802	2,592	94	1,690	1,972	141	2,417	2,113	188	2,880	2,941

Tabla 18: Comportamiento de la concentración de cobre real y simulada en 2019.

PLS	Real	Simulado
Fecha	[Cu+2] (g/l)	[Cu+2] (g/l)
22-03-2019	2,32	10,85
23-03-2019	2,35	9,61
24-03-2019	2,38	10,78
25-03-2019	2,39	8,53
26-03-2019	2,43	7,56
27-03-2019	2,38	6,82
28-03-2019	2,37	8,24
29-03-2019	2,43	7,63
30-03-2019	2,55	7,53
31-03-2019	2,65	6,79
01-04-2019	2,80	6,82
02-04-2019	2,79	6,14
03-04-2019	2,72	6,53
04-04-2019	2,63	5,98
05-04-2019	2,71	5,59
06-04-2019	2,76	5,21
07-04-2019	2,75	5,19
08-04-2019	2,69	6,43
09-04-2019	2,56	6,00
10-04-2019	2,58	5,48
11-04-2019	2,74	5,44
12-04-2019	2,73	5,56
13-04-2019	2,66	5,60
14-04-2019	2,48	5,97
15-04-2019	2,50	5,48
16-04-2019	2,54	6,15
17-04-2019	2,50	5,72
18-04-2019	2,43	5,64
19-04-2019	2,35	5,24
20-04-2019	2,29	5,35
21-04-2019	2,27	5,58
22-04-2019	2,32	5,91
23-04-2019	2,43	5,75
24-04-2019	2,43	5,36
25-04-2019	2,45	4,89

26-04-2019	2,32	4,90
27-04-2019	2,31	4,45
28-04-2019	2,32	4,08
29-04-2019	2,36	4,07
30-04-2019	2,38	4,72
01-05-2019	2,30	5,18
02-05-2019	2,23	4,75
03-05-2019	2,27	4,61
04-05-2019	2,19	4,92
05-05-2019	2,21	4,41
06-05-2019	2,09	3,94
07-05-2019	2,18	3,71
08-05-2019	2,19	3,47
09-05-2019	2,36	3,20
10-05-2019	2,55	5,01
11-05-2019	2,72	4,75
12-05-2019	2,67	4,48
13-05-2019	2,60	4,32
14-05-2019	2,53	4,20
15-05-2019	2,50	3,97
16-05-2019	2,46	3,70
17-05-2019	2,44	3,48
18-05-2019	2,42	3,39
19-05-2019	2,34	3,28
20-05-2019	2,32	3,03
21-05-2019	2,25	2,83
22-05-2019	2,19	2,64
23-05-2019	2,23	2,50
24-05-2019	2,43	2,29
25-05-2019	2,43	2,21
26-05-2019	2,43	1,94
27-05-2019	2,44	1,91
28-05-2019	2,44	1,81
29-05-2019	2,38	1,85
30-05-2019	2,36	1,77
31-05-2019	2,40	1,71
01-06-2019	2,40	1,64
02-06-2019	2,36	1,59
03-06-2019	2,36	1,59
04-06-2019	2,36	1,67
05-06-2019	2,40	1,71
06-06-2019	2,38	1,46
07-06-2019	2,39	1,31
08-06-2019	2,33	1,28
09-06-2019	2,25	1,39

10-06-2019	2,24	1,38
11-06-2019	2,22	2,61
12-06-2019	2,30	1,54
13-06-2019	2,34	1,63
15-06-2019	2,22	1,27
16-06-2019	2,19	1,46
17-06-2019	2,13	1,65
18-06-2019	2,00	2,00
20-06-2019	2,52	2,51
21-06-2019	2,81	2,71
22-06-2019	3,46	2,93
23-06-2019	3,95	3,20
24-06-2019	4,09	3,47
25-06-2019	3,91	3,26
26-06-2019	4,05	3,21
27-06-2019	3,96	3,37
28-06-2019	4,13	3,64
29-06-2019	4,31	4,21
30-06-2019	4,38	4,60
01-07-2019	4,33	4,71
02-07-2019	4,12	4,72
03-07-2019	3,90	3,90
04-07-2019	3,43	2,95
05-07-2019	3,21	2,60
06-07-2019	2,97	2,46
07-07-2019	2,90	2,19
08-07-2019	2,87	2,10
09-07-2019	2,96	2,09
10-07-2019	2,86	2,17
11-07-2019	2,81	2,26
12-07-2019	2,79	2,51
13-07-2019	2,51	2,79
14-07-2019	2,43	2,58
15-07-2019	2,38	2,38
16-07-2019	2,41	2,32
17-07-2019	2,42	2,25
18-07-2019	2,58	2,15
19-07-2019	2,71	2,41
20-07-2019	2,70	2,70
21-07-2019	2,80	2,57
22-07-2019	2,86	2,42
23-07-2019	2,95	2,58
24-07-2019	2,91	2,99
25-07-2019	2,96	3,04
26-07-2019	2,90	2,75

27-07-2019	2,85	2,79
28-07-2019	2,87	2,95
29-07-2019	2,81	2,63

Anexo B

Recuperación de cobre.

B.1 Variables significativas para la recuperación de cobre según “Design Expert”.

Tabla 19: Comportamiento de la recuperación de cobre.

Pila	Vuelta	Promedio de la recuperación de cobre
		%
Norte	26	56,36
Sur	26	68,53
Norte	27	64,29
Sur	27	73,73
Norte	28	68,44
Sur	28	63,74

Tabla 20: Comportamiento de la recuperación de cobre con la concentración de cobre del primer efluente.

Módulos	Recuperación de cobre	Cobre del primer efluente
N°	%	g/l
1	74,92	16,5
2	75,57	16,1
3	62,92	15,4
4	72,93	15,5
5	66,91	18,9
6	72,32	16,2
7	72,76	17,3
8	73,85	15,6
9	72,57	18,6
10	74,40	16,2
11	64,94	16,5
12	63,44	14,0
13	70,98	15,7
14	73,81	17,7
15	66,92	16,2
16	70,43	17,7

17	66,55	18,1
18	69,55	22,8
19	63,87	19,4
20	55,33	17,1
21	58,93	16,5
22	56,94	15,2
23	55,07	14,2
24	57,02	14,1
25	60,55	14,6
26	66,40	18,4
27	66,91	20,5
28	50,71	18,4
29	53,71	13,6
30	57,77	9,5
31	51,95	10,3
32	65,21	12,4
33	63,59	11,4
34	66,56	14,9
35	45,03	12,9
36	66,21	11,6
37	65,38	15,6
38	48,47	12,3
39	62,08	12,4
40	67,09	18,3
41	44,59	4,4
42	61,04	14,1
43	65,56	16,8
44	58,72	12,7
45	59,98	11,2
46	66,53	11,9
47	49,53	11,4
48	58,53	8,4
49	53,52	12,8
50	64,25	14,6

Tabla 21: Comportamiento de la recuperación de cobre con la acidez del primer efluente.

Módulos	Recuperación de cobre	Acidez del primer efluente
N°	%	g/l
1	74,92	0,7

2	75,57	1,0
3	62,92	1,1
4	72,93	1,0
5	66,91	2,0
6	72,32	2,4
7	72,76	2,6
8	73,85	0,7
9	72,57	0,8
10	74,40	1,0
11	64,94	1,2
12	63,44	1,2
13	70,98	1,8
14	73,81	1,5
15	66,92	1,1
16	70,43	1,1
17	66,55	2,5
18	69,55	1,2
19	63,87	1,5
20	55,33	2,4
21	58,93	3,3
22	56,94	2,0
23	55,07	1,7
24	57,02	1,0
25	60,55	1,0
26	66,40	2,2
27	66,91	1,1
28	50,71	1,4
29	53,71	3,4
30	57,77	3,5
31	51,95	3,1
32	65,21	2,8
33	63,59	2,6
34	66,56	2,6
35	45,03	1,1
36	66,21	1,4
37	65,38	0,7
38	48,47	4,0
39	62,08	2,1
40	67,09	8,1
41	44,59	9,1
42	61,04	2,8
43	65,56	1,8

44	58,72	2,0
45	59,98	1,9
46	66,53	1,7
47	49,53	1,6
48	58,53	2,2
49	53,52	4,1
50	64,25	2,3

Tabla 22: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría ¾".

Módulos	Recuperación de cobre	Granulometría ¾"
N°	%	%
1	74,92	4,4
2	75,57	4,2
3	62,92	4,2
4	72,93	5,0
5	66,91	4,6
6	72,32	2,1
7	72,76	4,3
8	73,85	4,3
9	72,57	5,6
10	74,40	4,1
11	64,94	4,0
12	63,44	4,3
13	70,98	4,6
14	73,81	5,2
15	66,92	3,8
16	70,43	4,3
17	66,55	3,6
18	69,55	4,6
19	63,87	3,6
20	55,33	3,9
21	58,93	5,1
22	56,94	4,5
23	55,07	4,1
24	57,02	3,1
25	60,55	4,5
26	66,40	3,5
27	66,91	4,0
28	50,71	3,7
29	53,71	3,4

30	57,77	2,5
31	51,95	3,8
32	65,21	3,6
33	63,59	3,5
34	66,56	2,5
35	45,03	2,5
36	66,21	2,5
37	65,38	3,0
38	48,47	4,0
39	62,08	3,9
40	67,09	3,8
41	44,59	3,2
42	61,04	3,4
43	65,56	5,2
44	58,72	3,0
45	59,98	2,7
46	66,53	2,8
47	49,53	3,2
48	58,53	2,9
49	53,52	4,8
50	64,25	3,3

Tabla 23: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría 1/4".

Módulos	Recuperación de cobre	Granulometría 1/4"
N°	%	%
1	74,92	23,3
2	75,57	22,6
3	62,92	21,7
4	72,93	20,0
5	66,91	23,0
6	72,32	23,6
7	72,76	25,7
8	73,85	23,9
9	72,57	19,7
10	74,4	20,8
11	64,94	22,5
12	63,44	23,7
13	70,98	22,5
14	73,81	23,5
15	66,92	22,4

16	70,43	20,7
17	66,55	22,5
18	69,55	21,9
19	63,87	22,9
20	55,33	22,6
21	58,93	21,6
22	56,94	22,5
23	55,07	23,1
24	57,02	23,6
25	60,55	21,2
26	66,40	22,1
27	66,91	24,6
28	50,71	23,5
29	53,71	23,6
30	57,77	22,7
31	51,95	23,1
32	65,21	25,9
33	63,59	22,7
34	66,56	24,6
35	45,03	24,4
36	66,21	26,5
37	65,38	26,8
38	48,47	25,0
39	62,08	25,6
40	67,09	26,7
41	44,59	26,2
42	61,04	25,0
43	65,56	26,7
44	58,72	22,5
45	59,98	23,2
46	66,53	24,1
47	49,53	24,3
48	58,53	25,6
49	53,52	23,3
50	64,25	23,6

Tabla 24: Comportamiento de la recuperación de cobre con la granulometría de 200 #.

Módulos	Recuperación de cobre	Granulometría 200 #
N°	%	%
1	74,92	2,6

2	75,57	2,5
3	62,92	2,9
4	72,93	2,7
5	66,91	3,0
6	72,32	3,0
7	72,76	2,9
8	73,85	3,0
9	72,57	3,0
10	74,40	2,8
11	64,94	3,1
12	63,44	2,7
13	70,98	3,1
14	73,81	2,8
15	66,92	3
16	70,43	2,7
17	66,55	2,9
18	69,55	2,4
19	63,87	1,9
20	55,33	2,5
21	58,93	2,2
22	56,94	0,0
23	55,07	2,6
24	57,02	3,1
25	60,55	3,7
26	66,40	3,6
27	66,91	3,4
28	50,71	2,1
29	53,71	2,9
30	57,77	2,8
31	51,95	2,6
32	65,21	2,6
33	63,59	2,7
34	66,56	2,7
35	45,03	2,4
36	66,21	1,9
37	65,38	1,3
38	48,47	1,4
39	62,08	2,6
40	67,09	2,3
41	44,59	3,5
42	61,04	2,6
43	65,56	2,6

44	58,72	3,0
45	59,98	3,6
46	66,53	3,3
47	49,53	3,2
48	58,53	3,1
49	53,52	3,3
50	64,25	3,3

Tabla 25: Comportamiento de la recuperación de cobre con la tasa de curado.

Módulos	Recuperación de cobre	Tasa de curado
N°	%	kg ácido/tms
1	74,92	13,3
2	75,57	12,1
3	62,92	12,5
4	72,93	13,0
5	66,91	13,2
6	72,32	12,9
7	72,76	12,7
8	73,85	12,7
9	72,57	13,0
10	74,40	12,9
11	64,94	13,0
12	63,44	13,0
13	70,98	12,8
14	73,81	12,5
15	66,92	12,6
16	70,43	12,4
17	66,55	12,5
18	69,55	13,4
19	63,87	13,8
20	55,33	13,7
21	58,93	13,8
22	56,94	13,9
23	55,07	13,9
24	57,02	12,9
25	60,55	12,2
26	66,40	12,8
27	66,91	12,3
28	50,71	12,3
29	53,71	12,6

30	57,77	12,1
31	51,95	12,7
32	65,21	12,0
33	63,59	13,0
34	66,56	13,9
35	45,03	12,1
36	66,21	12,5
37	65,38	11,4
38	48,47	11,2
39	62,08	12,7
40	67,09	12,2
41	44,59	12,8
42	61,04	12,8
43	65,56	11,7
44	58,72	11,6
45	59,98	11,4
46	66,53	12,5
47	49,53	12,4
48	58,53	12,7
49	53,52	12,6
50	64,25	12,6

Tabla 26: Comportamiento de la recuperación de cobre con la razón de agua.

Módulos	Recuperación de cobre	Razón de agua
N°	%	kg agua/tms
1	74,92	20,9
2	75,57	19,0
3	62,92	19,4
4	72,93	18,8
5	66,91	18,8
6	72,32	19,7
7	72,76	19,5
8	73,85	19,4
9	72,57	19,6
10	74,40	19,5
11	64,94	19,7
12	63,44	19,7
13	70,98	19,5
14	73,81	19,0

15	66,92	18,3
16	70,43	17,5
17	66,55	20,0
18	69,55	19,2
19	63,87	20,0
20	55,33	19,8
21	58,93	20,0
22	56,94	20,2
23	55,07	20,2
24	57,02	21,5
25	60,55	20,5
26	66,40	21,3
27	66,91	20,8
28	50,71	21,1
29	53,71	21,1
30	57,77	20,2
31	51,95	21,2
32	65,21	20,1
33	63,59	21,9
34	66,56	23,6
35	45,03	20,3
36	66,21	21,1
37	65,38	21,1
38	48,47	21,1
39	62,08	21,2
40	67,09	20,4
41	44,59	21,6
42	61,04	21,6
43	65,56	19,8
44	58,72	19,9
45	59,98	14,4
46	66,53	19,9
47	49,53	19,7
48	58,53	20,3
49	53,52	20,9
50	64,25	21,3

Tabla 27: Comportamiento de la recuperación de cobre con la masa húmeda.

Módulos	Recuperación de cobre	Masa húmeda
N°	%	tonH

1	74,92	40051,2
2	75,57	41587,2
3	62,92	40653,3
4	72,93	40105,6
5	66,91	44524,1
6	72,32	38515,7
7	72,76	41268,6
8	73,85	41143,4
9	72,57	41742,2
10	74,40	41613,1
11	64,94	37107,3
12	63,44	48502,6
13	70,98	48305,7
14	73,81	41528,9
15	66,92	53063,0
16	70,43	48186,2
17	66,55	45475,5
18	69,55	48691,2
19	63,87	50676,1
20	55,33	49460,1
21	58,93	50692,2
22	56,94	48263,2
23	55,07	49860,3
24	57,02	47647,4
25	60,55	50278,7
26	66,40	46621,2
27	66,91	45695,1
28	50,71	47494,8
29	53,71	45614,2
30	57,77	46574,4
31	51,95	50883,0
32	65,21	49325,3
33	63,59	52403,4
34	66,56	47075,0
35	45,03	45923,8
36	66,21	51491,3
37	65,38	48344,6
38	48,47	48015,6
39	62,08	48546,8
40	67,09	47371,6
41	44,59	46568,9
42	61,04	43880,6

43	65,56	50002,0
44	58,72	45496,6
45	59,98	53531,7
46	66,53	46954,7
47	49,53	51628,6
48	58,53	46989,6
49	53,52	49555,4
50	64,25	48240,4

Anexo C

Determinación de constantes del modelo cinético.

C.1 Determinación de la constante de la parte lineal del modelo

$$\begin{aligned}
 K = & 1.09E - 2 - 6.5E - 5 * \text{Riego Continuo} - 6E - 5 * \text{Riego On/Off} - 1.75E - 4 \\
 & * t_{1er\ efluente} - 6.39E - 8 * \text{tonH} - 8.23E - 3 * \text{Ley Cu} + 2.7E - 4 \\
 & * \text{Tasa de Curado} - 2.5E - 5 * \text{Granulometría}0.25" + 3.7E - 5 \\
 & * [Cu^{+2}]_{1er\ efluente}
 \end{aligned} \tag{35}$$

C.2 Determinación de las constantes de la parte cuadrática del modelo

$$\begin{aligned}
 a = & 8.33E - 3 - 3.6E - 5 * \text{Riego Continuo} + 1.82E - 3 * \text{Ley Cu} - 8.4E - 5 \\
 & * \text{Tasa de Curado} - 1.38E - 4 * \text{Razón de agua} - 1.22E - 3 \\
 & * \text{Granulometría} 0.75"-1.21E-3*\text{Granulometría}0.5" - 5.34E - 4 \\
 & * \text{Granulometría}0.25" - 1.8E - 4 * \text{Granulometría}10\# - 2.77E - 4 \\
 & * [H^+]_{promedio}
 \end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
 b = & 26.64 + 9.11E - 2 * \text{Riego Continuo} + 2.85E - 1 * \text{Tasa de Curado} + 2.1E - 1 \\
 & * \text{Razón de agua} + 2.16 \\
 & * \text{Granulometría}0.75"+2.21*\text{Granulometría}0.5" + 3.65E - 1 \\
 & * \text{Granulometría}0.25" - 4.55e - 2 * \text{Granulometría}50\# + 5.64E - 2 \\
 & * \text{Granulometría} - 200\#
 \end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
 c = & 4.54 - 8.67E - 3 * \text{Riego} \frac{On}{Off} + 2.81E - 6 * \text{tonH} + 2.02E - 2 \\
 & * \text{Razón de agua} + 2.18E - 1 \\
 & * \text{Granulometría}0.75"+2.37E-1*\text{Granulometría}0.5"+2.93E - 2 \\
 & * \text{Granulometría}0.25" - 1.41E - 2 * \text{Granulometría}100\# - 6.63E \\
 & - 3 * [H^+]_{1er\ efluente}
 \end{aligned} \tag{38}$$

Hoja de resumen.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Desarrollo de un modelo para predecir la concentración de cobre en el PLS del proyecto “Lixiviación de Ripios” de la Gerencia de Extracción y Lixiviación, CODELCO – División Chuquicamata.

Nombre Memorista: Javiera Belén Aravena Maureira

Modalidad		Profesor(es) Patrocinante(s)  Prof. Fernando Parada Luna
Concepto		
Calificación		
Fecha		
Prof. Eugenia Araneda H.		Institución: CODELCO – División Chuquicamata.

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. Óscar Jerez Riveros

Prof. María Cristina Ruiz P.

Resumen

El presente estudio se desarrolló en la Gerencia de lixiviación de Chuquicamata y los objetivos fueron identificar las variables que influyen en la concentración de cobre en el PLS para disminuir la incertidumbre que existe en su predicción, definir capacidades máximas y mínimas del sistema de transporte y almacenamiento de soluciones, proponer un estándar de operación para el proceso de lixiviación y desarrollar un modelo predictivo para la concentración de cobre en el PLS.

En la planta de lixiviación en pilas se trabaja con ripios de minerales oxidados de cobre cuya composición mineralógica es variable, con una ley media de 0.35% de cobre total. Los ripios se apilan formando 108 módulos distribuidos por igual en 2 pilas que se riegan con refino y solución intermedia, operando de esta forma desde el 4 de febrero del 2018 hasta hoy en día.

Durante la recopilación de datos operacionales en el área de lixiviación, se observó que existe una cantidad importante de datos errados, o sin medición, por ende es imposible realizar un balance metalúrgico bien dimensionado, incluso ajustando parámetros en sectores puntuales, ya que es un sistema linealmente dependiente.

Posteriormente se estudió el manejo de soluciones que circulan por la planta, donde el movimiento se realiza por impulsión con bombas y por gravedad, con un sistema semi-automático (con manejo manual y mecánico de las válvulas), existiendo un transporte fluido-dinámico de 2400 m³/h, los cuales se distribuyen en 2 trenes descendientes de refino, que terminan en el pond de refino y pond de la solución intermedia (PDS). Tanto refino como PDS son las soluciones lixiviantes con alrededor de 2200 m³/h de PDS y 800 m³/h de refino, obteniendo solución débil (PDS) y rica en cobre (PLS). Esta última termina subiendo en la estación de re-impulsión (booster) por 2 líneas y alimentando la extracción por solvente. El manejo de soluciones se entiende como un sistema simple al visualizarlo de manera global, pero al ir desglosando el movimiento de los fluidos en detalle se encuentran varias desviaciones, siendo muy difícil de comprender y clasificar, ya que su distribución es sumamente compleja.

Uno de los problemas es que en varios sectores existe sobreacumulación de fluidos, lo que produce pérdidas de solución por rebalse, razón por la cual no sale la misma cantidad que ingresa. Otra dificultad es la turbidez de las soluciones y el desconocimiento del terreno por parte del personal que toma decisiones. Para solucionar los dos primeros problemas se contrató una empresa externa. La solución consistió contener los fluidos y, al mismo tiempo, evitar que se produjera una solución turbia. Para esto fue necesario el uso de un contenedor, el que a su vez estaba subdividido en dos contenedores y en medio de estos había un filtro. La presencia de ambos contenedores y el filtro hacía posible que cuando hubiese acumulación de sólidos, estos pasaran del primer al segundo recipiente y de este modo, cada cierto tiempo se pudiera extraer los sólidos acumulados. Para el último problema se realizaron levantamientos en terreno vía Google Earth documentando todas las cañerías correspondientes al área de lixiviación.

Para el desarrollo del modelo se utilizaron datos reales de operación, que fueron relacionados con las variables seleccionadas anteriormente y el sistema hidráulico de la planta, donde se emplearon 3 herramientas computacionales (“Microsoft Excel”, “PI Processbook” y “Design Expert”). Con este último se obtuvo en primer lugar la selección de variables que impactan a la concentración de cobre en el PLS, luego una ecuación lineal, que era la más apropiada para el ajuste estadístico, y se emplearon dichos parámetros para evaluar la sensibilidad del modelo.

Las variables que influyen en la concentración de cobre en el PLS, son granulometría, ley, flujo de refino y de PDS, siendo estas 2 últimas las primordiales para la eficiencia del proceso. Además, se concluye que para optimizar la recuperación de cobre en el proceso se debe trabajar con una masa de apilamiento de 40000 tonH, una tasa de curado de 13 kg ácido/tms y una razón de agua de 19 kg agua/tms.

A partir de los datos que se obtuvieron durante 18 meses y bajo las condiciones de humedad típica del ripio que está entre 6-8%, tasa de curado 12 kg ácido/tms y razón de agua de 20 kg agua/tms en la aglomeración, y para el riego un flujo específico de riego de 40m³/hr, modificación del estándar de riego, independiente de la concentración de ácido sulfúrico, puesto que su consumo siempre es constante, se obtuvo una aproximación por medio del modelo de “Design Expert” con 7.7% de error promedio con datos desde mayo del 2018 hasta el 9 de agosto del 2019. Se evaluó la aproximación del modelo, es decir, el porcentaje de error promedio, ante futuros resultados de la concentración de cobre en el PLS siendo demasiado sensible a ruidos del sistema, esto significa que cuando una variable contemplada en la ecuación del modelo no concordaba con el rango normal de operación, la concentración de cobre en el PLS se alteraba significativamente.

Finalmente, con respecto al modelo propuesto este aproxima de manera cercana la concentración de cobre en el PLS, con un error promedio de 6.4% para los últimos antecedentes y a medida que se van incluyendo nuevos datos dicho error irá disminuyendo, además este modelo no depende significativamente de cambios abruptos en las variables recién mencionadas.