

Universidad de Concepción

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Fernando Parada L.

Ingeniero Supervisor

Sr. Francisco Molina Z.

**“EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN OPERACIONAL PARA EL SISTEMA DE
AIREACIÓN FORZADA EN PILAS DE LIXIVIACIÓN, DIVISIÓN RADOMIRO
TOMIC”**

SEBASTIÁN ANDRÉS MERINO VARAS

Informe de Memoria de Título para optar al
Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

ABRIL 2018

Agradecimientos

A mis Padres, Miguel y Patricia, quienes durante toda mi vida, me han enseñado a ser perseverante para lograr todos mis objetivos, a sonreírle a la vida y entregado su confianza para poder alcanzar mis sueños, viendo ahora el fruto de todos sus esfuerzos. Por esto y muchas cosas más, este logro es para ustedes. Los amo!

A mis Hermanos Miguel y Javiera, a quienes amo profundamente. Gracias por entregarme su confianza plena en cada una de las decisiones que tomo, porque creen en mí y pese a todas mis locuras de hermano mayor me aman incondicionalmente.

A mi Abuelita Margarita, porque sin Usted gran parte de esto no sería posible. Gracias por seguirme educando, por enseñarme la vida con altura de miras, por mostrarme que nada es imposible si uno lucha y se esfuerza día a día. Pero más que nada, gracias por enseñarme que la familia es lo más importante y hay que cuidarla pase lo que pase.

A toda mi familia, por ese vínculo único, por todos esos apoyos, consejos y asados sin igual. A mi tío Guillermo, por mostrarme el mundo metalúrgico y lo entretenido del mismo, por aconsejarme a ser un gran profesional y todo lo que se me viene por delante, y como no, por cada salida a la pesca. A mi Tita, por siempre recibirme con una sonrisa, por darme amor incondicional y por cada una de sus exquisitas comidas preparadas por mano de monja.

A mi primo, Guillermo, que te considero como un hermano mayor y estar siempre.

A mis amigos, por todo su sentido del humor, por su apoyo, por tender la mano cuando me encontraba solo, los trabajos grupales, las risas y gratos momentos. En especial a Víctor, Gustavo, Ricardo, Juan, Fernando, Valerio, Juan Ignacio, Vicente, Mauricio, a “Rompe K3”, Scarlett, Natalia, Katherine, Javiera, Mauro, Anibal, Diego, Nicol.

A mi tutor Francisco Molina, por su empatía, enseñanzas y orientación. A Julian, Vicente, Dagoberto, los operadores de lixiviación y todos los colegas que me ayudaron en la realización de este proyecto y generado un ambiente excelente en División Radomiro Tomic.

A mi Profesor Fernando, por su buena voluntad y conocimiento.

Y como no agradecer a Dios y la Mater, por haber vivido todos estos años bajo su cuidado y protección.

Resumen

Desde el inicio de las operaciones de División Radomiro Tomic se ha producido una disminución significativa de las extracciones de cobre en las pilas primarias como consecuencia de la disminución paulatina en el tiempo de la razón de solubilidad de los minerales alimentados a planta. Esta disminución de la solubilidad se atribuye principalmente al incremento de fracciones de sulfuros de cobre alimentados. Atendiendo a esta situación, en División Radomiro Tomic se han desarrollado numerosas investigaciones, a nivel piloto e industrial, que incorporan aireación forzada en el proceso de lixiviación con resultados muy promisorios por cuanto esta alternativa permite incrementar las recuperaciones de cobre y disminuir los consumos de ácido.

El estudio se realizó a nivel industrial, en pilas dinámicas de $1350 \times 384 \text{m}^2$, específicamente en semimódulos de $50 \times 384 \text{m}^2$. Estudio que está basado en la inyección de aireación forzada a 3 semimódulos continuos mediante sopladores, a $7500 \text{m}^3/\text{h}$ y 100mbar . Los semimódulos a evaluar fueron 11 con mineralogía tipo mixto, de los cuales a 8 se les suministró aireación forzada, y otros 3 que no tienen aireación forzada. Además se realizaron pruebas a minerales férricos de División Radomiro Tomic, con el fin de ver formas posibles para la generación de iones férricos y poder disolver de mejor manera los sulfuros de cobre que no se puede hacer de forma tradicional.

El presente trabajo de memoria de título busca evaluar el comportamiento metalúrgico de minerales mixtos gracias a al suministro de aireación forzada en semimódulos de lixiviación primaria, durante el periodo de junio y noviembre del año 2017. Con el objetivo de determinar una estimación del aporte de aireación forzada en la extracción de cobre y mediante este aporte generar un estándar operacional y un modelo matemático para estimar recuperaciones máximas de cobre.

Los principales resultados indican que los semimodulos con aireación forzada no muestran una relación concluyente respecto a la concentración de férrico, y también a la cinética de extracción de cobre. Ya que, si bien muchos resultados de extracción de cobre fueron positivos para los semimódulos con aireación forzada, estos se generaron debido a una mayor razón de solubilidad y/o mayor tasa de curado, y no necesariamente gracias a la aireación forzada.

No obstante, mediante la recopilación de resultados, se generó un nuevo estándar operacional para la inyección de aire, el cual sugiere cambiar el flujo de aire de $7500 \text{m}^3/\text{h}$ a $10500 \text{m}^3/\text{h}$, subir su presión de 100mbar a 200mbar y para una mejor distribución de aire,

disminuir la separación de tuberías de 4 a 3m aumentando la cantidad de tuberías a utilizar de 96 a 128 tuberías.

Además se calculó un modelo matemático para predecir la recuperación de cobre en base a los módulos con aireación, utilizando una regresión lineal múltiple basado en el método de los mínimos cuadrados.

El modelo matemático calculado fue,

$$\mathbf{Rec = 57,31 + 0,0009 \cdot ton - 0,121 \cdot Cuf + 1,373 Razón \frac{Cu_{sol}}{CuT} - 2.592 \cdot \%ATA - 1,831 \cdot \%CS + 0.697 \cdot días\ aireación}$$

Aunque, si bien los resultados de extracción reales no son muy positivos, el modelo se ajusta al valor real entregado por cada recuperación, llegando a un error máximo de 3%. El modelo calculado se define como.



Abstract

Since the beginning of the operations of División Radomiro Tomic there has been a significant decrease in copper extractions in the primary piles as a result of the gradual decrease in time of the solubility ratio of the minerals fed to the plant. This decrease in solubility is attributed mainly to the increase of fractions of copper sulphides fed. In response to this situation, División Radomiro Tomic has developed numerous investigations, at pilot and industrial level, that incorporate forced aeration in the leaching process with very promising results, as this alternative allows to increase copper recoveries and reduce acid consumption.

The study was carried out at the industrial level, in dynamic piles of $1350 \times 384 \text{m}^2$, specifically in semi-modules of $50 \times 384 \text{m}^2$. Study that is based on the injection of forced aeration to 3 continuous semimodules by blowers, at $7500 \text{m}^3/\text{h}$ and 100mbar. The semimodules to be evaluated were 11 with mixed type mineralogy, of which 8 were supplied with forced aeration, and 3 others that did not have forced aeration. In addition, tests were carried out on ferrous minerals from the División Radomiro Tomic, in order to see possible ways for the generation of ferric ions and to be able to better dissolve the copper sulfides that can not be done in the traditional way.

The present work of memory of title seeks to evaluate the metallurgical behavior of mixed minerals thanks to the supply of forced aeration in semi-modules of primary leaching, during the period of June and November of the year 2017. In order to determine an estimate of the contribution of aeration forced in the extraction of copper and through this contribution generate an operational standard and a mathematical model to estimate maximum recoveries of copper.

The main results indicate that the semimodules with forced aeration do not show a conclusive relationship with respect to ferric concentration, and also the kinetics of copper extraction. Since, although many copper extraction results were positive for semi-modules with forced aeration, these were generated due to a higher rate of solubility and / or higher curing rate, and not necessarily due to forced aeration.

However, through the collection of results, a new operational standard for air injection was generated, which suggests changing the air flow from $7500 \text{m}^3/\text{h}$ to $10500 \text{m}^3/\text{h}$, raising its pressure from 100mbar to 200mbar and for a better distribution of air, decrease the separation of pipes from 4 to 3m increasing the number of pipes to be used from 96 to 128 pipes.

In addition, a mathematical model was calculated to predict the recovery of copper based on the modules with aeration, using a multiple linear regression based on the least squares method.

The calculated mathematical model was,

$$Rec = 57,31 + 0,0009 \cdot ton - 0,121 \cdot Cuf + 1,373 Razón \frac{Cu_{sol}}{CuT} - 2.592 \cdot \%ATA - 1,831 \cdot \%CS + 0.697 \cdot días\ aireación$$

Although, the actual extraction results are not very positive, the model adjusts to the real value delivered for each recovery, reaching a maximum error of 3%. The calculated model is defined as.



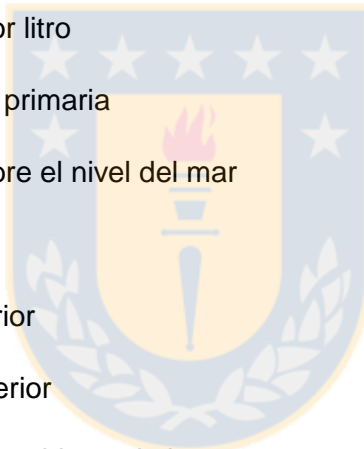
Índice

Agradecimientos	ii
Resumen.....	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Nomenclatura.....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de tablas.....	xii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	1
1.1.1 Objetivo General.....	1
1.1.2 Objetivos Específicos	1
2 ANTECEDENTES DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC	2
3 MARCO TEÓRICO	5
3.1 Lixiviación	5
Aspectos relevantes en lixiviación de pilas	7
3.3 Lixiviación de minerales de cobre.....	8
3.3.1 Lixiviación de minerales oxidados de cobre	8
3.3.2 Lixiviación minerales sulfurados de cobre	9
3.4 Aspectos termodinámicos.....	10
3.5 Cinética de disolución de minerales	14
3.6 Aireación forzada en pilas de lixiviación	15
4 ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	18
4.1 Metodología de trabajo	18
4.2 Caracterización mineralógica del mineral	18
4.3 Clasificación química y muestreo del mineral.....	19

4.4	Condiciones generales de operación para pilas primarias	21
4.5	Pruebas para generación de Fe^{3+} por parte de minerales limoníticos	22
4.6	Sistema de aireación forzada	23
4.6.1	Instalación kit de aireación	24
4.6.2	Instalación de los conjuntos de aireación	26
4.6.3	Parámetros operacionales kit aireación.....	28
5	RESULTADOS.....	29
5.1	Generación de Fe_T y Fe^{3+} en muestras limoníticas	29
5.2	Caracterización de semimódulos con y sin aireación	30
5.3	Variación de Fe^{3+} en los semimódulos con y sin aireación forzada.....	32
5.4	Efectos de la aireación en la cinética de disolución de cobre	34
5.5	Modelos	39
5.5.1	Modelo operacional y dimensionamiento.....	39
5.5.2	Modelo matemático	41
5.5.3	Comparación de recuperación de cobre para semimódulos con aireación forzada	42
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
6.1	Conclusiones	43
6.2	Recomendaciones.....	44
Capítulo 7	BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS	46
Anexo 1	“INSTALACIÓN CONJUNTO DE AIREACIÓN”	46
Anexo 2	SISTEMA DE AIREACIÓN	54
Anexo 3	“Distribución Semimódulos División Radomiro Tomic”	59
Anexo 4	“Resultados modelo matemático mediante Microsoft Excel”	60

Nomenclatura

Cuf	: Cobre fino
Cu_{sol}/CuT	: Razón de solubilidad
DRT	: División Radomiro Tomic
Eh	: Tensión o potencial
ESH	: Electrodo estándar de hidrógeno
EW	: Electrowinning /electroobtención
FeT	: Hierro total
gpl	: Gramos por litro
LP	: Lixiviación primaria
Msnm	: Metros sobre el nivel del mar
M	: Molaridad
OXI	: Óxido inferior
OXS	: Óxido superior
PLS	: Pregnant leaching solution
ppm	: Partes por millón
Rec	: Recuperación
ROM	: Run of mine
SX	: Extracción por solvente
Ton	: Tonelaje
%ATA	: Porcentaje atacamita
%ARC	: Porcentaje arcillas
%CS	: Porcentaje calcosina



Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de División Radomiro Tomic.	2
Figura 2. Flowsheet División Radomiro Tomic.....	4
Figura 3. Diagrama Eh-pH superpuestos por los sistemas Cu-S-Fe-H ₂ O y Fe-S-H ₂ O.....	10
Figura 4. Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-S-H ₂ O, concentración especies diluidas 0.1 M. ^[2]	12
Figura 5. Formación de pila galvánica. ^[2]	12
Figura 6. Partícula esférica reaccionando con control por difusión a través de una capa de producto poroso. ^[1]	15
Figura 7. Movimiento de flujos de aire y refino dentro de un semimódulo lixiviado. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 8. Ilustración de como el oxígeno ingresa a la pila por inyección de aire forzado y su respectiva distribución de flujos de aire. Fuente: Elaboración propia.....	17
Figura 9. Ilustración del muestreo en las pilas primarias para semimódulos con y sin aireación forzada. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 10. Dimensión de pilas y semimódulos en lixiviación primaria. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 11. Distribución y numeración de semimódulos en pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.....	22
Figura 12. Distribución máxima de kit de aireación en las pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.....	24
Figura 13. Dimensión del sistema de aireación que abarca 3 semimódulos continuos. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 14. Imagen de un kit de aireación instalado a un costado de la pila con su respectiva manga de distribución de aire forzado. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 15. Kit n° 08 de aireación instalado. Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 16. Proceso de instalación de kit de aireación a un costado de la pila. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 17. Diseño del conjunto de aireación forzada a instalar en pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 18. Vista desde lo alto de la pila del proceso de instalación del conjunto de aireación en medio de la pila de lixiviación. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 19. Continuación del proceso de instalación del conjunto de aireación. Fuente: Elaboración propia.....	28
Figura 20. Fe ³⁺ en solución, muestras finas.....	30

Figura 21. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía media en sulfuros.....	33
Figura 22. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía alta en sulfuros con media cantidad de pirita.	33
Figura 23. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía alta en sulfuros con alta cantidad de pirita.	34
Figura 24. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y bajo contenido de sulfuros.	35
Figura 25. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y medio contenido de sulfuros.	35
Figura 26. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y alto contenido de sulfuros.	36
Figura 27. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con contenido medio de sulfuros.....	37
Figura 28. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con alto contenido de sulfuros.	37
Figura 29. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con alto contenido de sulfuros.	38
Figura 30. Manga de aireación instalada a los pies del talud de la pila.....	48
Figura 31. Manga de aireación instalada a los pies del talud de la pila.....	48
Figura 32. Ilustración instalación primer tramo drenaflex.....	49
Figura 33. 1° Tramo drenaflex instalado.....	50
Figura 34. Continuación de instalación 2° Tramo drenaflex.....	50
Figura 35. Ilustración de ubicación de sistema de aireación tanto en manga, motor, drenaflex, entre otros.....	51
Figura 36. Vista final de Mangas y drenaflex instalada sobre Pila, con la respectiva malla de riego por goteo.....	52
Figura 37. Taponamientos líneas drenaflex.....	53
Figura 38. Banda Anti-Taponamiento® Biohydro.....	53
Figura 39. Dimensión del sistema de aireación que abarca 3 semimódulos continuos.....	54
Figura 40. Tablero control del kit de aireación.....	57
Figura 41. Imagen sistema de transporte kit aireación.....	58
Figura 42. Distribución y numeración de semimódulos en pilas primarias en DRT. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 43. Copia de pantalla de resultados del modelo matemático por parte de Microsoft Excel.	60

Índice de tablas

Tabla 1. Caracterización mineralógica de los principales minerales en DRT.	19
Tabla 2. Caracterización química de soluciones en DRT.....	20
Tabla 4. Resultados de pruebas de lixiviación columnar para diferentes minerales limoníticos.	29
Tabla 5. Clasificación de semimódulos con aireación con su respectiva mineralogía.....	31
Tabla 6. Clasificación de semimódulos sin aireación con su respectiva mineralogía.	32
Tabla 7. Promedio cuantitativo de mineralogías en DRT en el periodo Junio-Noviembre de 2017.	39
Tabla 8. Comparación resultados reales v/s modelo.	42



1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años la mineralogía de Radomiro Tomic ha ido evolucionando a medida que el yacimiento alcanza mayor profundidad, esto ha provocado que el mineral alimentado a planta haya sufrido un incremento de fracciones sulfuradas provenientes de los sectores de explotación de la mina. Este hecho ha provocado una disminución en las razones de solubilidad de los minerales al medio ácido, provocándose un deterioro significativo de las extracciones de cobre en la pilas de lixiviación primaria. Por esta razón, resulta hoy indispensable la optimización de los procesos productivos en pos de remediar esta situación.

Una alternativa, la constituye la incorporación de aireación forzada en las pilas de lixiviación primaria para mejorar los niveles de extracción de cobre y disminuir los consumos de ácido. Este mejoramiento en las extracciones de cobre se basa, en la capacidad del oxígeno de oxidar menas de cobre sulfuradas como covelina y calcosina, de forma directa e indirecta a través de la generación de ión férrico, el cual actúa como agente oxidante para la producción de cobre soluble desde los minerales de cobre sulfurados.

Un buen manejo de la lixiviación primaria permite mantener una homogeneidad en el proceso y un mejor producto en las etapas sub siguientes de la planta, garantizando un buen resultado en la operación y, por consiguiente, una producción con menores contingencias. Para lograrlo, es necesario mantener una filosofía de operación continua y uniforme, en base a las características del área.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Identificar una metodología trazable de estimación directa o indirecta del aporte industrial del proceso de aireación forzada de pilas primarias y generar un estándar con los resultados obtenidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la cinética en la lixiviación primaria para minerales con y sin aireación.
- Estudiar efectos de consumo y/o producción de ion férrico por parte de minerales férricos en DRT.

2 ANTECEDENTES DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC

La Gerencia de Extracción y Lixiviación Norte, centro de trabajo Radomiro Tomic de la División Codelco Norte, se encuentra ubicada en la segunda región de Antofagasta, provincia el Loa, a 40 km. al norte de Calama y a 250 km. al noreste del puerto principal de Antofagasta y a una altura de 3000 m.s.n.m. En Figura 1 se puede observar su ubicación.

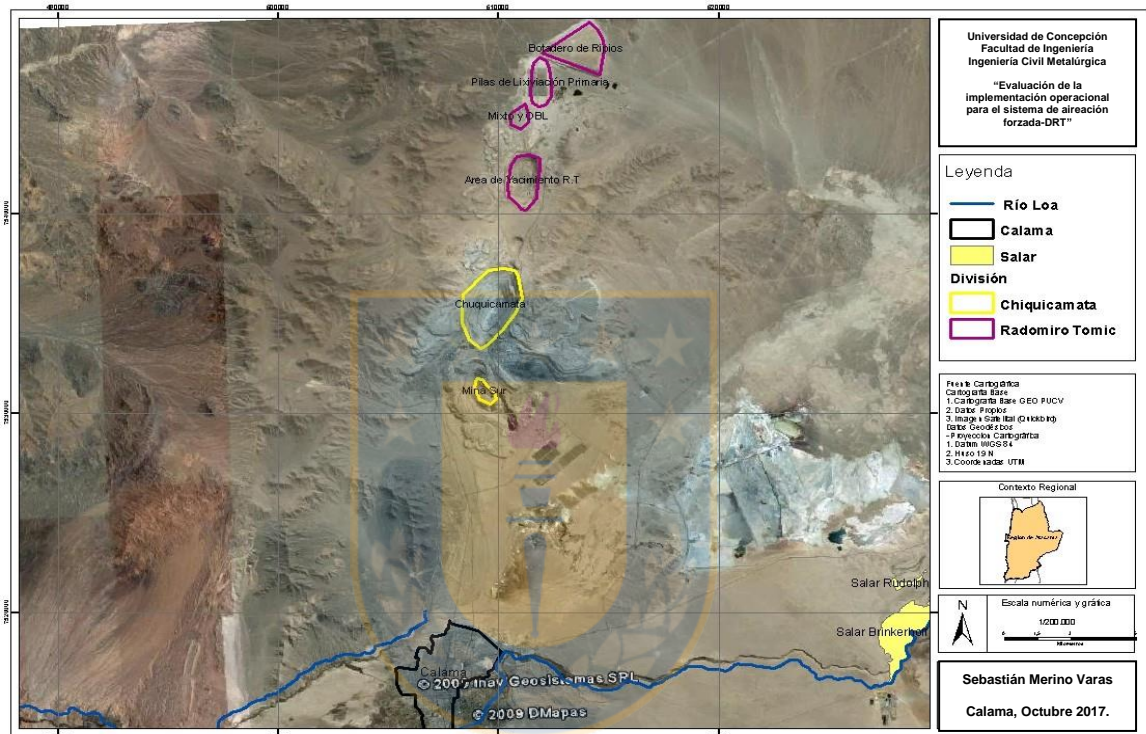


Figura 1. Ubicación de División Radomiro Tomic.

La historia de Radomiro Tomic data del año 1952 con los primeros indicios de mineralización de Anaconda, Pampa Norte. Dieciocho años después, Cobrechuyi retoma la campaña de sondajes hasta el año 1991. En el año 1992 el yacimiento adopta el nombre de Radomiro Tomic, cuyo nombre es un homenaje al fallecido parlamentario y diplomático Radomiro Tomic Romero (1914-1992). Fue así como en mayo de 1998, se inauguró División Radomiro Tomic.

Éste es un yacimiento de tipo pórfido cuprífero a rajo abierto, formado por dos macrounidades, Óxido Superior (OXS) y Óxido Inferior (OXI). Además de los minerales oxidados mencionados se cuenta con elevados contenidos de especies sulfuradas de cobre, en la parte inferior y de minerales mixtos que poseen la característica de estar compuestos tanto por especies sulfuradas como por óxidos, con una ley promedio de 0,472% de CuT, (0,315% Cu_{sol}).

El proceso productivo de DRT se inicia con la geología del yacimiento, generando la explotación del mismo mediante perforación, tronadura, carguío y transporte. Los minerales oxidados extraídos del yacimiento son cargados y transportados por camiones a la etapa de chancado, donde el material es fragmentado para obtener un tamaño suficiente y dejar expuestos los minerales oxidados de cobre en el proceso de lixiviación.

La primera fase de chancado 1°, entrega un mineral con granulometría 60% bajo 10". El mineral es conducido hacia la etapa de chancado secundario, una parte del producto es enviado hacia el acopio intermedio, mientras que la otra parte es transportada por correas hacia la etapa de chancado terciario, en el que su producto se obtiene con granulometría es de 100% bajo 1 1/2". Luego de esto viene la etapa de curado que se realiza directamente en las correas transportadoras. Esta etapa tiene una importante influencia sobre la lixiviación, debido a que promueve una cinética rápida de la operación y ayuda a incrementar el grado de recuperación de cobre.

El mineral transportado por correas es dirigido a las canchas de lixiviación primaria, descargado por medio de un puente apilador que va formando 2 pilas dinámicas que miden 1350m de largo por 380m de ancho y 10m de alto aproximadamente y se encuentran divididas en 27 semimódulos cada una. El riego de los lechos se efectúa por goteo y/o aspersion con una solución proveniente de SX a la cual ya se le ha extraído la mayor parte del cobre, la cual recibe el nombre de refino (Figura 2). El refino es enriquecido con la solución fuerte generada por la lixiviación secundaria de ripios y pasa a regar las pilas. El ciclo mínimo de lixiviación primaria alcanza a 45 días, al cabo de los cuales se procede a remover el mineral mediante una rotopala. El mineral que ha cumplido su ciclo en la lixiviación (ripio) se dirige hacia la etapa de lixiviación secundaria, en donde se extrae el cobre soluble remanente.

La lixiviación secundaria de ripios, se realiza en "parcelas" de 100m por 100m, con solución refino, hasta completar su ciclo superior a 300 días. La lixiviación de OBL y mixtos se realiza con dos tipos de mineral, la primera con óxidos de baja ley extraídos directamente de la mina con granulometría ROM. El segundo, con una granulometría 100% bajo 1 1/2", enviado a pilas permanentes de 30 metros. El ciclo de lixiviación es de 7 meses, con un ciclo de riego de 200 días.

La solución fuerte resultante de la lixiviación de las pilas primarias, llamada comúnmente PLS, ésta es recolectada sobre una carpeta de polietileno de HDPE, encaminada hacia su respectiva canaleta recolectora. Desde ahí es enviada a tres piscinas desarenadoras y las soluciones obtenidas convergen hacia tres piscinas de almacenamiento y traspaso de PLS, por rebose. Las soluciones fuertes de lixiviación primaria, ricas en cobre y con alto contenido de

impurezas, son procesadas en el proceso de extracción por solventes, el cual tiene 4 trenes. Los tres primeros trenes, identificados con las letras A, B, C, cuentan con dos etapas de extracción, una de re- extracción y una de lavado. En cambio el tren D, cuenta con dos extracciones, dos re- extracciones y una etapa de lavado. El electrolito rico filtrado va al estanque de recirculación desde donde es enviado al proceso de electrobtención.

La nave de electrobtención utiliza 1000 celdas, divididas en seis bancos. Uno de estos bancos es llamado celda de limpieza o scavenger, compuesto por 148 celdas, que recibe la alimentación directa del electrolito filtrado, reteniendo la mayor parte del orgánico y sólidos en suspensión remanentes. El resto de las celdas son comerciales y son alimentadas desde el estanque de recirculación de electrolito. Cada celda está compuesta por 60 cátodos y 61 ánodos. Los ánodos son de plomo-calcio-estaño laminado, el área de depósito catódico es de 1 m² y el ciclo de cosecha es de 5-7 días. La corriente es alimentada a través transforectificadores, con corriente máxima de 37.000 amperes y una densidad de corriente que varía de 270 a 300 A/m². Los cátodos cosechados que son aceptados siguen a una estación de muestreo y luego a una estación de corrugado en forma alternada, donde finalmente se preparan paquetes de 30 piezas de alrededor de 2 a 2,5 toneladas para ser embarcados finalmente vía camiones al puerto de Angamos-Mejillones.

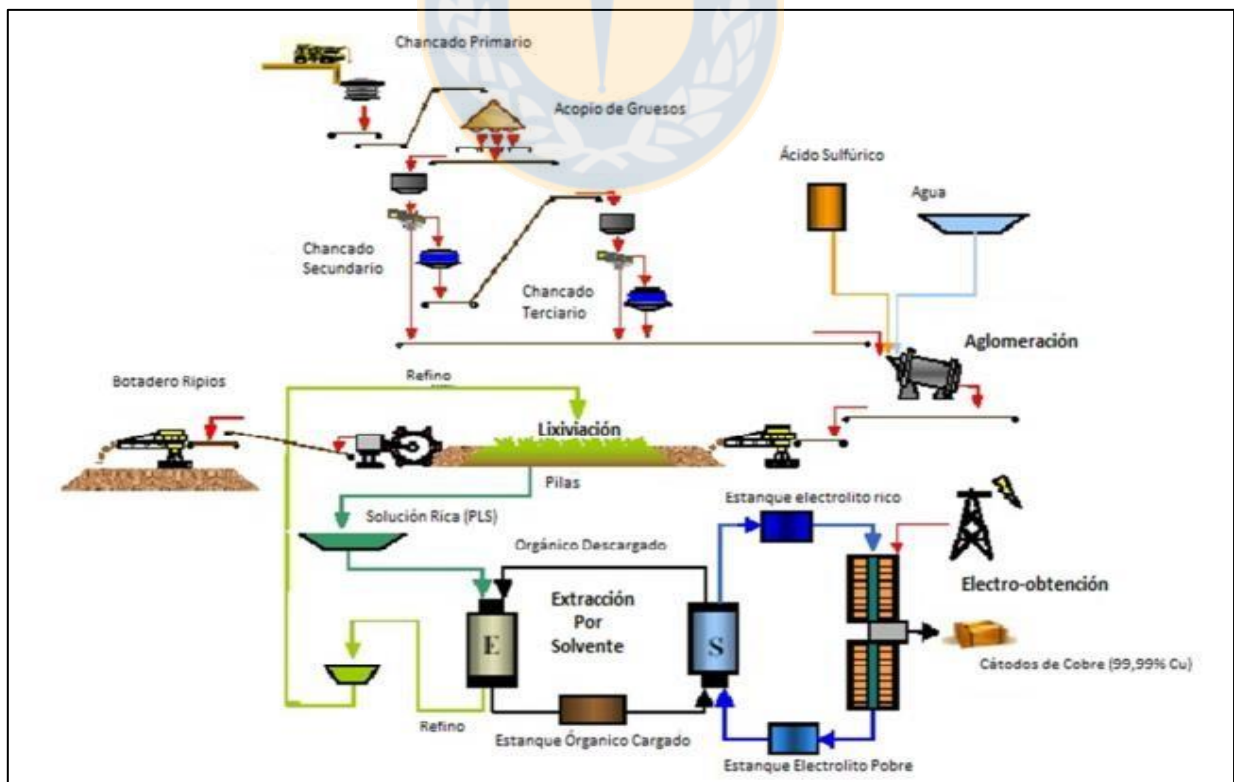


Figura 2. Flowsheet División Radomiro Tomic.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Lixiviación

La lixiviación es un proceso físico-químico, donde los agentes lixiviantes intervienen en la superficie del mineral, actuando como disolventes sobre los metales que usualmente quedan contenidos y disueltos en la solución acuosa de manera parcial o total. Ocasionalmente, se introducen otros agentes externos para que actúen como oxidantes o reductores mediante cambio en los potenciales redox de la solución, así como también presión y/o cambios de temperatura. Principalmente, el proceso consiste en la disolución selectiva del cobre mediante la adición de soluciones ácidas, denominada refinación, desde los minerales oxidados que lo contienen. La solución acuosa obtenida es rica en iones Cu^{+2} , llamado PLS (Pregnant leach solution), que es enviado a la etapa de SX para purificación y concentración de la solución.

Se consideran los siguientes agentes presentes en el proceso:

- Ácido sulfúrico
- Oxígeno
- Ión férrico
- Bacterias
- Agua

La penetración de la solución al interior de la roca se produce en minerales porosos o fracturados (solución penetra por fracturas y/o planos de clivaje). Se distinguen los siguientes mecanismos en una lixiviación:

- a) Difusión del reactivo desde el seno de la solución a la superficie del mineral.
- b) Reacción del reactivo en la superficie para formar una especie soluble.
- c) Difusión de las especies solubles producidas hacia el seno de la solución.

La difusión es favorecida por la agitación y/o turbulencia en el seno de la solución para una mayor efectividad (especialmente para el inciso a) también es relevante la concentración del agente lixivante, ya que el aumento de solvente aumenta la disolución del metal, aunque una disolución más diluida es más selectiva a pesar de prolongar el tiempo de tratamiento.

Otro aspecto físico relevante es la granulometría del mineral que determina el área superficial disponible para el ataque del agente lixivante y la velocidad de las reacciones químicas

involucradas en la disolución, las cuales son dependientes del área interfacial, que afectan la cinética de lixiviación y, por consiguiente, la recuperación metalúrgica.

3.2 Lixiviación en pilas

El mineral superior a la ley de corte proveniente de la mina es disminuido de tamaño por etapas de chancado (primario, secundario y terciario) y transportado por correas hacia el sector de apilamiento mientras es curado con ácido. Generalmente, es necesario controlar los finos generados en las operaciones mencionadas para mantener rangos de permeabilidad aceptables en el lecho mineral al construir la pila y lograr un ataque ácido más fuerte, el que se traduce en un mejor rendimiento cinético y una mayor selectividad ante especies indeseables. Luego, la pila es regada con soluciones pobres en cobre y ricas en ácido sulfúrico (refino) logrando una interacción con las partículas de metal, disolviéndolas en la solución. La recolección de las soluciones ricas en cobre (PLS) es por gravedad mediante canaletas y piscinas las cuales abastecen la planta de SX.

El riego por goteros y aspersores aumenta la cantidad de líquido disponible en torno a las partículas individuales manteniéndolas cohesionadas y en su sitio, en un estado conocido como “capilar”, con una tasa de riego adecuada a la granulometría cargada a los módulos y suficiente para evitar los lechos inundados.

En general, se distinguen dos tipos de pilas. Las permanentes, en las que el mineral lixiviado no se retira del lugar y las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores, y pilas dinámicas (*on-off*) en las cuales el material lixiviado se retira para ser enviado a botaderos y es reemplazado por mineral fresco sobre la misma base anterior.

Para la formación de la pila, el mineral curado se deposita en los lechos de lixiviación en pila mediante un sistema de apilamiento (apilador) que transporta el mineral curado por una correa transportadora la cual se eleva a una altura que permita que el mineral se descargue en el lecho por una pluma amantilladora desplazándose de extremo a extremo de la pila, de esta forma se va generando una pila de 8m de alto hasta 10m, apilado el mineral a 10000m³/h en DRT. Después de terminado el ciclo de lixiviación y de un periodo adecuado de drenaje, el mineral ya agotado (ripio) es retirado mediante un recuperador de rueda con cachos (rotopala), y es transportado mediante correas al botadero para seguir con la lixiviación secundaria. Bajo condiciones normales de operación, se mantiene una zona vacía de alrededor de 150 metros entre el frente de avance de la pila y los módulos que están siendo removidos. Esta zona se establece como norma de seguridad, para compensar las detenciones de los sistemas de remoción y transporte de residuos,

junto con aprovechar de realizar un remanejo a la base de los nuevos módulos para mejorar su permeabilidad.

Aspectos relevantes en lixiviación de pilas

- Curado ácido: tiene como objetivo la transformación de las especies minerales en sulfatos solubles por la acción del ácido concentrado en el mineral y, en menor medida, una aglomeración de finos a las partículas más grandes. Para esto, es necesario una humedad que permita el contacto ácido-mineral; que, al generar calor, aumenta la cinética de las reacciones químicas.
- Tasa de riego: representación del caudal de solución que atraviesa por unidad de superficie de la pila, expresado en L/m^2 h, para aumentar la cantidad de líquido disponible en torno a las partículas sin que pierdan su cohesión. Este parámetro depende del tipo de lixiviación, altura de apilamiento y tamaño de partícula. La tasa de riego se calcula en base a no diluir demasiado las soluciones ni inundar las pilas.
- Ciclos de riego continuo y rampa de impregnación (o humectación): ciclos alternados de riego y drenaje, que permiten una humectación y acondicionamiento del mineral ya cargado en la pila, junto con la aireación de ésta con el objetivo de mejorar las condiciones oxidantes.
- Altura de la pila: es necesario definir la altura en base al comportamiento del lecho del mineral relacionado con la compactación en el interior de la pila y su influencia en la percolabilidad; la cantidad de ácido residual y la cinética global de extracción. También es necesario tener en cuenta la presencia de arcillas, un exceso de finos y la formación de precipitados, los cuales bajan la permeabilidad en la superficie restringiendo el paso de manera uniforme de aire y de la solución ácida.
- Concentraciones de cobre, ácido y cloro: es importante mantener las concentraciones dentro de los parámetros proyectados, junto con el flujo requerido, para evitar problemas operacionales hacia las áreas de SX y EW, especialmente en las razones de orgánico/acuoso y continuidad de fases.
- Razón de lixiviación: volumen real de solución que ha sido irrigado por tonelada de mineral seco, expresado en m^3/t ; con el objetivo de controlar los volúmenes de soluciones necesarias para la lixiviación, el cual depende del consumo de ácido, tipo de gangas, humedad, tonelaje y altura de los módulos.

3.3 Lixiviación de minerales de cobre

La lixiviación consiste en la disolución selectiva total o parcial de cobre de una mena mediante una solución acuosa, la cual contiene el metal valioso y un residuo insoluble sólido con material sin valor llamado ganga. Dependiendo de la concentración del mineral (alta o baja ley) y de sus características químicas y mineralógicas (sulfuro, óxido o mixto) se puede emplear un proceso de lixiviación de lecho fijo o por percolación.

El proceso de lixiviación constituye en la actualidad la alternativa más eficiente y rentable para el tratamiento de minerales oxidados de cobre, extendiéndose su uso a la lixiviación de minerales sulfurados de cobre mediante el empleo de agentes oxidantes, actividad bacteriana y para efectos de este estudio, principalmente por aireación forzada.

El método de lixiviación está enfocado en obtener el máximo de beneficio económico a un costo mínimo. Por lo tanto el método seleccionado dependerá principalmente de un balance económico incluyendo costos de inversión y de operación, tomando en cuenta como por ejemplo: valor económico del metal, recuperación, costo de exploración minera, costo de reducción de tamaño, costo del proceso de concentración, facilidad de dilución relativa de las especies deseadas y costo de insumos.

3.3.1 Lixiviación de minerales oxidados de cobre

La mayoría de los óxidos de cobre se lixivian con facilidad en soluciones diluidas de ácido sulfúrico, sin formar productos sólidos de reacción, verificándose un control por reacción superficial o difusión a través de la capa límite. Como consecuencia, la mayoría de los minerales oxidados de cobre puros tienen una cinética de lixiviación bastante rápida, como por ejemplo los sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita), carbonatos (malaquita y azurita) y cloruros (atacamita). Sin embargo, la tenorita se disuelve un poco más lento y requiere de mayor acidez. En el caso de los silicatos (crisocola y dioplasa) la formación de sílice como producto de reacción tiende a hacer la disolución más lenta.

La disolución ácida de óxidos de cobre generalmente no incluye pares de óxido-reducción a excepción de la disolución de la cuprita. La disolución completa de la cuprita requiere de un agente oxidante. En presencia de oxígeno por ejemplo, la cuprita reacciona para dar iones cúpricos en solución según la reacción global:



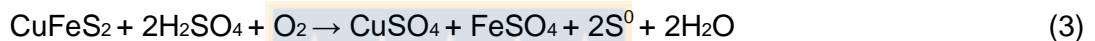
3.3.2 Lixiviación minerales sulfurados de cobre

Los minerales sulfurados comprenden a aquellas especies que además de su contenido de azufre en la forma de sulfuro tienen la particularidad de estar exentos de oxígeno.

La mayoría de los minerales sulfurados son insolubles en ácido sulfúrico diluido. Aquellos sulfuros solubles en ácido se disuelven por un mecanismo químico, como es el caso de la pirrotina:



Los sulfuros insolubles en ácido requieren la presencia de un agente oxidante para oxidar el azufre del estado S^{2-} a estado elemental o a estados de oxidación superiores (como sulfato), entonces ocurre una disolución por un mecanismo electroquímico. Un ejemplo es la reacción global que ocurre en la lixiviación de la calcopirita con ácido sulfúrico y oxígeno en condiciones ambientales:



Esta reacción es extremadamente lenta en condiciones ambientales y requiere tiempos de lixiviación muy largos, al igual que la disolución de la gran mayoría de los sulfuros.

En general, en los procesos hidrometalúrgicos para que la reacción química ocurra se requiere de una cierta fuerza o energía que la impulse y su velocidad de reacción está determinada por la magnitud de ésta. En los minerales sulfurados la fuerza activadora es proporcionada por la presencia y concentración en la solución de lixiviación ácida en medio sulfato, de aceptores de electrones como el oxígeno disuelto o de ion férrico. Así, en sistemas de baja presión, el ión férrico se considera en general, el principal oxidante, mientras que el papel del oxígeno es la re-oxidación de los iones ferrosos a férricos. En cambio, en un sistema de alta presión, el oxígeno pasa a ser el principal oxidante.

Existen en la práctica industrial dos modalidades para el tratamiento de los minerales sulfurados, que son:

- a.- Tratamiento directo desde los minerales sulfurados, sea in-situ, en botaderos o en pilas.
- b.- Tratamiento de concentrados sulfurados producidos generalmente por molienda y flotación.

3.4 Aspectos termodinámicos

La forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos es en forma gráfica a través de los diagramas de estabilidad potencial Eh – pH o Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas permiten visualizar posibilidades de ocurrencia de una cierta transformación química sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medio acuoso. Los resultados son determinantes en los casos que se indica una imposibilidad termodinámica de una determinada transformación, sin embargo, no ocurre lo mismo en caso de tener una respuesta termodinámicamente favorable, ya que la cinética de dicho proceso puede ser tan lenta que para efectos prácticos resulte imposible lograr un equilibrio termodinámico en tiempos razonables. La cinética extremadamente lenta en algunas reacciones conduce a que algunas fases sólidas existan en condiciones fuera de su rango de estabilidad termodinámica o que fases sólidas no se formen en condiciones termodinámicas favorables y lo hagan otras en su lugar (fases metaestables).

La Figura 3 muestra la superposición de dos diagramas que son el Cu–S–Fe–H₂O y Fe–S–H₂O (línea punteada) a 25°C, presión de 1 atm y 0.1 M. Este diagrama muestra las especies sulfuradas y oxidadas en equilibrio, y cómo se comportan bajo distintas condiciones tanto ácido-base como oxidante-reductora.

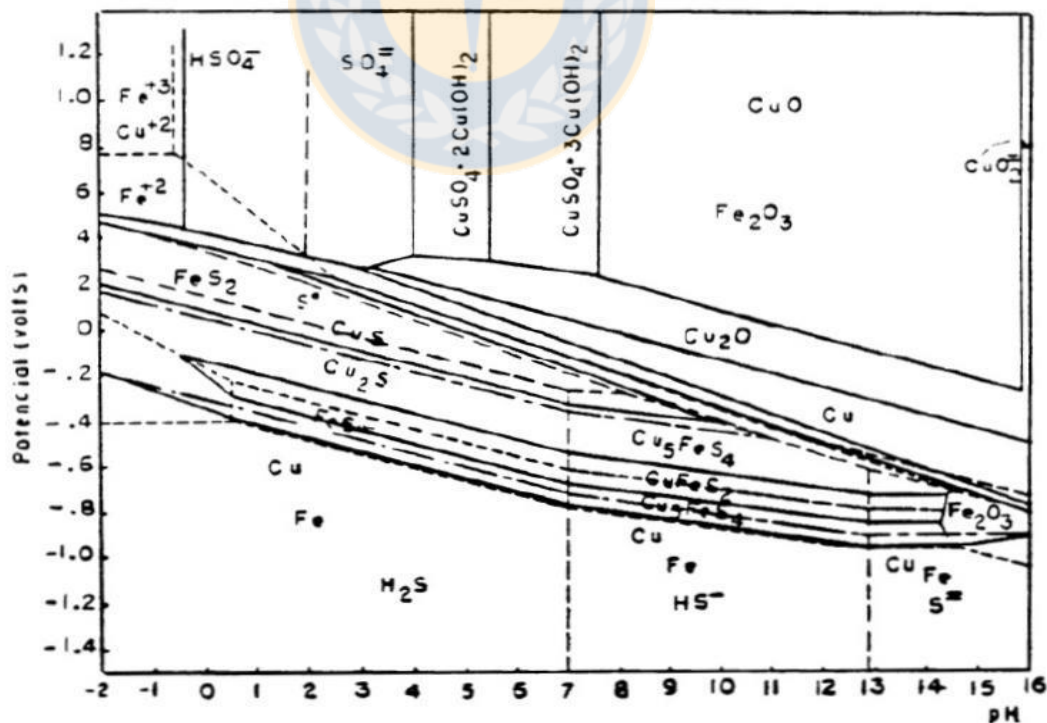


Figura 3. Diagrama Eh-pH superpuestos por los sistemas Cu-S-Fe-H₂O y Fe-S-H₂O. (T = 25°C, actividades de los iones = 0,1 M, P = 1 atm).^[1]

El diagrama muestra las zonas de estabilidad de las especies sulfuradas simples de cobre como covelina (CuS) y calcosina (Cu₂S), así como también sulfuros complejos como calcopirita (CuFeS₂) y bornita (Cu₅FeS₄). Además, muestra especies oxidadas de cobre como cuprita (Cu₂O), tenorita (CuO), antlerita (CuSO₄·2Cu(OH)₂) y brochantita (CuSO₄·3Cu(OH)₂).

Se puede observar que el cobre es un metal relativamente noble ya que es estable en medio ácido oxidante (hasta potenciales de 0.34V para concentraciones 1M), lo que explica que el cobre pueda encontrarse en la naturaleza en estado nativo. Además, se observa que la disolución de los óxidos de cobre es termodinámicamente posible en el dominio ácido, excepto la cuprita que requiere además la presencia de un agente oxidante (por ejemplo Fe³⁺ + O₂, u otros). Las reacciones globales de disolución son:



Los sulfuros, al igual que la cuprita, necesitan condiciones ácidas–oxidantes para poder disolverse y así producir Cu²⁺ en solución y HSO₄⁻ o SO₄²⁻. Sin embargo, esto generalmente no ocurre en la práctica.

A continuación se muestran antecedentes sobre la lixiviación de los sulfuros de mayor importancia.

Sistema Cu-Fe-S-H₂O ^{[1] [2] [6]}

En este sistema (Figura 4) se puede observar que es termodinámicamente posible la oxidación de sulfuros de cobre por soluciones férricas. En él, se ven las zonas de estabilidad de las especies sulfuradas de cobre como la covelina y calcosina, así como también algunos óxidos de cobre. Se puede observar en el diagrama que los minerales sulfurados requieren de condiciones ácido-oxidantes para disolverse.

Además en el diagrama, se pone en evidencia que las soluciones férricas poseen altos potenciales de oxidación, mostrando además que la zona de estabilidad del ión férrico es hasta valores de pH cercanos a 2.

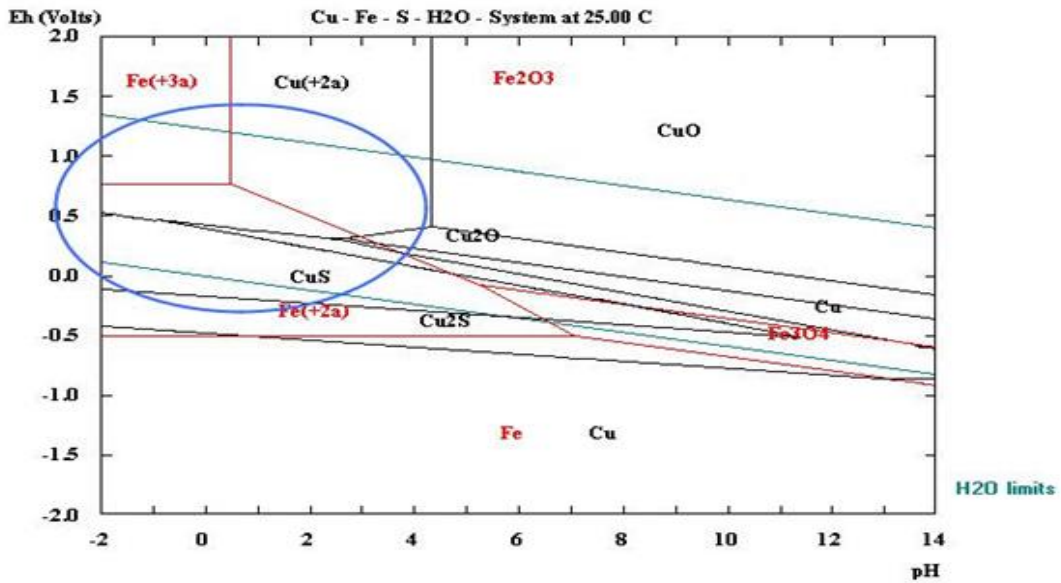


Figura 4. Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-S-H₂O, concentración especies diluidas 0.1 M. [2]

Dentro de la zona destacada en la Figura 4 se puede apreciar la formación de una pila galvánica, entre el Fe³⁺- CuS y Fe³⁺- Cu₂S, lo cual nos indica un proceso espontáneo el que se ilustra de manera gráfica en la figura 5.

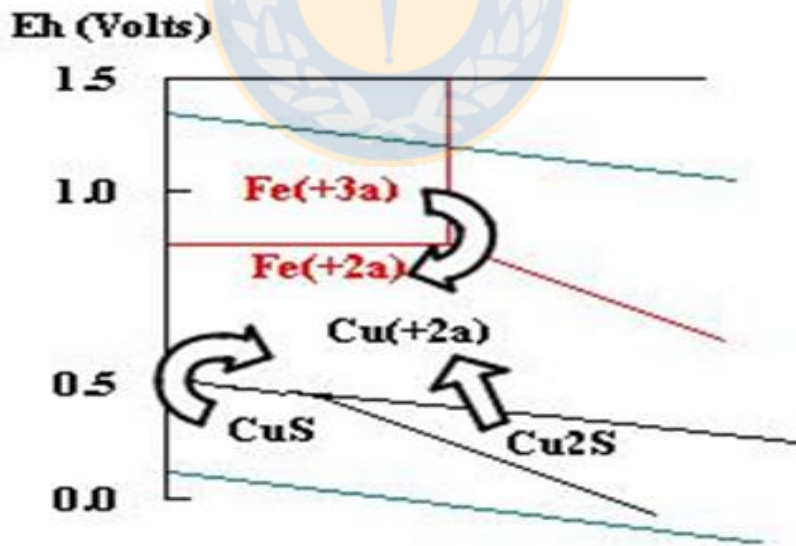
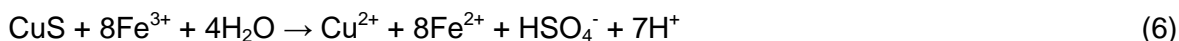


Figura 5. Formación de pila galvánica. [2]

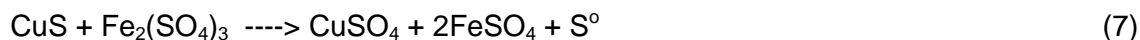
A continuación se muestran las reacciones de lixiviación de sulfuros de mayor importancia en este estudio.

Covelina: La reacción de disolución de la covelina en una solución ácida debería ser^[1]:



$$\Delta G^\circ_{298} = -67.712 \text{ cal/mol}$$

Sin embargo, la disolución de covelina con férrico produce azufre elemental y muy poco sulfato. Las reacciones principales que ocurren son^[1]:



El azufre formado en esta reacción es termodinámicamente inestable y debería oxidarse, sin embargo, en la práctica la velocidad de oxidación del azufre elemental es muy lenta, posiblemente por el carácter hidrofóbico del azufre elemental. Además el azufre formado adquiere una estabilidad en un amplio rango de condiciones y hasta incluso a temperaturas aún superiores a su punto de fusión.

Calcosina: La oxidación de la calcosina en presencia de iones férricos ocurre principalmente conforme a la reacción^[1]:



Esta reacción de la calcosina se ilustra de un par redox galvánico, y ocurre en 2 etapas secuenciales^[1]:



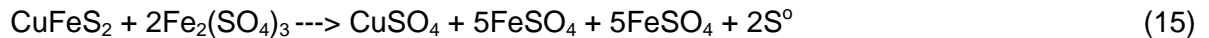
La primera etapa de esta reacción representa un par galvánico. La reacción anódica (disolución de calcosina para dar covelina) ocurre en la interfase $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CuS}$, mientras que la reacción catódica ocurre en la interfase $\text{CuS}/\text{solución}$. La reacción catódica, en este caso es:



Como la segunda etapa produce azufre elemental el cual es no conductor, el oxidante, en este caso Fe^{3+} , ahora debe difundir a través de esta capa de azufre, lo cual resulta en un marcado

retardo de la cinética. Las áreas anódica y catódica de esta segunda etapa de la reacción están ubicadas sobre la misma superficie, y esta reacción representa un par de corrosión.

Calcopirita: Dependiendo del potencial de oxidación, su oxidación en la zona ácida producirá diferentes fases. Estas reacciones son termodinámicamente posibles, pero debido a su dependencia de reactivos oxidantes y cinéticas muy lentas la reacción dominante que describe el proceso es:



Esta reacción ocurre porque tiene una velocidad de reacción mayor que las anteriores y porque una vez formado el S°, éste es extraordinariamente estable en soluciones ácidas.

3.5 Cinética de disolución de minerales

La cinética de disolución de minerales es un área de la fisicoquímica que se encarga del estudio de las velocidades de reacción, cómo cambian estas bajo condiciones variables y qué eventos moleculares tienen lugar durante la reacción general.

El modelo cinético más ampliamente utilizado e importante en los procesos hidrometalúrgicos, especialmente en la lixiviación, es el modelo de núcleo no reaccionado. Considerando la reacción general:



El modelo considera que el producto formado ocupa el mismo volumen que la fracción de sólido que ha reaccionado. En procesos de lixiviación, esto normalmente significaría que la porosidad en el producto se compensaría por la masa neta removida durante la lixiviación. Esto es aplicable en muchos casos a la lixiviación de menas oxidadas y sulfuradas como también a la reacción de algunas partículas de minerales puros. El resultado neto es un núcleo recesivo de sólido no reaccionado con una capa de material poroso alrededor como se ilustra en la Figura 6.

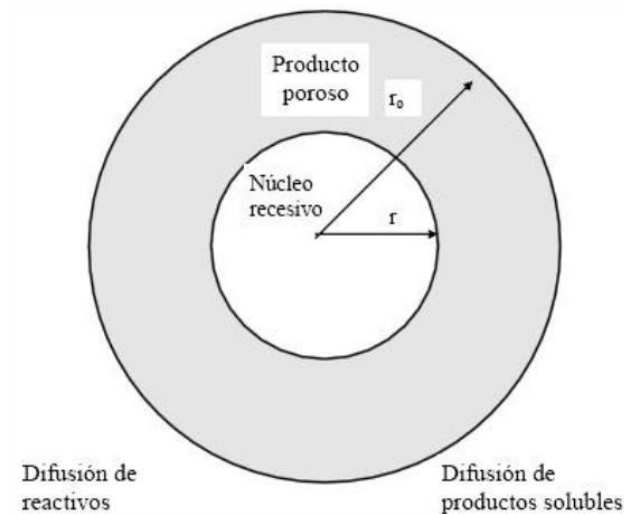


Figura 6. Partícula esférica reaccionando con control por difusión a través de una capa de producto poroso. ^[1]

El proceso global de reacción puede involucrar las siguientes etapas individuales:

1. Transferencia de masa (difusión) de reactivos y productos entre el seno de la solución y la superficie externa de la partícula sólida.
2. Difusión de reactivos y productos dentro de los poros del sólido.
3. Reacción química entre los reactivos en la solución y en el sólido.

La etapa controlante de la velocidad de reacción puede cambiar dependiendo de las condiciones en que se realice la reacción. Además, con frecuencia no hay sólo una etapa que controla la velocidad debido a que depende directamente de las condiciones fisicoquímicas del sistema.

3.6 Aireación forzada en pilas de lixiviación

Las operaciones de lixiviación en pilas con cantidades significativas de sulfuros requieren grandes cantidades de oxígeno como reactante necesario para completar la disolución del cobre. El ingreso de oxígeno a la pila por medio de convección natural y difusión molecular en la solución ácida resulta insuficiente para sostener una producción de cobre económicamente rentable. En estos casos, se hace necesario utilizar aireación forzada.

Los mecanismos de oxigenación de una pila ilustrados en la Figura 8 pueden ser mediante difusión molecular (debido a las reacciones químicas), convección natural (el aire llena los

espacios intersticiales de manera natural) y convección forzada (o aireación forzada). El oxígeno presente en el aire trabaja como un agente lixivante más dentro de los módulos, generando condiciones oxidantes mayores y aumentando la disolución de aquellos minerales que son de una velocidad menor de reacción, como son el caso de los minerales sulfurados. Debido al agotamiento de minerales oxidados y la presencia de sulfuros, es necesario forzar la aireación dentro de la pila ya montada para mantener y en mejor caso, aumentar las recuperaciones de cobre en el PLS.

El ingreso paulatino del aire (Figura 7) es mediante un sistema de tuberías corrugadas perforadas, colocadas a mínimo un metro desde la base de la pila e introduciendo aire mediante sopladores, que distribuyen la inyección del aire mediante una serie de emisores puntuales que generan un flujo de aire desde abajo hacia arriba, en contrario al flujo de solución que va desde arriba hacia abajo. Un sistema de aireación debe abastecer los requerimientos de oxígeno del proceso, lo que fundamentalmente, son dependientes de la granulometría, contenido de arcillas, estructura, entre otros.

El propósito de utilizar la aireación forzada en las operaciones de lixiviación es aumentar la cinética de extracción del cobre contenido en el mineral, y esto se consigue cuando el oxígeno del aire oxida los iones ferrosos presentes en las soluciones de lixiviación formando iones férricos. El ion férrico formado oxida el cobre (calcosina y covelina) o azufre y se reduce a ion ferroso. Bajo condiciones de suministro de ácido adecuado, el ion ferroso se oxida con oxígeno de nuevo y el ciclo continúa hasta que la lixiviación del sulfuro cesa debido al agotamiento del mineral de cobre. Esto hace posible un aumento en la concentración de cobre en solución generando una mayor recuperación del sistema.

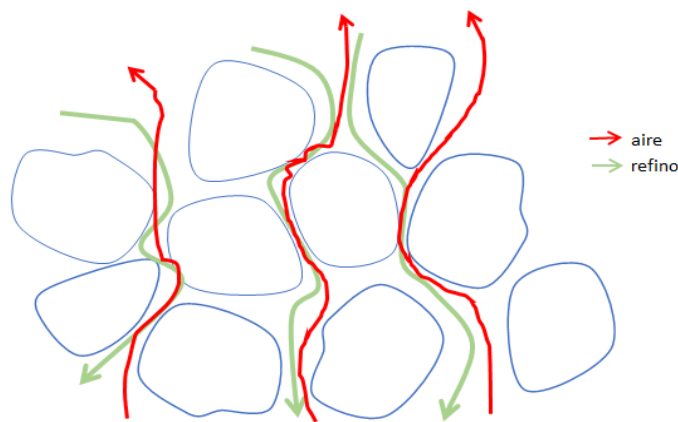


Figura 7. Movimiento de flujos de aire y refino dentro de un semimódulo lixiviado. Fuente: Elaboración propia.

La aireación de las pilas primarias oxida el ferroso a férrico de acuerdo a la siguiente reacción química:

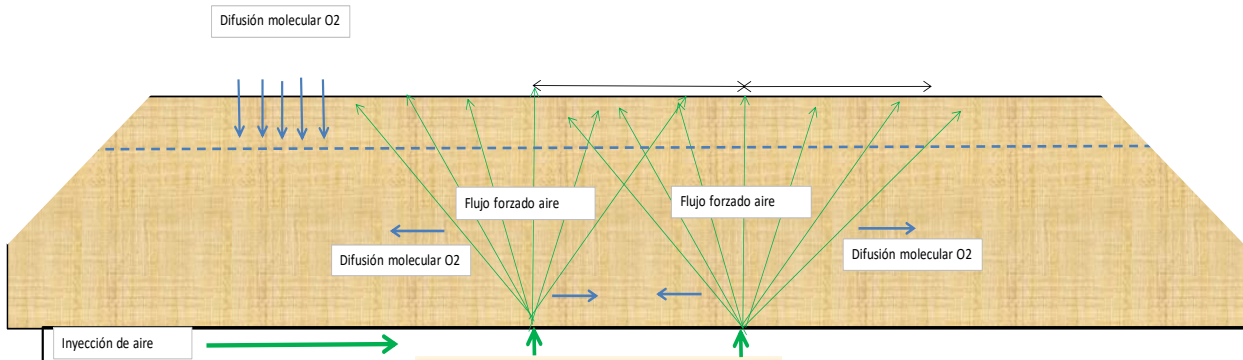
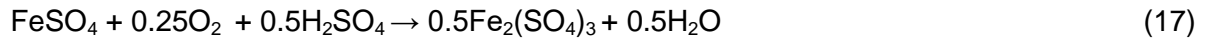


Figura 8. Ilustración de como el oxígeno ingresa a la pila por inyección de aire forzado y su respectiva distribución de flujos de aire. Fuente: Elaboración propia.

4 ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.1 Metodología de trabajo

Los alcances de este proyecto se resumen en la instalación, control metalúrgico, formulación de un modelo operacional de aireación y su posterior implementación.

Para satisfacer los objetivos de este proyecto se ejecutó el siguiente cronograma de actividades.

- Generación Carta Gantt
- Recopilación bibliográfica teórica y operacional de DRT
- Caracterización mineralógica de DRT
- Caracterización mineralógica de los semimódulos evaluar
- Recopilación de datos de generación Fe^{3+} en mineral limonítico
- Instalación del sistema de aireación en los semimódulos
- Operación del sistema de aireación
- Control de operación de semimódulos de lixiviación con y sin aireación
- Muestreo de soluciones de refinación y salida para semimódulos con y sin aireación
- Estimación diaria de extracción de Cu
- Evaluación generación y extracción FeT , Fe^{2+} y Fe^{3+}
- Preparación de informe y presentación de resultados del estudio

Una vez generada la Carta Gantt y revisada la recopilación bibliográfica y operacional de DRT se procedió a revisar la caracterización mineralógica de DRT. Esto permitió definir un procedimiento para la generación del modelo operacional, con cada una de las variables y alcances que puede generar la mineralogía u otros componentes.

4.2 Caracterización mineralógica del mineral

El mineral utilizado en el desarrollo del proyecto corresponde a mezclas de mineral mixto de cobre con presencia de sulfuros y óxidos de cobre. Estos son extraídos desde la mina y tratados en el proceso de chancado para su posterior apilamiento. El mineral apilado en cada semimódulo y su posterior lixiviación tienen un ciclo cercano a los 60 días. Una vez terminado el ciclo el mineral se envía a lixiviación secundaria y se vuelve a apilar el semimódulo trabajado. Los ciclos de los semimódulos se determinan por la carga de mineral que fue agregado.

El análisis mineralógico obtenido gracias al departamento de geología de DRT permitió determinar las especies minerales constituyentes en DRT y que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización mineralógica de los principales minerales en DRT.

Mineralogía	Composición mineralógica
ÓXIDOS	
Atacamita	$3\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Crisocola	$\text{CuOSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Copper Wad	$\text{CuMnO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$
SÚLFUROS	
Calcosina	Cu_2S
Covelina	CuS
Calcopirita	CuFeS_2
Pirita	FeS_2
Bornita	Cu_5FeS_4
LIMONITAS	
Hematita	Fe_2O_3
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Goethita	$\text{FeO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
ARCILLAS	

4.3 Clasificación química y muestreo del mineral

Para definir los tipos de minerales en estudio, DRT ha determinado que aquellos minerales con razón de solubilidad (CuS/CuT) mayores a 70% corresponden a óxidos, aquellos entre 20-70% son mixtos y los que tengan razón bajo 20% son sulfuros.

Para la toma de muestras, se definió un procedimiento de muestreo del PLS, el cual consideraba tomar muestras de los 3 semimódulos que tienen aireación y un semimódulo en sin aireación, este último se encontraba dos semimódulos posteriores al último con aireación, de esta forma el semimódulo sin aireación no tendría ninguna repercusión o contacto con el aire suministrado por los kit de aireación. Además, se consideró el muestreo del refino suministrado a las pilas. Luego de ver que las muestras tomadas en el día tienen resultados similares, se determinó que basta sólo un muestreo diario por cada semimódulo a trabajar. El procedimiento de muestreo se evidencia en la Figura 9.

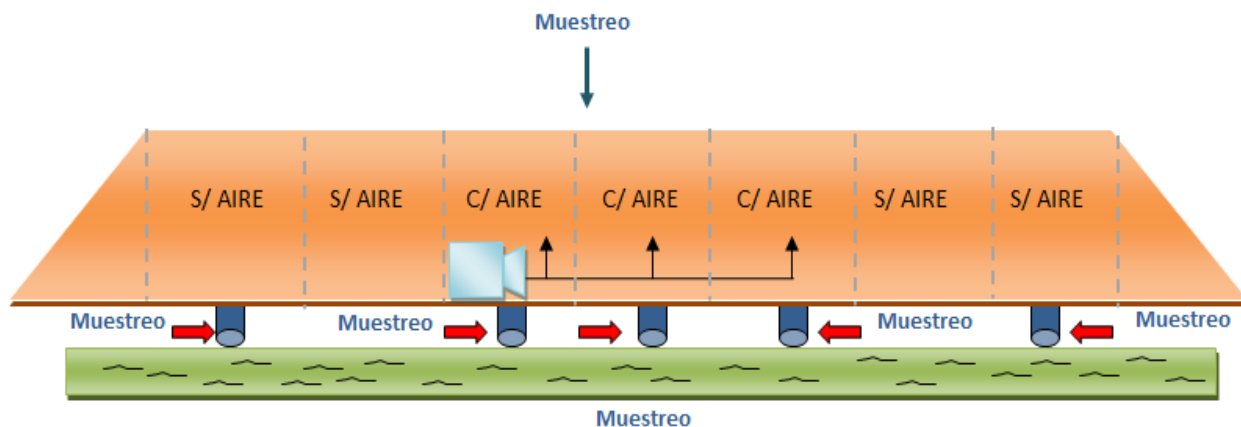


Figura 9. Ilustración del muestreo en las pilas primarias para semimódulos con y sin aireación forzada. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras se analizaron por Cu^{2+} , H^+ , Fe^{2+} , Fe^{3+} , FeT , pH , Eh . Los resultados permitieron determinar si se produce un aumento en la cinética del proceso, consumo de Fe^{3+} , y mediante esto se obtuvo un modelo operacional viable para el proyecto.

La caracterización química promedio de las soluciones de refino y PLS de DRT entre los meses de Junio y Octubre del 2017 se presentan en Tabla 3, estos resultados permitieron conocer la concentración de las especies más importantes en estas soluciones y sus posibles efectos mediante aireación forzada.

Tabla 2. Caracterización química de soluciones en DRT.

Solución	Cu^{2+} [gpL]	H^+ [gpL]	FeT [ppm]	Fe^{2+} [gpL]	Fe^{3+} [gpL]	pH	Eh (mV)
Refino	1,41	14,86	5603	3384	2219	1,21	461
PLS	5,21	9,85	6239	3670	2569	1,32	438

Para conocer el comportamiento de los minerales de cobre en condiciones de aireación forzada y generación de iones férricos, se comenzó por evaluar la granulometría del mineral apilado, el cual se mantiene en un promedio de 100%-1 ¼ malla y curado a 6 kg H_2SO_4 /tms sobre la correa transportadora que envía el mineral chancado hasta su posterior apilado. Luego de esto se procedió a instalar el sistema de aireación y se espera a que se apilara el mineral en los semimódulos respectivos. Una vez se terminó de apilar el tercer semimódulo, se comenzó con la aireación, ya que el sistema contemplaba la aireación de 3 semimódulos continuos. Como son 3 semimódulos continuos con aireación y el ciclo de apilado de un semimódulo tarda 1,5 días, la diferencia entre regar el primer semimódulo con aireación y el tercero son cerca de 5 días. Esto

dificulta la comparación de cada semimódulo para un mismo sistema de aireación, ya que además el primer semimódulo fue regado antes, lo que también influyó directamente en el comportamiento del mineral ya que aún no es aireado.

Por otro lado el desfase desde que se inició el riego hasta cuando el semimódulo descarga las primeras soluciones varia de 6-8 días. Todo esto genera distintos resultados en cada una de las lixiviaciones de cada semimódulo, ya que por un lado el primer semimódulo es regado por cerca de 4 días hasta que inicia la aireación, el siguiente semimódulo se airea luego de su 2^{do} día de iniciado el riego y el tercer semimódulo es aireado apenas comienza el primer riego. De esta forma se pueden obtener distintos casos para un mismo sistema de aireación reflejados en cada semimódulo. Este sistema de trabajo genera incertidumbre, ya que como no se puede controlar con precisión en mineralogía cargada, no se puede determinar con exactitud cuál es el efecto de la aireación.

4.4 Condiciones generales de operación para pilas primarias

El proceso de lixiviación primaria en DRT se realiza en dos pilas dinámicas. Cada pila tiene una dimensión de 384m de ancho por 1350m de largo con 8 a 10m de altura, subdivididas en 27 semimódulos de 384m de ancho por 50 m de largo, ilustrados bajo Figura 10. Los semimódulos están numerados desde el 0B al 13B (pila 1) y 14A al 27A (pila 2). Para efectos de este estudio, se cambió la numeración de los semimódulos trabajados por DRT y de esta forma facilitar la lectura de la memoria. Por consiguiente, el cambio en la nomenclatura de los semimódulos para cada pila queda expresado en Figura 11.

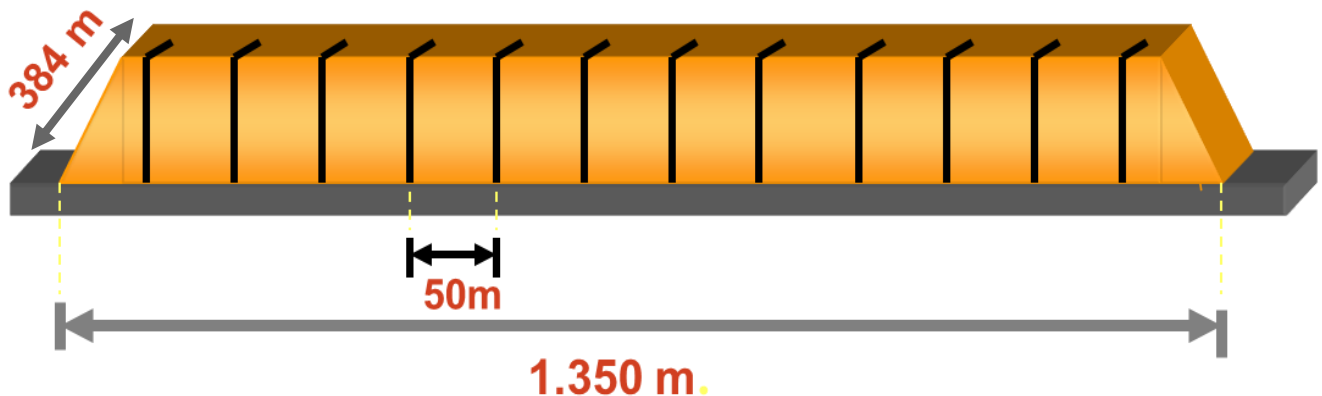


Figura 10. Dimensión de pilas y semimódulos en lixiviación primaria. Fuente: Elaboración propia.

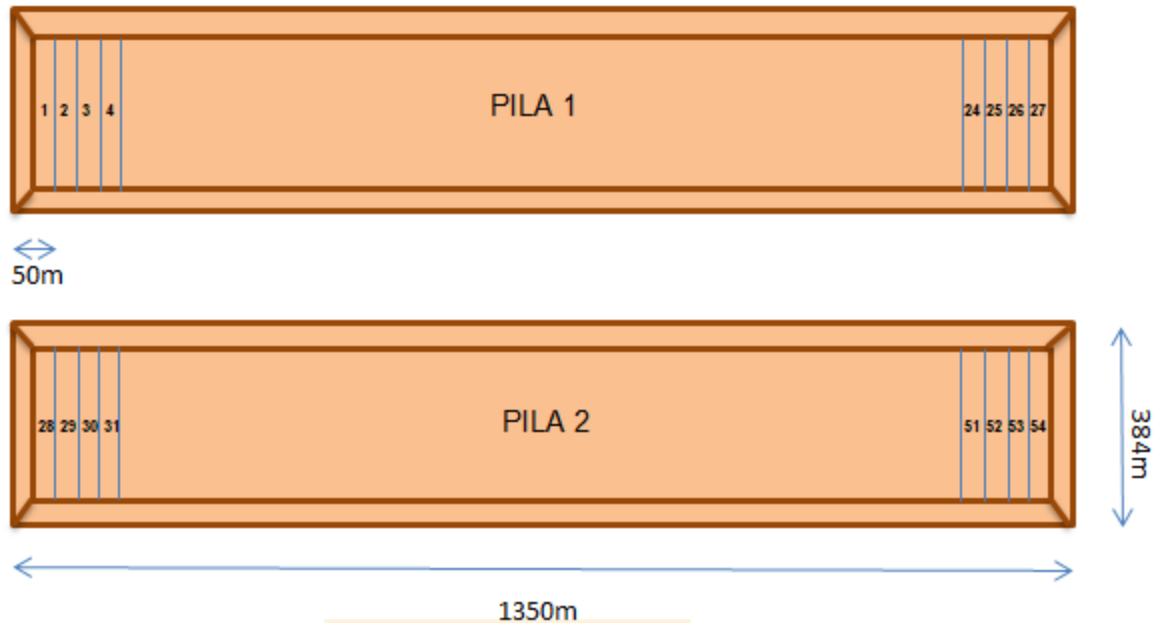


Figura 11. Distribución y numeración de semimódulos en pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.

El sistema de riego utilizado en LP es mediante goteros y aspersores ubicados en sus coronas con solución de refinado proveniente de SX, con una malla de riego de 0,75m x 0,75m generando una tasa de riego de 8L/hm². Cada semimódulo tiene un flujo de entrada de 210m³/h de solución de refinado, uniforme para cada uno de ellos. Por lo general el tonelaje apilado en cada semimódulo es de 270.000ton con leyes de 0,5% Cu_T y 0,3% Cu_{sol}.

4.5 Pruebas para generación de Fe³⁺ por parte de minerales limoníticos

Para determinar el comportamiento metalúrgico que presenta la mineralogía de DRT, se realizaron pruebas de medición de consumo y producción de Fe_T y Fe³⁺, principalmente asociado a minerales limoníticos y férricos.

El objetivo principal de estas pruebas fue evaluar el comportamiento metalúrgico y la generación de Fe³⁺, por la lixiviación de minerales férricos de DRT.

Las pruebas se realizaron en base a lixiviación en columnas, en columnas de 10m de alto y 30 cm de diámetro. El tipo de riego fue intermitente con 12h de riego y 12h en reposo a una tasa

de riego de 8L/h/m². Las condiciones operacionales para este estudio fueron un curado ácido de 10Kg/t de muestra con la máxima tasa de ácido soportable por el mineral por un tiempo de 1 día. La solución lixivante es refino de DRT y se lixivió por un periodo de 15 días.

A continuación se muestra la Tabla 3, que hace referencia análisis químico de cada mineral a lixiviar. Las muestras de mineral fueron tomadas desde la estación de muestreo RAMSEY, ubicado después de chancado terciario.

		Análisis químicos (%)						
Muestra	Fase	CuT	Cusol	FeT	Fesol	MoT	Mosol	MnT
Goethita fina	13	0,340	0,290	1,120	0,200	0,021	0,007	0,005
Jarosita fina	13	0,580	0,500	0,920	0,160	0,017	0,004	0,006
Hematita fina	13	0,400	0,380	0,510	0,150	0,009	0,004	0,010
Jarosita Gruesa	19	0,111	0,032	0,940	0,120	0,003	0,003	0,000
Limonita Gruesa	19	0,225	0,164	1,070	0,190	0,018	0,006	0,000

4.6 Sistema de aireación forzada

Para suministrar el oxígeno requerido por el proceso se utilizaron sistemas de aireación forzada, denominados kit de aireación. Estos se ubican en la base de la pila y por sobre la zona de recolección de soluciones. Esta configuración fue replicada en su máxima extensión en ambas pilas, llegando a un peak requerido de 4 kit de aireación por pila (Figura 12). Cada kit está compuesto por un soplador y un generador de energía, los cuales operan de forma continua por 45 días, esta operación considera un VDF (variador de frecuencia) para iniciar las partidas.

Cada uno de estos Kit abarca un largo de 150m correspondiente a 3 semimódulos en lo ancho de las pilas primarias, esto se muestra en Figura 13.

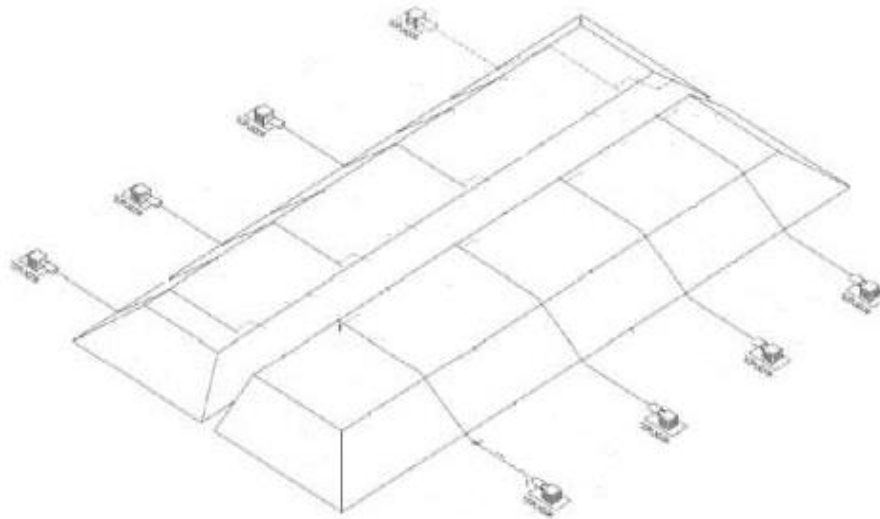


Figura 12. Distribución máxima de kit de aireación en las pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.

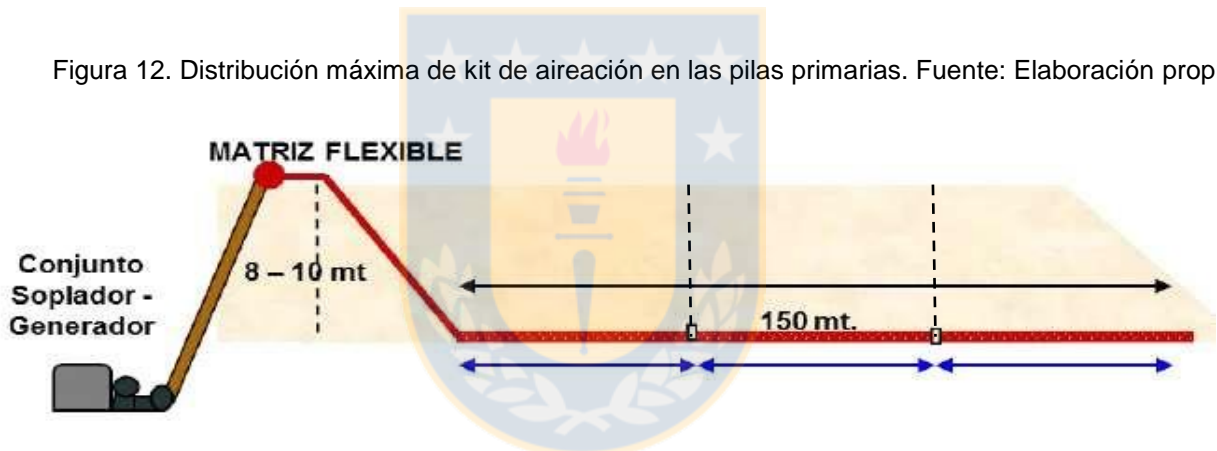


Figura 13. Dimensión del sistema de aireación que abarca 3 semimódulos continuos. Fuente: Elaboración propia.

4.6.1 Instalación kit de aireación

Como se mencionó anteriormente, cada Kit de aireación se instaló en la base de la pila, en el costado del semimódulo asignado. Para los instalados en la pila 1, estos se ubicaron en el sector de canaleta de recolección de soluciones y los instalados en la pila 2 se ubicaron en el sector de alimentación de la misma pila. Un ejemplo de esto se muestra en Figuras 14 y 15.



Figura 14. Imagen de un kit de aireación instalado a un costado de la pila con su respectiva manga de distribución de aire forzado. Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Kit n° 08 de aireación instalado. Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de estos kit tiene un peso aproximado de 8t. El transporte e instalación de los kit en su semimódulo correspondiente, se realizó bajo un procedimiento de instalación efectuado por una grúa apta para mover equipos de hasta 90 t y bajo un radio de hasta 50m. La instalación de los kit se visualiza en Figura 16.



Figura 16. Proceso de instalación de kit de aireación a un costado de la pila. Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Instalación de los conjuntos de aireación

En la salida de cada kit de aireación, se instaló una matriz flexible de 600mm de diámetro, la cual sube por el talud hasta la corona de la pila, extendiéndose hasta el borde del talud opuesto. Esta matriz tiene el largo del ancho de la pila (384m) que a su vez está conectado por las tuberías corrugadas (Drenaflex) de 63mm de diámetro, las cuales se estiran hasta la base de la pila para alimentar con aire forzado cada semimódulo. Estas tuberías tienen un largo de 175m (Figura 17) para abarcar los 3 semimódulos con aireación, las cuales están subdivididas por tramos. El primer tramo de 25m es ciego, el cual baja desde la corona hasta la base de la pila. El segundo tramo es de 150m, el cual tiene los orificios por donde se inyecta el aire forzado separados por 2m para una buena distribución de aire. Las tuberías corrugadas están separadas cada 4m por todo el ancho de la pila, obteniéndose un total de 96 tuberías distribuidas por todo el ancho de la pila.

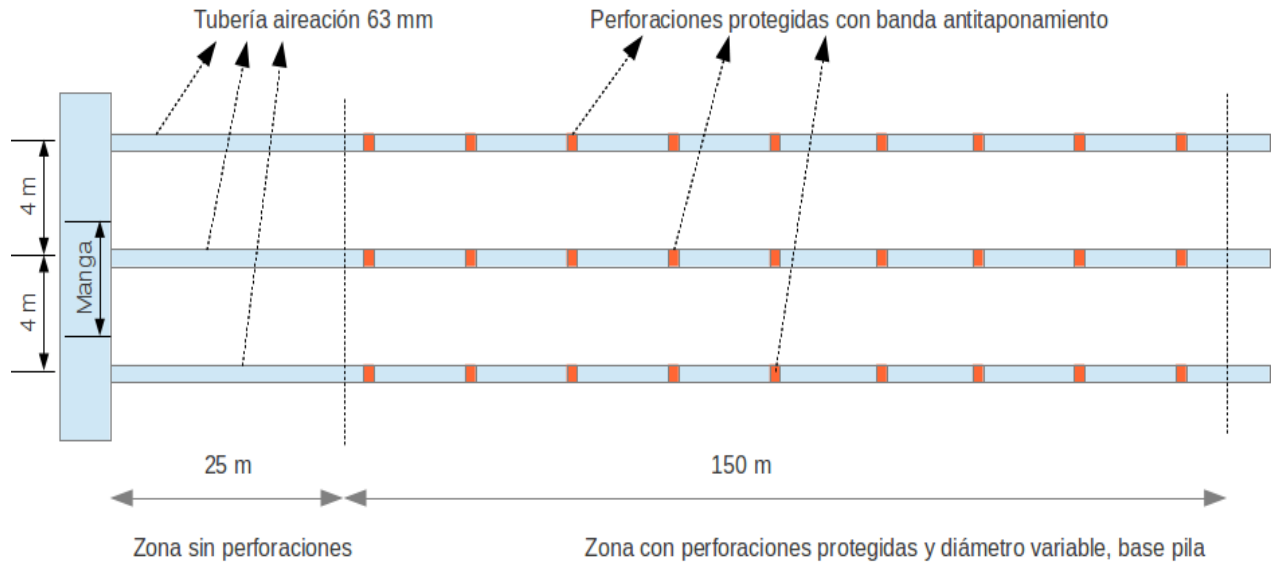


Figura 17. Diseño del conjunto de aireación forzada a instalar en pilas primarias. Fuente: Elaboración propia.

La instalación realizada por los operadores de la empresa SGS tuvo un tiempo de instalación cercana a las 3h. Previo a esto se realizó una coordinación con el apilado para que generen el espacio necesario para instalar estos conjuntos de aireación. La instalación se muestra en Figura 18 y 19.



Figura 18. Vista desde lo alto de la pila del proceso de instalación del conjunto de aireación en medio de la pila de lixiviación. Fuente: Elaboración propia.



Figura 19. Continuación del proceso de instalación del conjunto de aireación. Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 Parámetros operacionales kit aireación

Los kit de aireación deben contar con kit de respaldo, ya sea por falla y/o salida de algún kit por cumplimiento de ciclo de aireación.

Los parámetros actuales de operación del sistema y por consiguiente integrado en cada kit consiste en:

- a) Soplador Centrífugo
 - Caudal: 7500 m³/h (operación). Capacidad máxima 12000 m³/h
 - Presión estática: 100mbar (operación). Capacidad máxima 250mbar
- b) Generador
 - Capacidad: 275kva de salida 220Kw
 - Cabina antiruido
 - Motor diésel con filtros de combustible de 1500L
- c) Tablero eléctrico
 - VDF (variador de frecuencia)
 - Parada de emergencia y sistema de alarma en caso de fallas
 - Monitoreo online

Notar que en este estudio estos parámetros fueron analizados y evaluados luego de obtener los resultados correspondientes. De esta forma al generar un nuevo modelo de operación, este puede incluir o no los parámetros de operación de aireación forzada ya establecidos por la configuración de los kit de aireación.

5 RESULTADOS

5.1 Generación de Fe_T y Fe^{3+} en muestras limoníticas

A continuación se presentan los resultados del comportamiento metalúrgico de la lixiviación de minerales férricos de DRT, realizados en la sección 4.5. Los resultados obtenidos se comprueban en la tabla 4 y figura 20.

Tabla 3. Resultados de pruebas de lixiviación columnar para diferentes minerales limoníticos.

REFINO	Cu(gpl)	H+ (gpl)	FeT (ppm)	Fe2+ (ppm)	Fe3+ (ppm)	Mo (ppm)
	1,34	19,37	5103	2611	2492	22
Día 1						
Día 1	Cu(gpl)	H+ (gpl)	FeT (ppm)	Fe2+ (ppm)	Fe3+ (ppm)	Mo (ppm)
Goethita fina	3,73	36,8	5724	2734	2990	54,2
Hematita fina	3,87	36,2	5129	2567	2562	43,1
Jarosita fina	4,87	42,0	6350	2556	3794	94,3
Jarosita gruesa	1,42	36,8	5667	2466	3201	22,9
Limonita gruesa	1,93	48,3	5830	2500	3330	48,4
					0	
Día 5						
Día 5	Cu(gpl)	H+ (gpl)	FeT (ppm)	Fe2+ (ppm)	Fe3+ (ppm)	Mo (ppm)
Goethita fina	5,64	95,87	8807	2489	6318	130
Hematita fina	5,01	100	6783	2823	3960	78,9
Jarosita fina	4,58	67,82	9064	2533	6531	120
Jarosita gruesa	1,49	94,53	7139	2511	4628	24,2
Limonita gruesa	1,93	101,5	7186	2232	4954	68,6
					0	
Día 10						
Día 10	Cu(gpl)	H+ (gpl)	FeT (ppm)	Fe2+ (ppm)	Fe3+ (ppm)	Mo (ppm)
Goethita fina	4,48	62,42	10591	2790	7801	159
Hematita fina	4,84	92,88	6519	2399	4120	90,9
Jarosita fina	5,1	86,86	8971	2734	6237	152
Jarosita gruesa	1,56	29,21	6587	2511	4076	25,5
Limonita gruesa	1,97	35,38	6578	2511	4067	57,2
					0	
Día 15						
Día 15	Cu(gpl)	H+ (gpl)	FeT (ppm)	Fe2+ (ppm)	Fe3+ (ppm)	Mo (ppm)
Goethita fina	4,31	62,57	10651	1897	8754	141
Hematita fina	4,66	99,45	6841	1529	5312	84,6
Jarosita fina	5,78	93,22	9836	1975	7861	142
Jarosita gruesa	1,7	31,48	7287	2009	5278	22
Limonita gruesa	2,32	37,23	8345	1908	6437	79,7

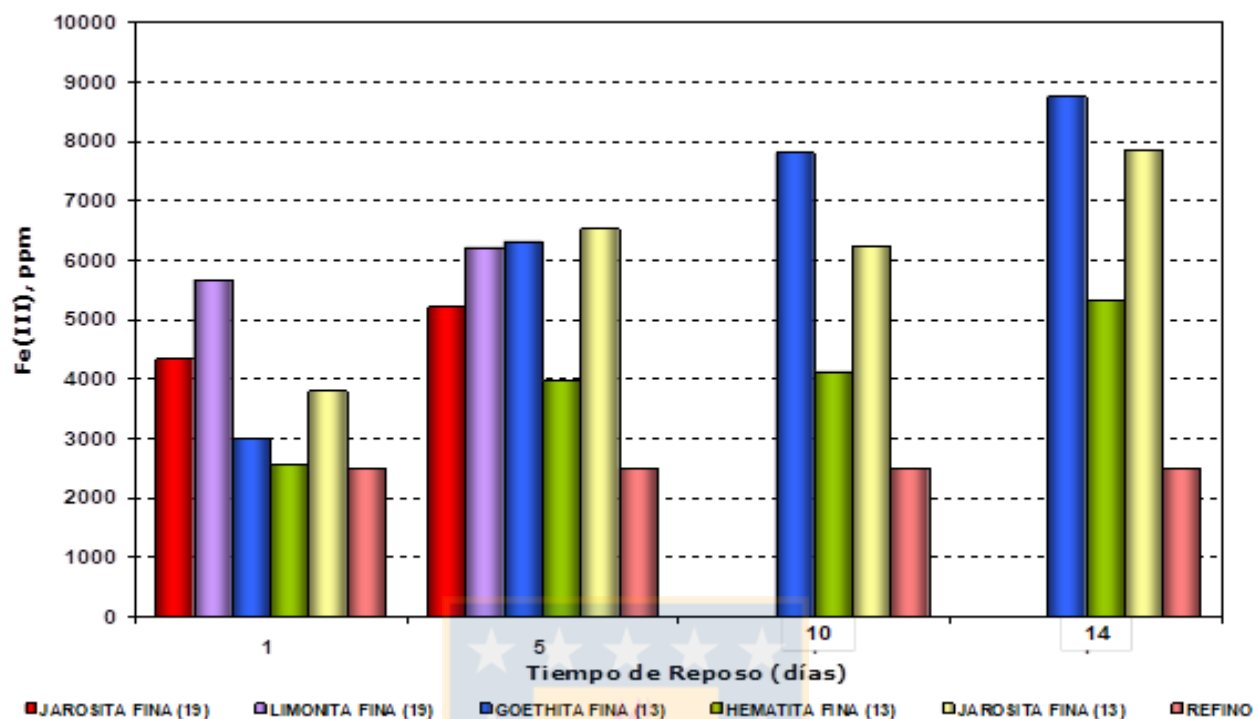


Figura 20. Fe^{3+} en solución, muestras finas.

Como se puede evidenciar en Tabla 4 y Figura 20, los minerales limoníticos presentan una gran producción de Fe^{3+} en solución, principalmente Goethita y Jarosita. Los minerales férricos de DRT constituyen una fuente potencial de ion férrico para la lixiviación de sulfuros alimentados a la planta. Es muy importante tener en cuenta que las tasas de curado, y granulometría fina son factores determinantes para la obtención de mayores recuperaciones de cobre, hierro y molibdeno.

5.2 Caracterización de semimódulos con y sin aireación

Para obtener una relación entre las cantidades de férrico y cobre extraído, así como también deducir un posible efecto de este ión sobre otras especies mineralógicas presentes en el mineral, se analizan a continuación los resultados obtenidos para el ión férrico.

Es por esto que se presenta la Tabla 5, que identifica los semimódulos que tienen aireación forzada y la Tabla 6 que incluye los que no tienen aireación forzada. Ambas tablas presentan las características y condiciones de cada semimódulo a estudiar. Para el presente proyecto se eligieron sólo los semimódulos que contienen una mineralogía mixta y además, para diferenciar el efecto del ión férrico en la cinética de recuperación de cobre y la extracción del mismo, se hace una comparación de los semimódulos con similar mineralogía.

Además, como se mencionó en la sección 4.4 del presente estudio, se realizó un cambio en la nomenclatura de los semimódulos para poder facilitar la comprensión del mismo. Por esta razón, se enumeraron los semimódulos en estudio del 1 al 11, en donde los semimódulos 1 al 8 son los que tienen aireación forzada y desde el 9 al 11 no tienen aireación forzada.

Tabla 4. Clasificación de semimódulos con aireación con su respectiva mineralogía.

Semimódulo	Con aireación forzada							
	Kit 1	Kit 11		Kit 5			Kit 4	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Tonelaje (tmh)	285120	290688	286464	269632	299840	386880	372672	270272
Cobre fino (tmCuf)	1488	1610	1404	1364	1412	2267	2243	1497
Ley CuT%	0,522	0,554	0,49	0,506	0,471	0,586	0,602	0,554
Ley Cu_{sol}%	0,275	0,294	0,285	0,325	0,308	0,308	0,373	0,389
Razón Cu_{sol}/CuT%	52,68	53,07	58,16	64,23	65,39	52,56	61,96	70,22
Proyección Ext %	60,6	60,45	63,06	68,2	68,93	60,53	65	69,79
Tasa curado (Kg/tms)	5,46	6,28	6,05	6,36	6,33	6,16	5,87	5,82
Altura SM (m)	9,5	9,47	8,84	9,13	9,06	9,16	9,33	9,34
%Atacamita	59	48	57	63	64	57	60	66
%Crisocola	4	1	1	4	3	2	2	1
%Arcillas	14	15	12	18	15	13	17	16
%Copper Wad	4	4	4	3	2	2	2	4
%Calcosina	13	24	22	10	13	19	14	10
%Covelina	0	0	0	0	0	0	0	0
%Calcopirita	0	0	0	0	0	0	1	0
%Bornita	0	0	0	0	0	0	0	0
%Pirita	5	8	3	3	2	6	4	3
Inicio Riego (día)	19-jul	24-ago	26-ago	15-sept	17-sept	18-sept	22-sept	24-sept
Inicio aireación (día)	28-jul	30-ago	30-ago	28-sept	28-sept	28-sept	28-sept	28-sept
Días de aireación	40	60	60	40	40	40	60	60

Tabla 5. Clasificación de semimódulos sin aireación con su respectiva mineralogía.

Semimódulo	Sin aireación forzada		
	9	10	11
Tonelaje (tmh)	271232	291968	271040
Cobre fino (tmCuf)	1177	1679	1575
Ley CuT%	0,434	0,575	0,581
Ley Cusol%	0,263	0,284	0,319
Razón Cusol/CuT%	60,60	49,39	54,91
Proyección Ext %	65,20	57,31	62,06
Tasa curado (Kg/tms)	5,95	6,22	6,14
Altura SM (m)	9,17	9,14	8,51
%ATACAMITA	61	49	52
%Crisocola	4	1	2
%Arcillas	15	11	15
%Copper Wad	1	4	6
%Calcosina	13	22	23
%Covelina	0	0	0
%Calcopirita	0	0	0
%Bornita	0	0	0
%Pirita	5	13	2
Inicio Riego (día)	10-jul	15-ago	31-ago

5.3 Variación de Fe³⁺ en los semimódulos con y sin aireación forzada

Las figuras 21,22 y 23 muestran la variación de la concentración del ión férrico entre los semimódulos con aireación forzada comparándolos con los que no tienen aireación. Ésta comparación se hace bajo similar mineralogía, la cual contempla una media cantidad de sulfuros (11%-15%) y gran cantidad de sulfuros (>15%), y además, baja cantidad de pirita (<5%) y alta cantidad de pirita (>5%).

Dentro de los semimódulos sin aireación no se pudo incluir a todos los muestreados, debido a que los restantes presentaban una mineralogía de muchos óxidos y no necesariamente mixta, lo que los hacía muy diferentes mineralógicamente respecto a los que están en estudio.

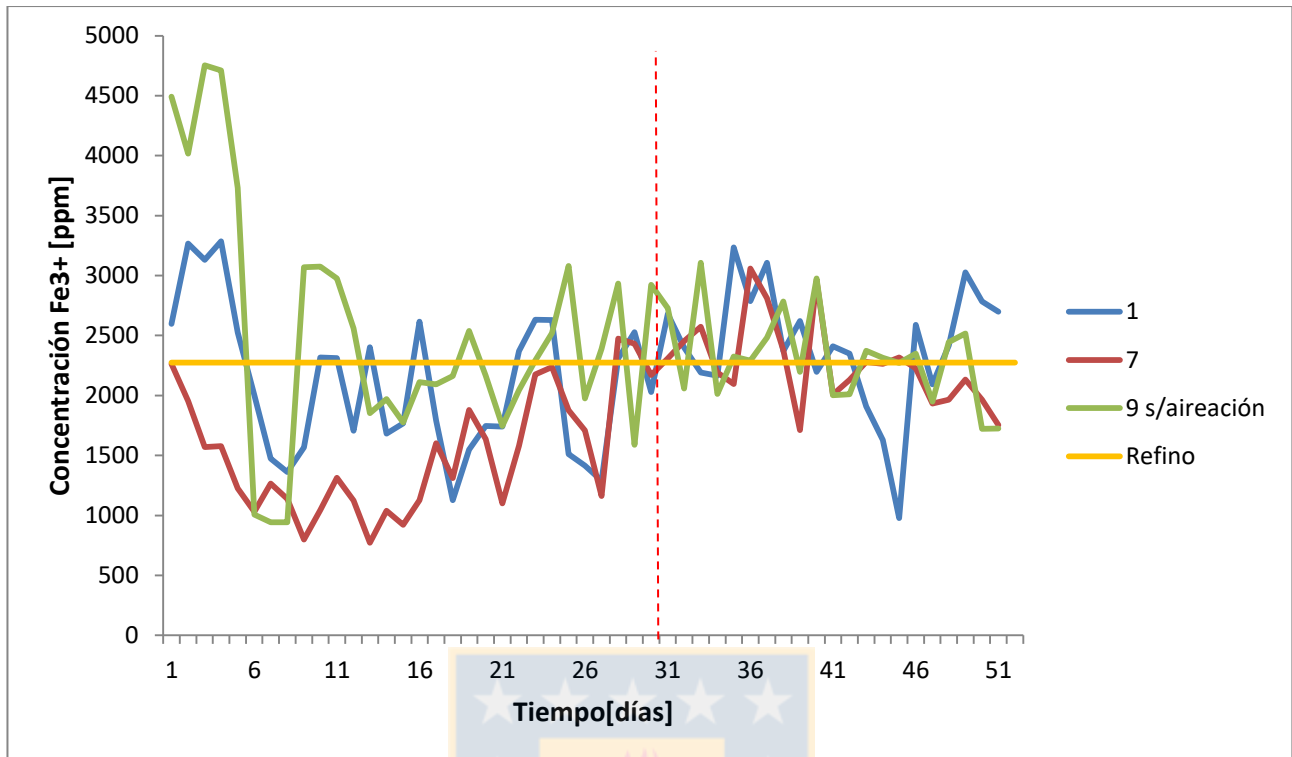


Figura 21. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía media en sulfuros.

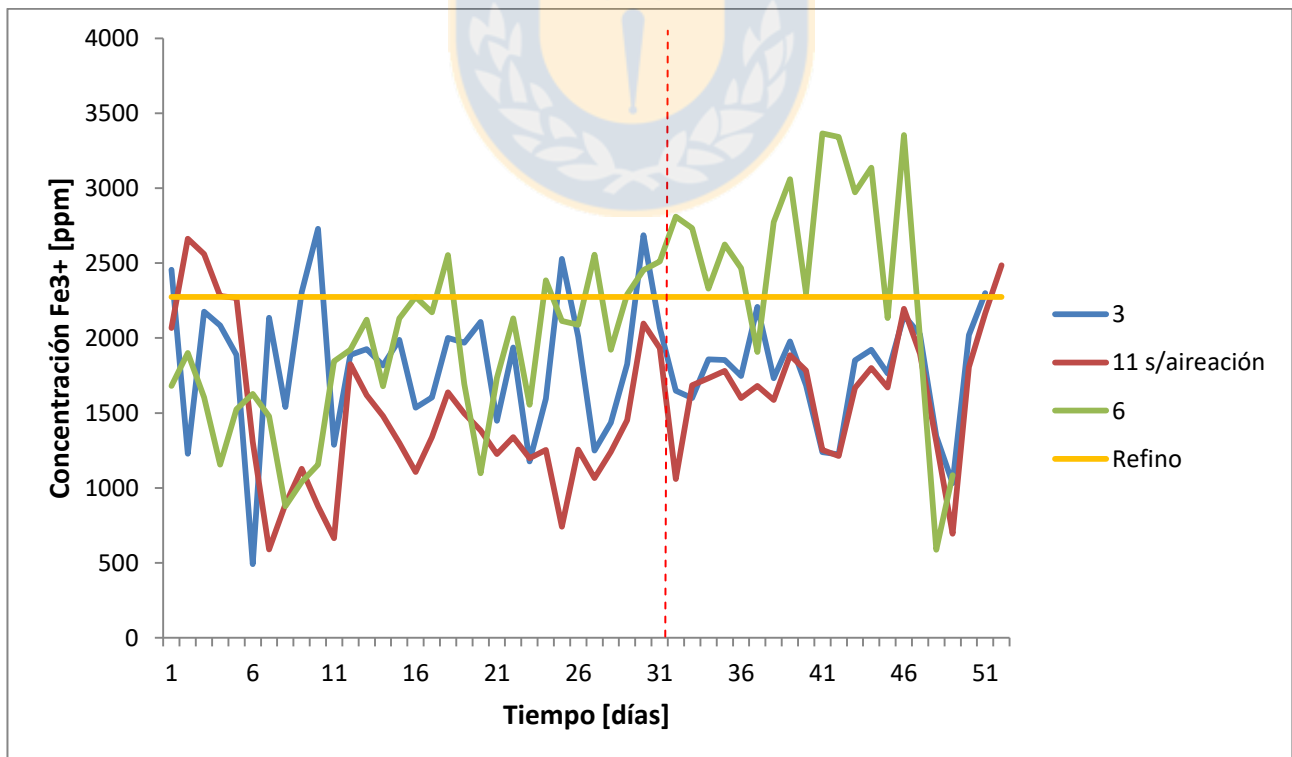


Figura 22. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía alta en sulfuros con media cantidad de pirita.

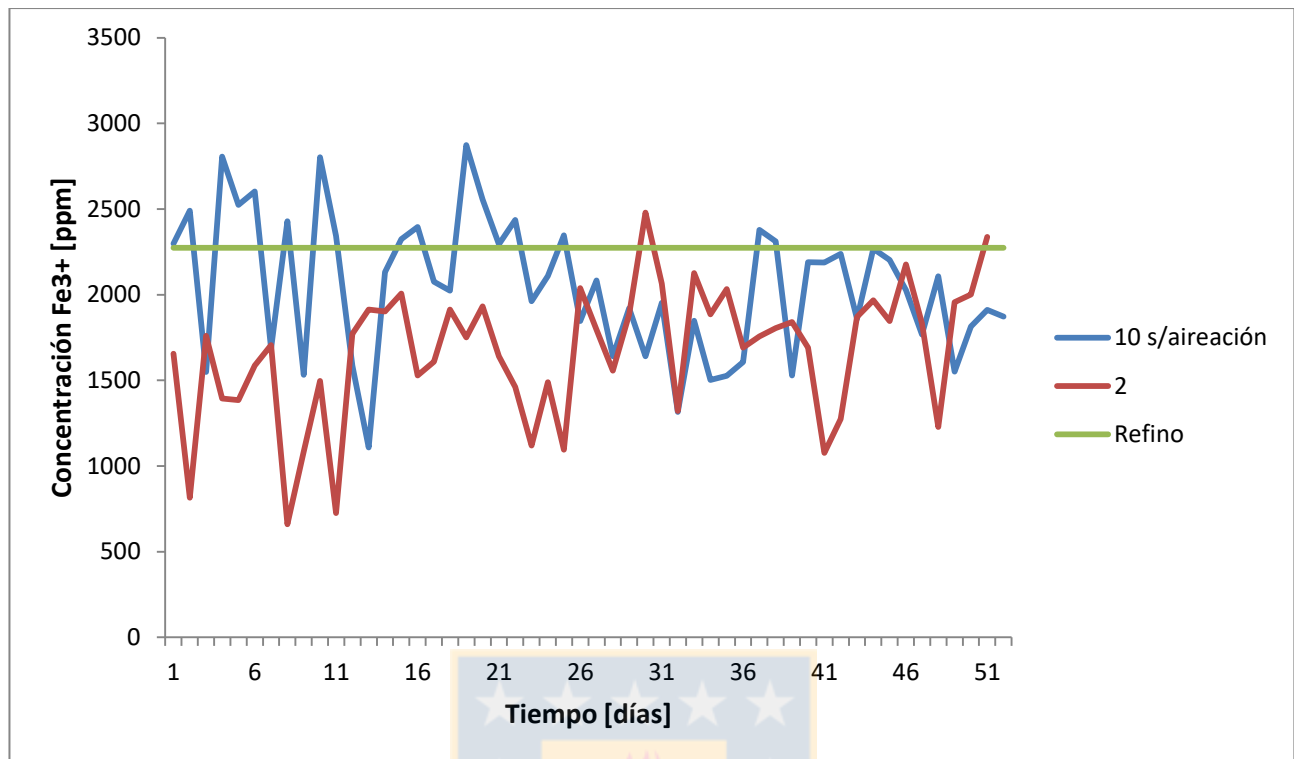


Figura 23. Variación de la concentración de férrico en semimódulos con y sin aireación, y mineralogía alta en sulfuros con alta cantidad de pirita.

Como se puede ver en la Figura 21, todos los semimódulos comienzan con una alta cantidad de Fe^{3+} , pero después disminuye su concentración, lo que podría estar asociado al consumo que generan los minerales sulfurados de cobre para disolución. En las figuras 21 y 23, al comparar los semimódulos con y sin aireación, no se observa un efecto de la aireación que se manifieste en una mayor concentración de férrico, lo cual tampoco es determinante pues no se tiene claridad respecto del consumo de férrico. En la Figura 22 sí se ve en promedio una mayor concentración de férrico en los semimódulos con aireación.

5.4 Efectos de la aireación en la cinética de disolución de cobre

Los siguientes análisis se realizaron para estudiar el efecto del ión férrico en la lixiviación del mineral mixto y por consiguiente, la cinética de recuperación de cobre.

Las figuras 24, 25 y 26, muestran los resultados de la cinética de extracción de cobre, para los semimódulos con bajo, medio y alto contenido de sulfuros.

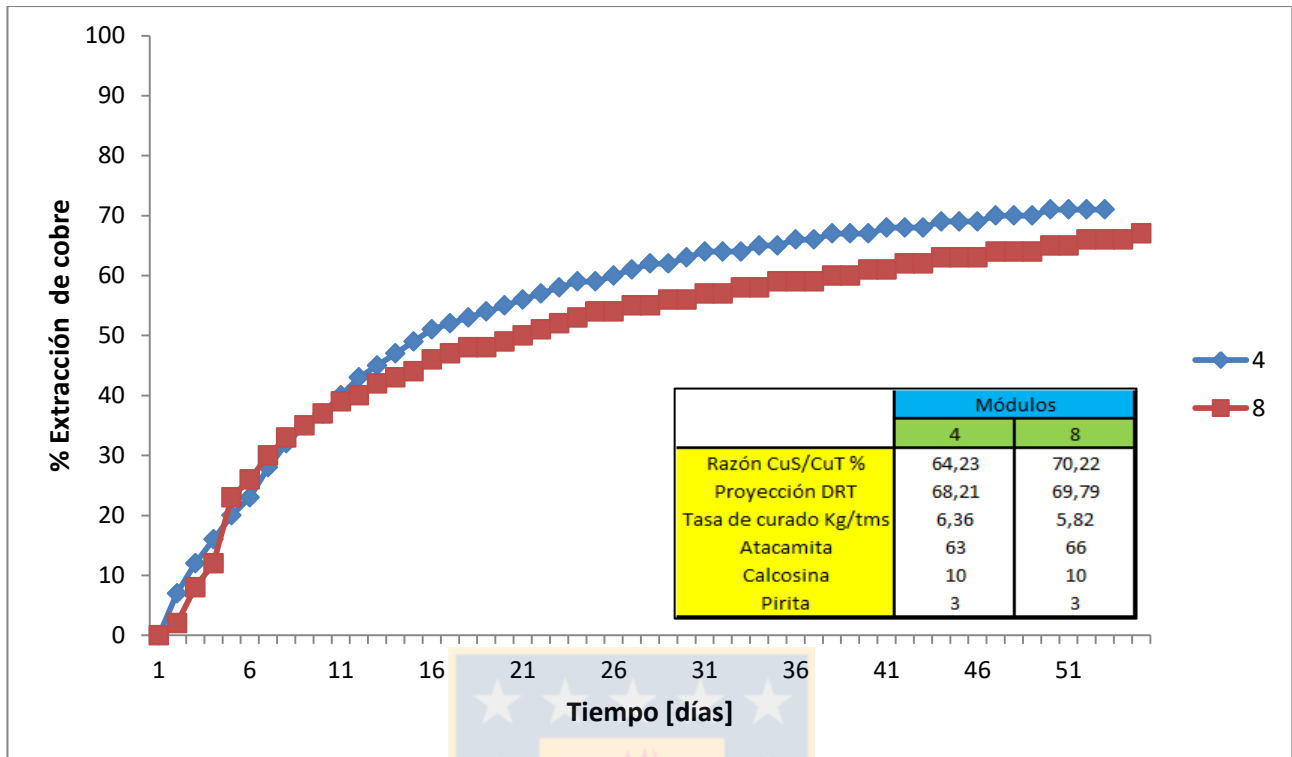


Figura 24. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y bajo contenido de sulfuros.

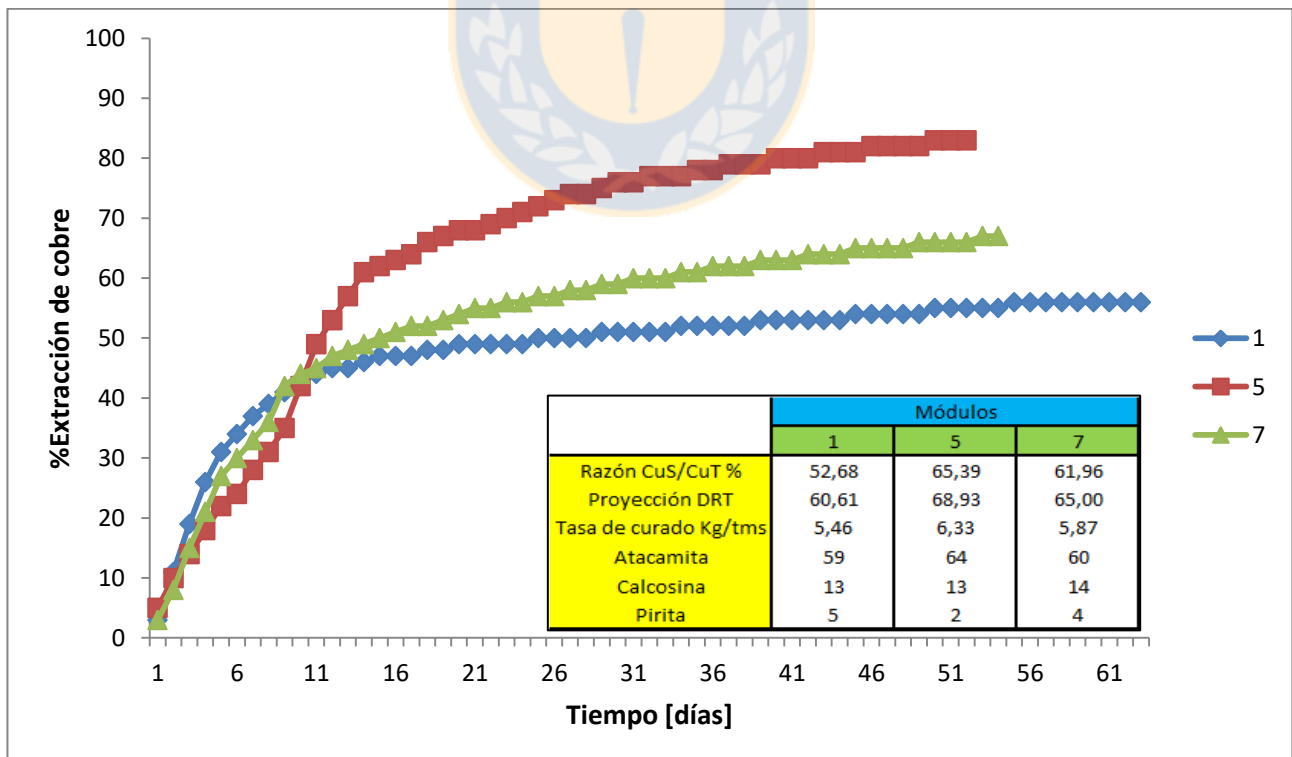


Figura 25. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y medio contenido de sulfuros.

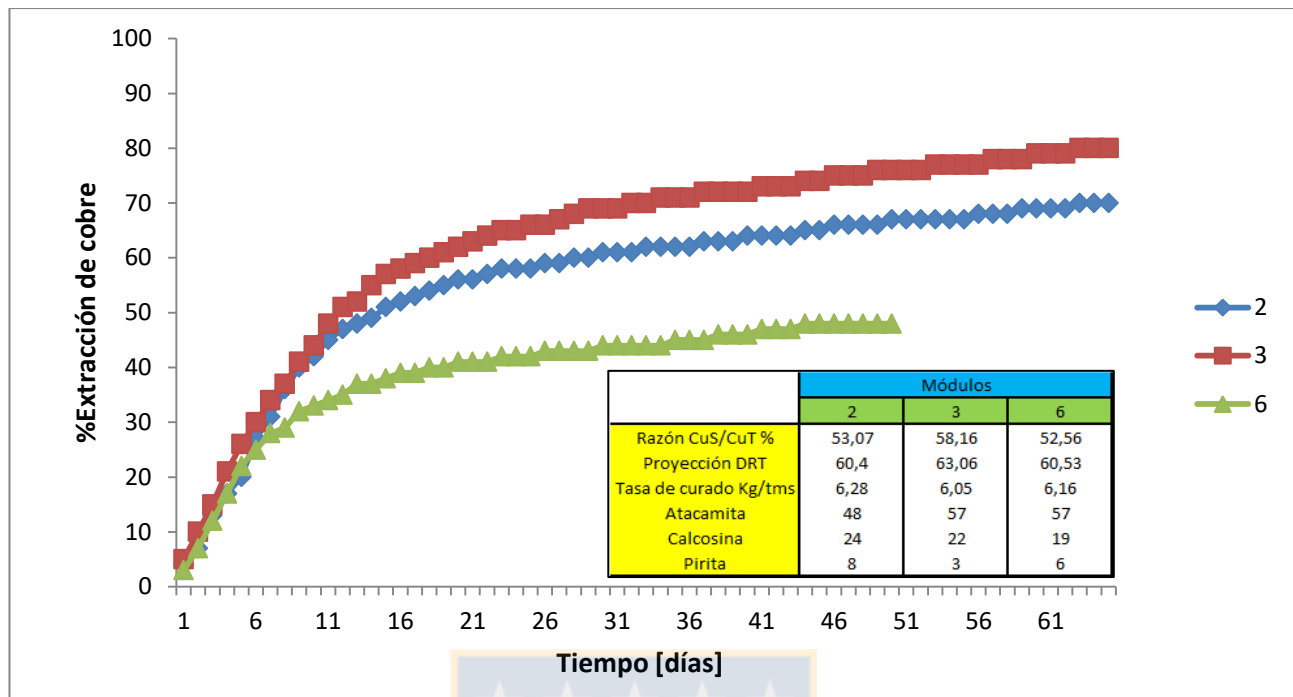


Figura 26. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con aireación y alto contenido de sulfuros.

Si bien todas las comparaciones cinéticas de cada figura se hicieron en base a mineralogías similares, éstas cinéticas presentan resultados distintos.

En el caso de la Figura 24, la diferencia en el aumento de un 3,3% en extracción se debe principalmente a que al semimódulo 4 se le realizó un curado mayor a al semimódulo 8, siendo que aun así el semimódulo 8 tiene mayor solubilidad que el semimódulo 4.

Para la figura 25, la diferencia de extracción del semimódulo 5 respecto al 1 y 7 es debido a su mayor solubilidad y mayor tasa de curado, respecto a los anteriores. El semimódulo 1 presenta una menor extracción debido a que su solubilidad es mucho menor y además su curado fue menor respecto a los demás semimódulos.

En la figura 26 se evidencia que el aumento en la extracción de cobre del semimódulo 3 es debido a que su solubilidad es mayor respecto a los otros dos semimódulos, y particularmente el semimódulo 6 tiene una extracción definitivamente menor debido a que éste presentó un derrumbe en su lixiviación dificultando la toma de muestras y la respectiva extracción de cobre.

Las figuras 27, 28 y 29, representan la comparación de los anteriores minerales sulfurados de cobre con aireación forzada en comparación a los con mineralogía similar pero sin aireación.

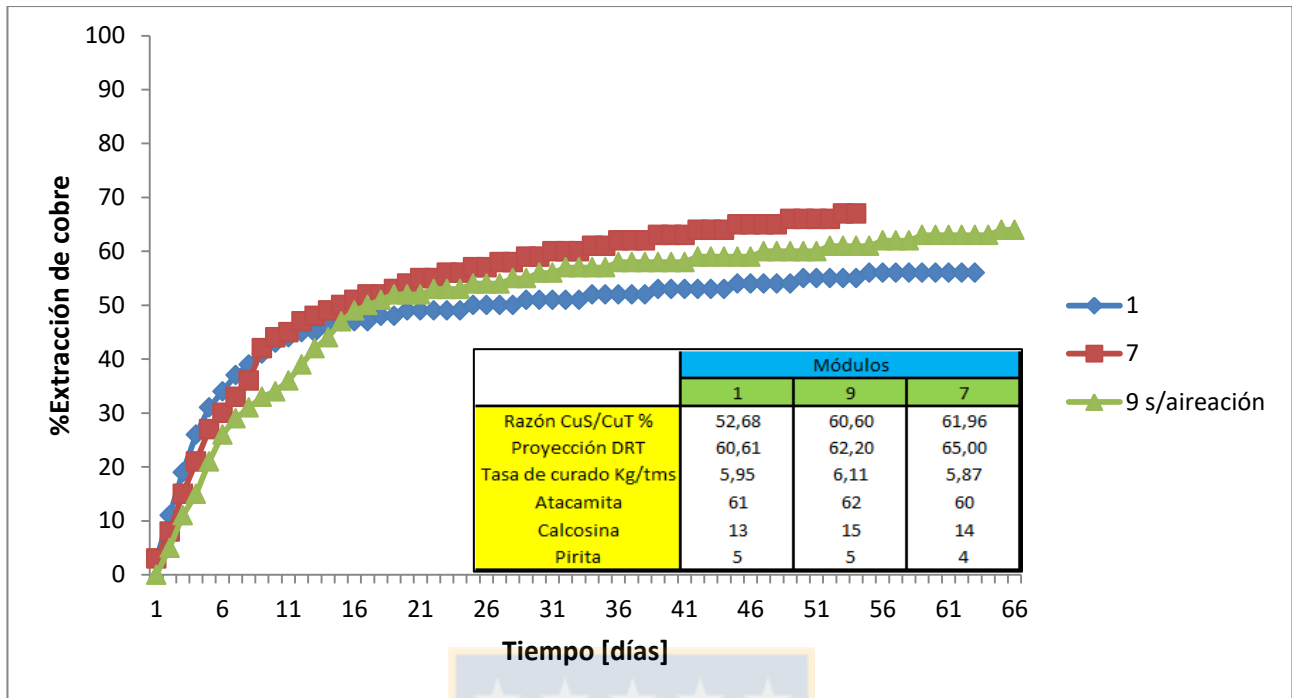


Figura 27. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con contenido medio de sulfuros.

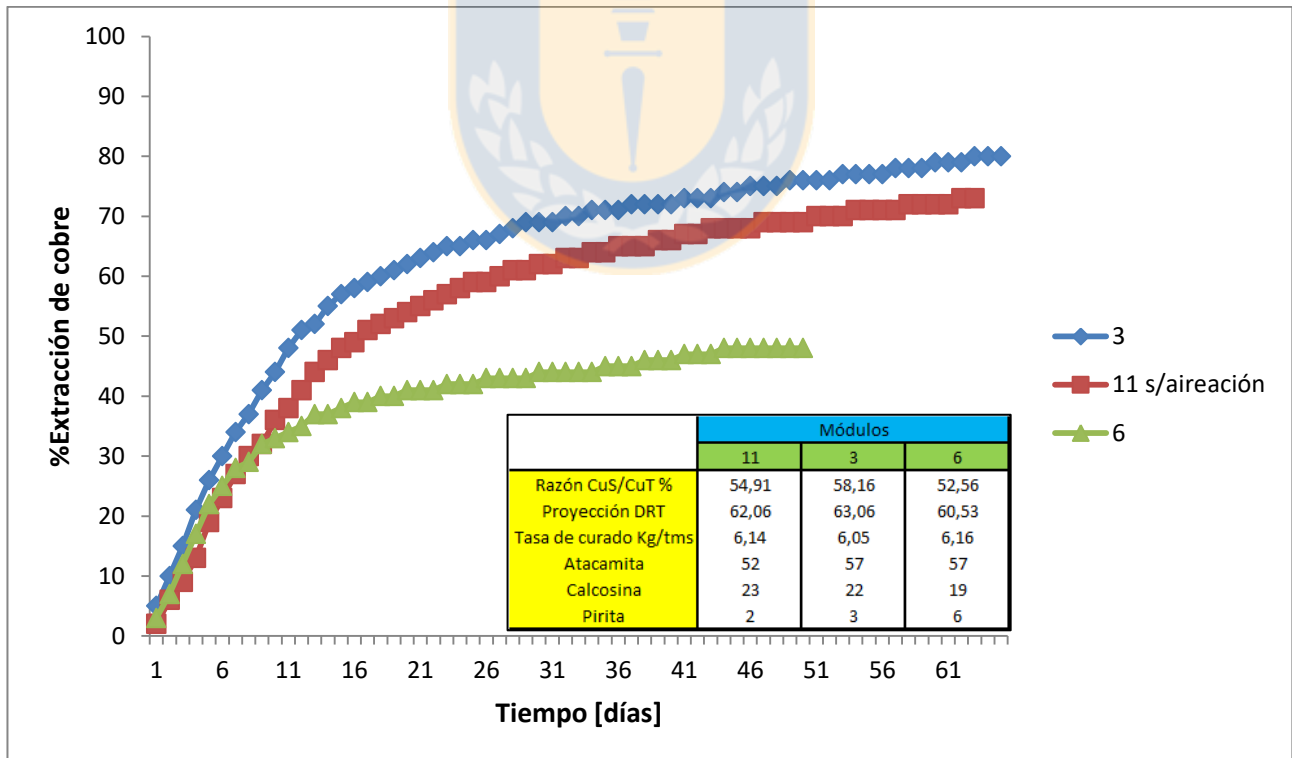


Figura 28. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con alto contenido de sulfuros.

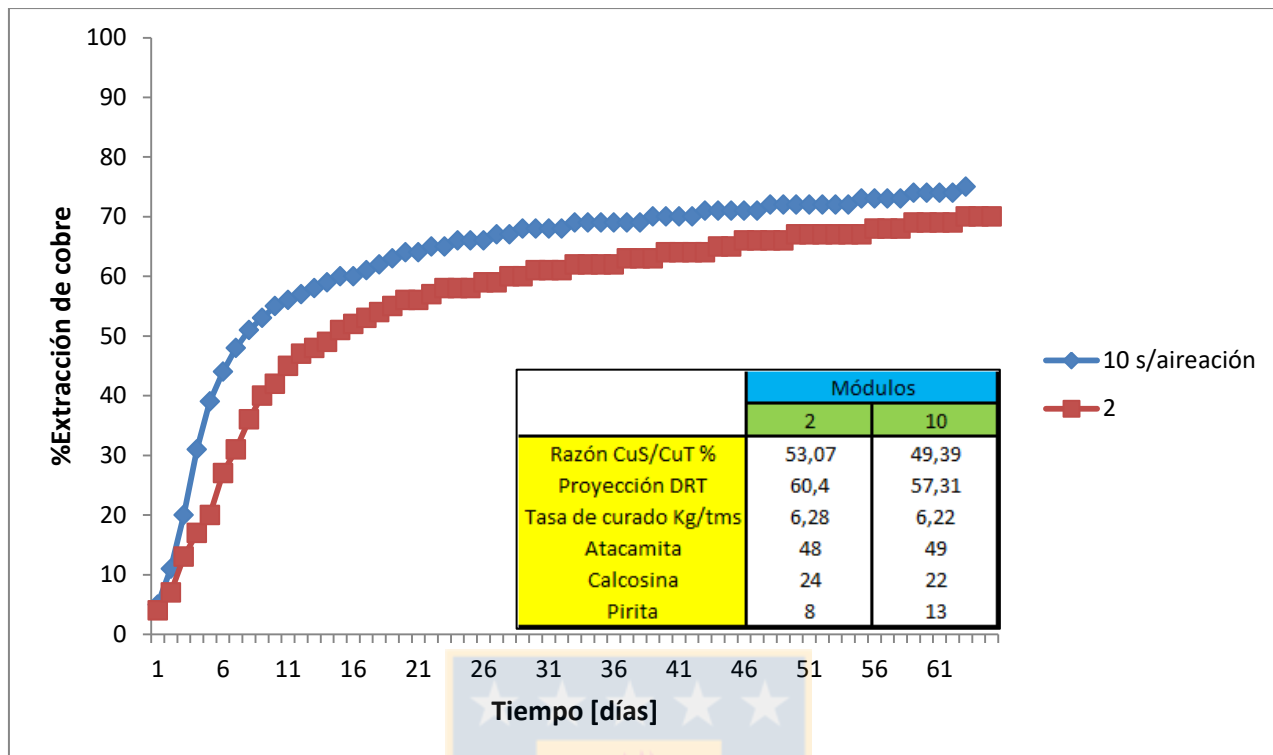


Figura 29. Cinética de extracción de cobre para semimódulos con y sin aireación, con alto contenido de sulfuros.

En la Figura 27, el semimódulo 1 con aireación forzada es el que tiene menos recuperación de cobre, llegando al 57,1%, por lo que se puede concluir que es debido a su baja razón de solubilidad (52,7%) y por otro lado, a su baja tasa de curado, la cual es notoriamente menor respecto a los demás semimódulos. Ahora, para los casos de los semimódulos 7 y 9, con aireación y sin aireación respectivamente, se evidencia que si bien tienen condiciones similares, tanto en su solubilidad como el curado, el semimódulo 7 con aireación forzada, tiene una recuperación mayor en un 3,1% que el semimódulo sin aireación, lo que avalaría el buen efecto que tiene la aireación forzada para minerales mixtos, bajo condiciones similares de lixiviación y mineralogía misma.

En la Figura 28, el semimódulo 6 tuvo un bajo rendimiento, alcanzando una recuperación de cobre del 48%, debido a que tuvo problemas en su permeabilidad, creándose una capa freática en el lecho, provocando un derrumbe y por lo mismo una mala medición en sus resultados. Por otro lado, se observa que la cinética de extracción del semimódulo con aireación forzada 3 es mayor al semimódulo 11 sin aireación. La extracción máxima del semimódulo 3 es 80% y la del semimódulo 11 es de 73%. Esta diferencia se pudo deber, por un lado, al 3% de mayor razón de solubilidad que tiene el módulo 3 y por otro a la aireación forzada que tenía el semimodulo, ya que no se evidencia otra variable que pudo haber generado ese resultado.

Para el caso de la Figura 29, si bien las condiciones de ambos semimódulos fueron prácticamente similares, y la extracción de ambos semimódulos fue mayor a la proyectada por DRT, se ve que el semimódulo 10 sin aireación tuvo una extracción 4,2% mayor al semimódulo 2 con aireación forzada. Del cuadro resumen ubicado en la figura se ve que el semimódulo 10 tiene más pirita que el semimódulo 2, lo que pudo haber ayudado en la extracción de cobre, ya que de acuerdo a los estudios, la pirita puede ayudar en un mínimo grado en generación de iones férricos el cual es el agente oxidante necesario para lixiviar minerales mixtos, y esta generación se basa en la difusión molecular de O₂ entregada por la aireación natural sobre el semimódulo. Para el semimódulo 2 con aireación forzada su recuperación de cobre llegó al 70,8% y la proyección obtenida por DRT es prácticamente 10% menor, quiere decir que algo positivo tuvo que ver la aireación en los resultados, pero no así en la comparación con el semimódulo sin aireación y similares características.

5.5 Modelos

5.5.1 Modelo operacional y dimensionamiento

De modo de determinar la necesidad de oxígeno al interior de las pilas, se reunieron las mineralogías de los minerales apilados en DRT durante el proyecto. Los cálculos se realizaron en base a Tabla 7.

Tabla 6. Promedio cuantitativo de mineralogías en DRT en el periodo Junio-Noviembre de 2017.

Promedio mineralogías mixtas DRT Junio-Noviembre									
	%ATA	%CRI	%ARC	%CW	%CS	%COV	%CPY	%BOR	%PY
Porcentaje	53,25	2,25	14,28	3,13	19,53	0,78	0,37	0,16	6,25

Mediante estos datos, los consumos estequiométricos de oxígeno calculados para la total oxidación de especies calcosina, covelina, pirita y limonitas, fue de 6.3 Kg O₂/t mineral.

Considerando una densidad aparente de 1.6t/m³, pila de 9m de altura, 60 días del ciclo de aireación, y efectuando las correcciones para las condiciones de operación en DRT (0.6 atm y 17°C), se obtiene que la tasa de aireación requerida para esta mineralogía en pilas primarias es de:

$$0.21\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$$

Se hace necesario hacer presente que en base a la tasa de aireación entregada anteriormente se determinó el caudal a trabajar por parte del soplador. Este caudal, necesario para airear 3 semimódulos continuos (150m), con un ancho de 384m de la pila, resulta ser de 10500 m³/h, con una presión del soplador de 200mbar.

El dimensionamiento del sistema de aireación a instalar en pilas primaras requiere la definición de dos variables básicas.

- Tasa de aireación a aplicar, cuya determinación está asociada a los minerales a lixiviar.
- Presión a la salida del soplador, determinada por la permeabilidad gaseosa del mineral apilado de modo que pueda garantizar la circulación de aire inyectado a través de la pila.

Se considera que se mantendrá la condición actual de inyectar aire a 3 semimódulos (384m x 150m) simultáneamente con un soplador.

Para mejorar la permeabilidad se utiliza una separación de 3m entre tuberías corrugadas generando un aumento de 96 a 128 tuberías corrugadas con un caudal de 93,7m³/h por tubería. Este último dato hace viable el aumento de la presión del soplador de 100mbar a 200mbar para la correcta y uniforme distribución de aire distribuido por las tuberías corrugadas.

Es por esto que la aplicación de la tasa de **0.21m³/h/m²**, implica el uso de sopladores de potencia aproximada de 120hp, una manga de 600mm de diámetro y disminuir la separación de 4m a 3m entre las tuberías corrugadas de 63mm. Todo lo anterior dentro de lo esperable para el proyecto de airear la totalidad del mineral apilado y mejorar las condiciones de permeabilidad y percolabilidad de la pila.

La operación del sistema de aireación se debe utilizar apenas se termine de apilar el último semimódulo de los 3 a airear, por un periodo de 60 días o el ciclo total de lixiviación del semimódulo.

5.5.2 Modelo matemático

De manera análoga se determinó un modelo matemático predictivo para la recuperación de cobre a partir de la mineralogía mixta entregada por DRT entre los meses de Junio y Noviembre. Además se incluyeron los semimódulos en estudio como forma referencial para evaluar todas las variables influyentes en el modelo.

El modelo se generó sobre una regresión lineal múltiple, basado en el método de los mínimos cuadrados. Los análisis de regresión permiten obtener empíricamente relaciones entre un grupo de variables a partir de un conjunto de datos. Esta regresión corresponde simplemente a una ecuación que une todas las variables, conocida como correlación. La determinación de los parámetros a calcular del modelo se basa en la premisa de que el error de estimación sea mínimo, por eso se utiliza el método de los mínimos cuadrados.

Este modelo se generó mediante una herramienta de Microsoft Excel, al cual se les derivan todos las correlaciones respectivas y de esta forma entrega los coeficientes del modelo, los cuales deben tener una correlación óptima para que el error sea mínimo del modelo mismo.

El modelo generado es,

$$\begin{aligned} \mathbf{Rec} = & \mathbf{57,31} + \mathbf{0,0009} \cdot \mathbf{ton} - \mathbf{0,121} \cdot \mathbf{Cuf} + \mathbf{1,373} \mathbf{Razón} \frac{\mathbf{Cusol}}{\mathbf{CuT}} - \mathbf{2,592} \cdot \mathbf{\%ATA} \\ & - \mathbf{1,831} \cdot \mathbf{\%CS} + \mathbf{0,697} \cdot \mathbf{días aireación} \end{aligned}$$

Este modelo tiene un error del 8% en términos matemáticos, y su R^2 es de 0.94, determinando así que el modelo es óptimo para predecir la recuperación de cobre para semimódulos con aireación en DRT.

5.5.3 Comparación de recuperación de cobre para semimódulos con aireación forzada

A continuación, Tabla 8, se muestran las recuperaciones de cobre entregadas por el modelo, éstos basados en los parámetros y resultados de los semimódulos con aireación forzada en estudio. En base a los siguientes resultados se hace una comparación de cada semimódulo entre los datos reales (extracción real), la razón de solubilidad, el modelo de proyección entregado por DRT y el modelo matemático calculado anteriormente.

Tabla 7. Comparación resultados reales v/s modelo.

Con aireación forzada								
Semimódulos	1	2	3	4	5	6	7	8
Real	56,74	69,84	80,04	71,31	83,08	48,62	67,52	67,34
Razón CuS/CuT%	52,68	53,07	58,16	64,23	65,39	52,56	61,96	70,22
Proyección Ext %	60,60	60,45	63,06	68,2	68,93	60,53	65,06	69,79
Modelo	57,34	70,43	78,99	69,39	84,3	48,69	67,02	68,28
Error	1,057	0,845	1,312	2,692	1,468	0,144	0,741	1,396

Estos resultados muestran que, el modelo entregado se ajusta a los resultados reales obtenidos en los semimódulos con aireación forzada, con un error máximo de 3%. Esto indicaría que el modelo puede ser utilizado como una estimación válida para la recuperación de cobre en los semimódulos que tienen aireación forzada.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

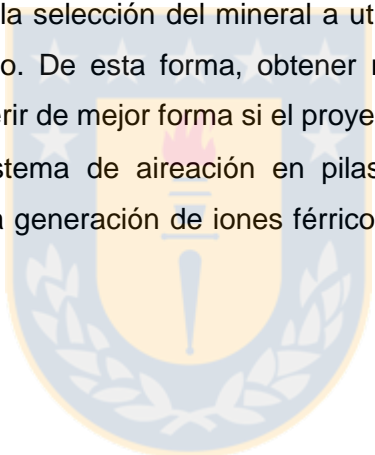
- La jarosita y goethita, presentes en la mineralogía de DRT son una fuente importante en la generación de Fe en solución, como también lo es un aporte importante de Fe³⁺.
- Los resultados obtenidos en los semimódulos no son concluyentes respecto de la concentración de férrico, pues, aún cuando se observó un efecto positivo de la aireación en algunos semimódulos, estos efectos son los mínimos respecto a lo que muestra la teoría.
- En la extracción de cobre, se encuentran pocos resultados que demuestren un efecto positivo de la aireación, lo que hacen concluir que estos resultados no son congruentes respecto al real efecto de la aireación forzada. Si bien, algunos semimódulos con aireación tienen un efecto positivo, en gran parte se debe a su mayor solubilidad o mayor tasa de curado respecto a los demás semimódulos con aireación o los sin aireación.
- Entre los motivos que pudieron afectar en los resultados de este estudio, está la variabilidad en las características del mineral en los semimódulos utilizados para comparar resultados.
- Los resultados de los semimódulos muestran diferencias de hasta 10% entre la extracción experimental y la proyectada por el modelo de DRT.
- El modelo matemático generado mediante una regresión lineal múltiple basado en el método de mínimos cuadrados es,

$$Rec = 57,31 + 0,0009 \cdot ton - 0,121 \cdot Cuf + 1,373 Razón \frac{Cusol}{CuT} - 2.592 \cdot \%ATA - 1,831 \cdot \%CS + 0.697 \cdot días\ aireación$$

- El modelo propuesto para predecir la extracción de cobre en los semimódulos se ajusta bien a los resultados experimentales, llegando a un error máximo del 3%. Lo que concluiría que éste es válido para predecir la extracción de cobre bajo condiciones similares a las del presente estudio.

6.2 Recomendaciones

- Hacer un estudio de la permeabilidad y percolabilidad de los semimódulos con mineralogía mixta, y como se ve esto afectado por la aireación forzada.
- Mejorar el sistema de aireación entregado por DRT, de forma en que la aireación comience en cada semimódulo cuando inicie el riego, de esta forma mejorar el proceso y hacer un estudio de si su utilización es viable.
- Una forma de iniciar el aire apenas inicie el riego para los 3 semimódulos con aireación es instalar válvulas de control de entrada de aire en cada semimódulo, disminuyendo a un tercio el flujo inyectado a cada semimódulo.
- Coordinarse con el área de minas para obtener de antemano la mineralogía de cada semimódulo, de esta forma obtener la predicción de extracción de cobre por parte de los semimódulos con aire gracias al modelo anteriormente entregado.
- Mejorar el protocolo para la selección del mineral a utilizar en los semimódulos que serán parte del siguiente estudio. De esta forma, obtener resultados congruentes y de mayor cantidad que permitan inferir de mejor forma si el proyecto es viable o no.
- Hacer un estudio del sistema de aireación en pilas primarias agregando bacterias al proceso, de esta forma, la generación de iones férricos sería mejor distribuida y mejoraría la eficiencia del proceso.



Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ruiz, M.C., 2011. "Hidrometalurgia", Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción.
- [2] Software HSC Chemistry 5.1, Outokumpu Technology Engineering Research.
- [3] Domic. E. "Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones"2001
- [4] Comunicación y planificación interna. Superintendencia LX-SX-EW, División Radomiro Tomic, CODELCO.
- [5] Biohydro, 2017. Diagnóstico de la Situación Actual y Definición de Opciones de Mejoramiento de las Operaciones Hidrometalúrgicas de DRT.
- [6] SULLIVAN, J.D. Chemistry of leaching chalcocite, Washington. D.C., U.S. Bureau of Mines, TP-473, 1930.
- [7] MULAK, W. Kinetics of cuprous sulphide dissolution in acid solutions of ferric sulphate. *Roehn. Chem.*, col43. 1969.
- [8] DUTRIZAC, J.E., AND MaCDONALD, R.J.C. Kinetics of dissolution of covellite in acidified ferric sulphate solution. *Can. Metall. Q.*, (In press.1974)
- [9] Lizama, H.M., Copper Bioleaching behavior in aerated heap, *Int. J. miner. Process.* 62 (2001) 257-269, Elsevier Science B.V.
- [10] Salgado Cortes D. A., 2002. Oxidación de ion ferroso en soluciones de lixiviación, CODELCO Chile – División Radomiro Tomic. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- [11] Troncoso Gálvez J. A., 2010 "Efecto del férrico y del cloruro en la lixiviación de mineral mixto de cobre de DRT". Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.

ANEXOS

Anexo 1 “INSTALACIÓN CONJUNTO DE AIREACIÓN”

Personal a Cargo

División Radomiro Tomic (D.R.T.)

- Ingeniero Producción
- Operador Mayor
- Operador del Área

SGS

- 1 Supervisor
- 1 Capataz
- 6 a 15 Operadores
- Prevencionista de Riesgos
- Operador Bulldozer

Steel

- Ayudante Rigger
- Operador Camión Pluma



Antes de Iniciar las actividades

El Supervisor de SGS coordinará con personal de RT el día y el semi-módulo en cual se van a desarrollar los trabajos. Una vez que se tenga conocimiento del día exacto de los trabajos, el supervisor de turno coordinará con varios días de anticipación los equipos móviles a utilizar: camioneta, equipo de apoyo y camión pluma, para traslado de materiales que se utilizarán en la actividad (Mangas de aireación, drenaflex, cintas de sellado, etc.) y además coordinará con personal del área el retiro del apilador de al menos 20m del talud a intervenir, siempre y cuando no exista interacción con equipos de mantención, de lo contrario el retiro del puente apilador debe ser a una distancia mínima de 30m.

El personal SGS deberá retirar los EPP, materiales y herramientas desde bodega, y luego asistir a la charla de 5min realizada por el Supervisor, APR y capataz de turno en instalaciones de faena.

Retiro y Posicionamiento de Materiales

Al iniciar las maniobras de izaje, el personal involucrado en la actividad deberá verificar que se disponga de todos los materiales y equipos que se utilizarán en los trabajos, para su posterior traslado al semi-módulo previo análisis de las condiciones del terreno y ambientales

en el punto de trabajo (semi-módulo asignado). Las maniobras de izaje se realizarán con previa delimitación del área, la maniobra de izaje será dirigida por el Ayudante Rigger del camión pluma, utilizando el lenguaje de señales previamente establecidas y conocidas por el operador del equipo. Además será el único autorizado para realizar y supervisar la estrobada y eslingada.

Procedimiento de instalación

Instalación de Mangas de Aireación

La manga de aireación, se encuentra distribuida en tramos de 25m, los cuales deberán ser subidos a corona de pila y distribuidos desde alimentación a canaleta o viceversa, dejando el tapón de la manga de aireación en el sector de inverso de contenedor (generador, soplador).

La manga será subida a corona de pila utilizando el equipo de apoyo, para esto el operador debe buscar el acceso (permitido) más cercano para subir y se posicionará a una distancia mínima de 3m del vértice del talud. El operador además deberá delimitar el área de seguridad con conos.

Para subir el material se deberá contar además con 2 operadores que se encontrarán ubicados uno en el vértice del talud y el otro al pie del mismo. Este último será el encargado de amarrar la manga con el cordel y verificar el afianzado correcto de los materiales para posteriormente alejarse del sector del amarre y mediante comunicación radial interna, el operador del equipo de apoyo procederá a subir el material a través del talud.

A diferencia de lo anterior, cuando la rotopala termina se retirará el ripio del último talud de una pila, la manga será ubicada a 3m del pie del talud del último semi módulo de la pila a trabajar. El operador deberá delimitar el área de seguridad con conos.

Una vez distribuida la manga de aireación se procederá a realizar el acoplamiento de la manga, para luego realizar la instalación del sistema de acople de las líneas de drenaflex a la manga de aireación, el cual consiste en la inserción de puchos a la manga de aireación a una distancia de 4m que irán acoplados a las líneas de drenaflex y asegurados con cinta adhesiva. Para el caso de un óptimo traslado del apilador, esta distancia será de 6m en cada una de las orugas del apilador para su posterior movimiento.

El tiempo que demora esta instalación es de 30min.

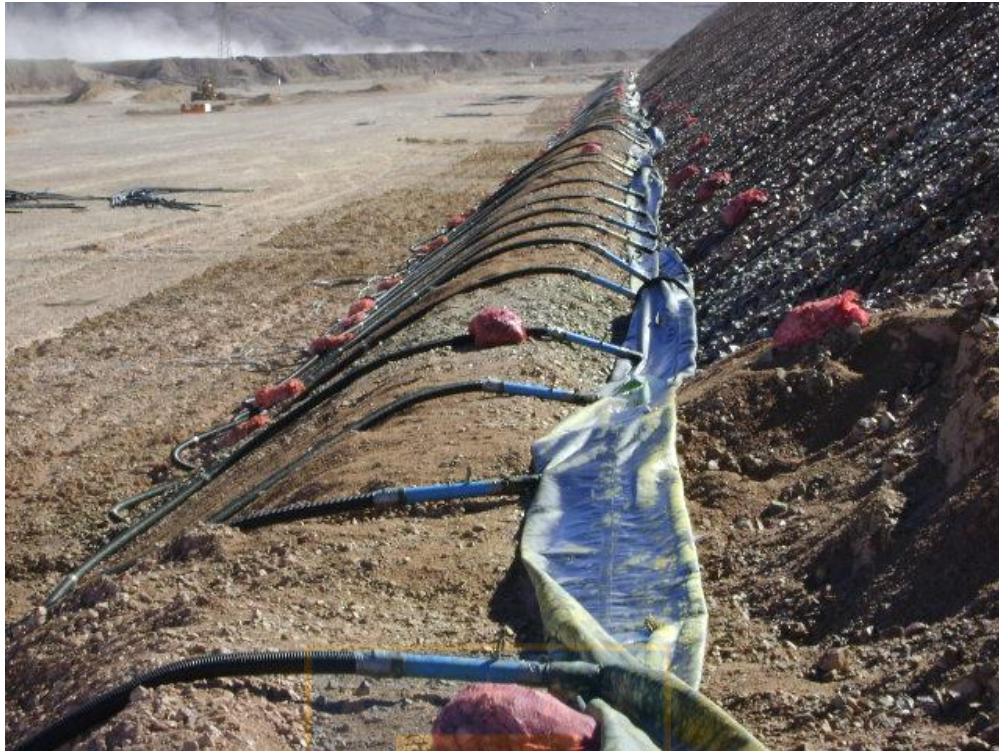


Figura 30. Manga de aireación instalada a los pies del talud de la pila.



Figura 31. Manga de aireación instalada a los pies del talud de la pila.

Instalación de Líneas de Drenaflex

El sistema de aireación consta de tres tramos de líneas corrugadas (drenaflex) de 60mm de diámetro, el primer tramo de 20m, segundo y tercero tramo con tapón miden de 75m. de largo respectivamente.

Instalación Primer Tramo

Se dará inicio a la tarea instalando el primer tramo del sistema de aireación a lo largo del semi-módulo, como muestra la figura.

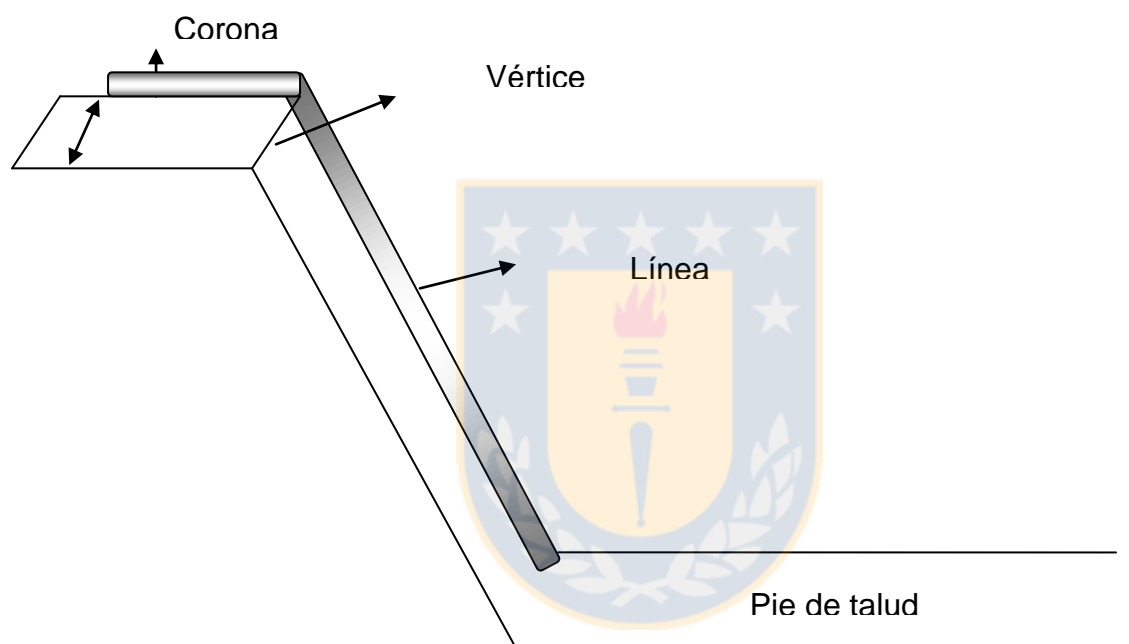


Figura 32. Ilustración instalación primer tramo drenaflex.

La primera línea de drenaflex va aproximadamente a 3m del vértice de talud de la pila y el resto de las líneas de aireación deberán quedar perfectamente alineadas y separadas por una distancia de 4m.

Una vez demarcada el área de trabajo se procederá a repartir los rollos de drenaflex en forma manual o con ayuda del equipo de apoyo. En forma paralela la excavadora de apoyo en la corona de la pila, deberá realizar la excavación en el vértice del talud donde irán posicionadas las líneas, por lo que los trabajadores deberán situarse fuera del radio de giro del equipo, esto es 10m de distancia. A continuación se procederá a subir las líneas a través del talud, para esto se deberá contar con 05 operadores en el pie del talud, quienes serán los encargados de amarrar con un cordel un extremo de la línea de aireación, que posteriormente subirá tirada en forma manual por 05 operadores que se encontrarán en la corona de la pila. Los extremos de las líneas en la corona de la pila deberán quedar a una distancia de 4 m del vértice del talud aproximadamente. Luego de estirar el primer tramo se deberá tapar con apoyo de la excavadora el tramo que se encuentra en la corona para

afianzar la línea en el extremo superior. Cada tramo de 20m llevará aproximadamente 3 a 5 sacos de mineral, esto con la finalidad de evitar que estas sean desplazadas de su posición original por el apilamiento de mineral.

Este tramo es ciego, por ende no consta de orificios para la inyección de aire.



Figura 33. 1° Tramo drenaflex instalado

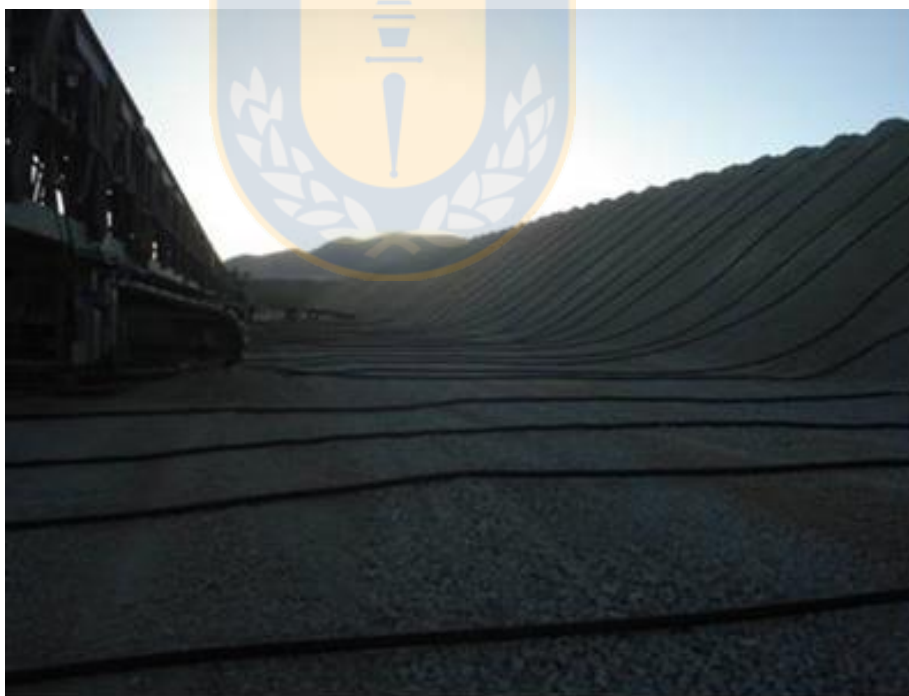


Figura 34. Continuación de instalación 2° Tramo drenaflex

El tiempo que demora esta instalación es de 1 1/2hrs.

Instalación Segundo y Tercer Tramo

Una vez instalado el primer tramo se deberá comenzar a repartir los rollos de drenaflex correspondientes al segundo tramo, para posteriormente comenzar a acoplarlos asegurándolos con cinta adhesiva 3M y extendiéndolos por debajo del apilador, siempre y cuando el capataz y/o supervisor haya realizado el chequeo y de la autorización (previa coordinación con líderes de mantención) para pasar bajo el puente apilador. Las líneas deberán asegurarse instalando sacos de mineral al inicio de la línea, es decir, en el acople de ambos tramos en el centro y al final de la línea. Cada tramo de 75m llevará aproximadamente 6 a 7 sacos de mineral, esto con la finalidad de evitar que estas sean desplazadas de su posición original por el apilamiento de mineral.

Para realizar esta tarea primero se deberá coordinar con los operadores de Codelco unBulldozer para que haga el ruteado en el área donde se estirarán las líneas de drenaflex.

La instalación del tercer tramo se deberá realizar de igual forma a lo descrito anteriormente.

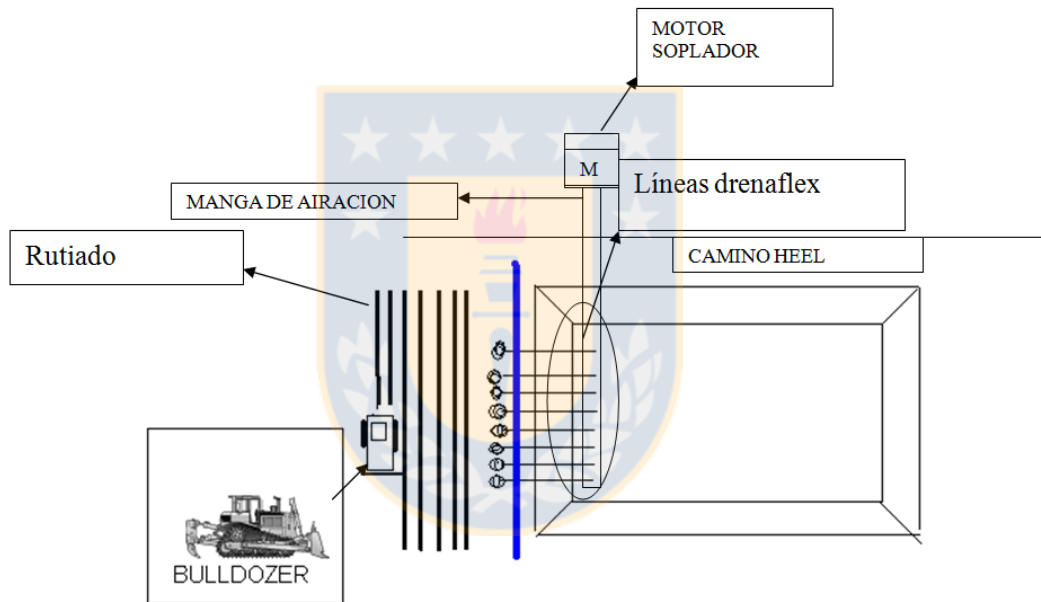


Figura 35. Ilustración de ubicación de sistema de aireación tanto en manga, motor, drenaflex, entre otros.

Cuando este todo acoplado, se procederá a acoplar la manga de aireación con el contenedor (generador, soplador), el que puede estar posicionado tanto en la alimentación como en la canaleta de la pila. Ambos tramos constan de una separación de 2m por cada orificio.



Figura 36. Vista final de Mangas y drenaflex instalada sobre Pila, con la respectiva malla de riego por goteo.

Problemas Comunes de los conjuntos de aireación

La experiencia en terreno por parte del personal de RT, ha permitido detectar los siguientes problemas frecuentes. Y para cada uno de ellos se aplicó una solución que resuelva los casos.

- a) Se evidencia una distribución desuniforme del flujo en las tuberías, drenaflex. Al tener los orificios del mismo tamaño y una misma tasa de aire, se genera un flujo excesivo cerca del comienzo de la tubería y un flujo insuficiente al final de la misma, consiguiendo una disminución en la presión de aire.

Solución: Para mejorar la baja uniformidad debido al diseño de los orificios del mismo tamaño. Biohydro diseño tuberías de distribución neumáticamente compensadas con orificios de diámetro creciente a lo largo de la tubería. El aumento de área de la perforación compensa la reducción en presión, con lo que se consigue un flujo uniforme, generando una aireación uniforme y con ello una mejora en la recuperación de cobre.

- b) La tasa de aire disminuye con respecto al paso del tiempo debido al taponamiento de los orificios de las tuberías de aireación.



Figura 37. Taponamientos líneas drenaflex.

Solución: Para evitar el taponamiento de los orificios, Biohydro desarrolló una Banda Anti-Taponamiento®. Estas bandas cubren el sector perforado generando una cámara de distribución de aire que evita la obstrucción de los orificios asegurando la disponibilidad de aire durante la totalidad del ciclo de lixiviación. Dentro de sus características principales están, perforaciones en forma de tobera, termofusionadas, resistentes al arrastre.

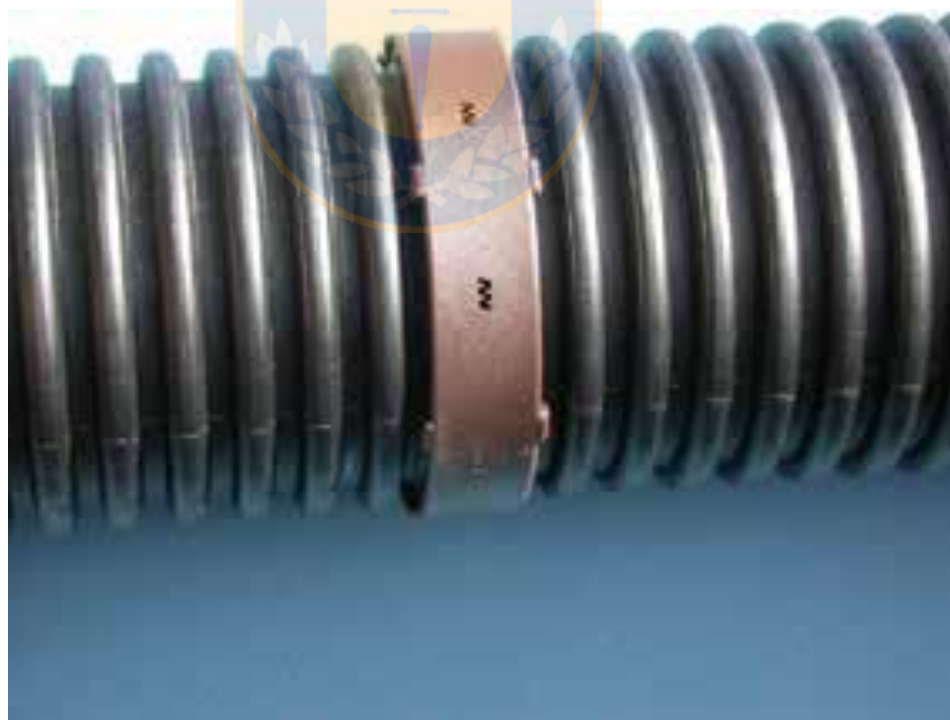


Figura 38. Banda Anti-Taponamiento® Biohydro.

Anexo 2

SISTEMA DE AIREACIÓN

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE AIREACIÓN

Se establecen 7 etapas para asegurar que el proceso de proyecto de obra civil dé como producto **“Servicio de suministro de aire en pilas de Lixiviación D.R.T. “**.

Para suministrar el oxígeno requerido por el proceso se utilizan sistemas de aireación forzada (Kit de aireación) ubicados en la base del lecho y por sobre la zona de saturación. Esta configuración será replicada en su máxima extensión en ambas pilas, llegando a un peak de 8 conjuntos de aireación en servicio abarcando un largo de 150m c/u correspondiente a 3 semi-módulos. Lo que genera un total de 24 semi-módulos de lixiviación con sistema de aireación forzada.

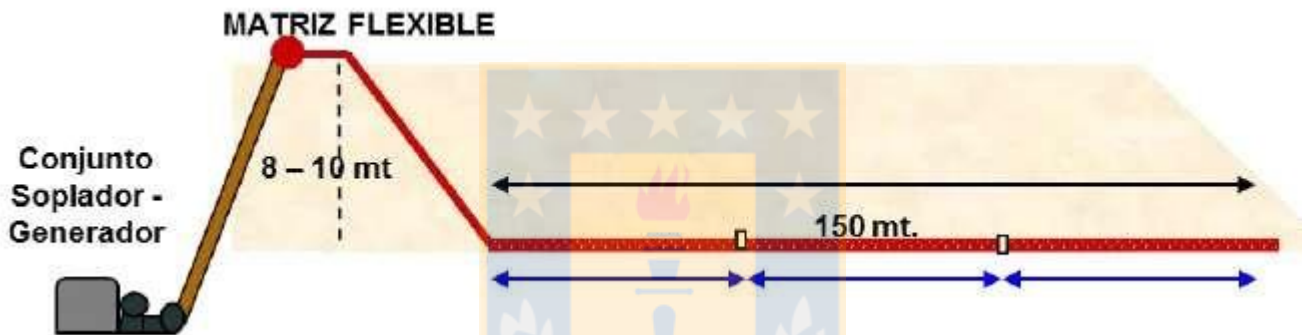


Figura 39. Dimensión del sistema de aireación que abarca 3 semimódulos continuos. Fuente: Elaboración propia.

El conjunto soplador-generador (Kit) se instala en el costado del semi-módulo asignado, en sector de canaleta para la Pila 1 y en sector alimentación para el caso de la Pila 2. En su salida se instala una manga matriz flexible, la cual sube por el talud hasta la corona, extendiéndose hasta el borde del talud opuesto alimentando a la malla de aireación confeccionada tuberías corrugadas (drenaflex).

Los sopladores deben ser conectados a grupos generadores de energía, los cuales operan de forma continua por 45 días. El par soplador generador se debe ubicar a un costado de la pila, ya sea en alimentación (Pila 2) o Canaleta (Pila 1), para desde ahí ser conectado a la manga de alimentación de aire que sube a corona y que alimenta al sistema de distribución de aire al interior de la pila.

La operación considera un VDF (variador de frecuencia) para iniciar las partidas.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

Se estima la instalación de un kit por semana, con un total de a los más de 8 sistemas operando de manera conjunta. Se debe contar con kit de respaldo ya sea por falla y/o por salida de un kit por cumplimiento de ciclo. Se estima que se debe contar con un mínimo de 3 kits de respaldo.

Las características actuales de operación del sistema y por consiguiente integrado en cada Kit consiste en:

Soplador Centrífugo.

- Caudal: 7.500 m³/h hasta 12.000m³/h.
- Presión estática: 100 mbar hasta 250mbar.

Generador

- Voltaje: 400/230v
- Frecuencia: 50Hz
- Potencia Máxima: 275/176 (kva/kw)
- Potencia Continua: 200/150 (kva/kw)
- Grupo Electrónico tipo cerrado.
- Diseño: Cabina anti ruido y con sellado especial para evitar daños en el exterior e interior del equipo producto del ácido.
- Certificación: La cabina debe venir con la certificación y pruebas de hermeticidad.

Motor Diésel y Accesorios.

- La base del filtro de aire debe contar con un filtro primario y secundario para evitar que penetre el ácido hacia la admisión del motor diésel.
- Los filtros de combustible deben venir con separador de agua.
- El sistema electrónico del motor diésel debe venir con sensor de nivel de combustible para la detención del equipo cuando quede a ¼ de nivel de combustible así evitaremos daños en la bomba de petróleo y cebar o purgar el sistema de combustible del equipo.
- El estanque de combustible debe tener la boquilla de llenado en la parte exterior del generador y NO en el interior del equipo, así evitaremos los derrames en el interior por el abastecimiento del petróleo.
- El grupo generador debe tener una pintura en su estructura que sea anti ácido.
- El generador tiene un volumen de estanque diesel de 500L al cual se le incluye un estanque extra de 1000L.

Tablero eléctrico y Sistema de monitoreo

- VDF incorporado
- Botonera On/Off
- Parada de emergencia
- Sistema alarma/baliza: Fallas mecánicas, falta combustible
- Sensor de temperatura, caudal y presión de aire generado.
- Horómetro

El conjunto de todos estos componentes conforma el denominado Kit de aireación. El peso total del kit y la plataforma debe ser diseñado de forma tal que pueda ser levantado por una grúa de 10ton.

ETAPAS DEL PROCESO

Suministro de equipos de Aireación (Sopladores – Ventiladores) y de generación eléctrica (Generador).

Los equipos a disponer acorde a las bases técnicas serán abastecidos por la empresa que cumpla con los requisitos establecidos en las bases. Una vez recibidos, el equipo de mantenimiento de FADE realizará la instalación en el denominado Kit. Cada equipo de aireación está considerado con una capacidad de 7500 m³ de salida a 3.000 msnm y cada equipo de generación eléctrica tiene una capacidad de 275 Kva de salida. Una vez montados y cuando corresponda cada mantención (después de 45 días) cada equipo será revisado, buscando fallas, abolladuras, desgastes y pérdidas de aislación, los cuales serán reparados o cambiados (componentes) cuando corresponda o así lo requiera el equipo, tales como cambio de aceite, filtro de aceite, filtro de aire, filtro de combustible, pintura antiácida, etc.

Suministro de sistema de monitoreo on-line

El monitoreo en línea adquiere relevancia al ser la herramienta que entrega la información de la cantidad de horas en funcionamiento (horómetro) como de la cantidad de aire suministrado (caudal). Esta información deberá ser verificada con el control de la operación de lixiviación.

Este componente será abastecido por la empresa que cumpla con los requisitos establecidos en las bases técnicas, donde en cada kit serán instalados los mecanismos de monitoreo y transmisión de las señales recogidas en los sopladores y generadores.

En cada kit Soplador-Generador se instalará un nodo de comunicación de RF, de banda libre, que incorporará todas las señales locales, siendo éstas, las electromecánicas, temperaturas de descansos, flujo, presión de aire, entre otras.

Cada nodo se comunica con un módulo de comunicación central que toma la información, la guarda en una base de datos y la deja disponible para proceso remoto.

En resumen, el alcance es el siguiente: Toma de datos de Generador-Soplador. Transmisión de datos hacia módulo de comunicación central. Guardado de datos en base de datos.

Freq. y Tension Nominales	
Datos de Motor (1/2)	
Hrs Motor	622.80 hrs
Temp Refrig.	74 °C
Velocidad Mtr	1500 rpm
Bateria Tensi	13.35 Vdc
Gov DC %	97.29 %

Figura 40. Tablero control del kit de aireación

Tableros eléctricos con VDF incorporados.

Los variadores de frecuencia serán incorporados en el acoplamiento eléctrico (Tablero de control y partida), serán abastecidos con la compra de los equipos sopladores, acorde a las necesidades de los motores eléctricos del diseño.

Estos dispositivos entregan el voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto, toma la alimentación eléctrica del generador, que pasa por el tablero de control, que disponen de voltaje y frecuencia fija, la transforma en un voltaje continuo (Rectificador más filtro) y luego lo transforma en voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio del inversor. Con lo cual se consigue una partida y detención de los motores eléctricos en forma más suave, alargando la vida de estos.

Plataforma de instalación y transporte de equipos

La plataforma para conformar el Kit, es confeccionado por FADE, utilizando un contenedor de 20 pies, adecuado a las necesidades del equipamiento, esto es, destaje de las paredes laterales para maniobras de instalación y mantenimiento, instalación de un estanque de combustible de 2 m³ de capacidad, una bandeja de retención de derrames de combustible.

El traslado del Kit se realizará mediante camión pluma, aprovechando los accesorios del contenedor Dry, se aprovechara la estructura del mismo contenedor para maniobra con camión pluma y levante con grúa horquilla de capacidad de 10ton para su posterior descarga al patio de estacionamiento de kit o en las pilas de lixiviación. Previo a su instalación en las pilas, debe haber una coordinación con D.R.T. y la empresa SGS por la instalación de los conjuntos de aireación, ya que una vez estén estos instalados se pueden llevar los kit a su posición respectiva. Cada kit contará con una numeración de identificación y estará pintado con pintura epóxica de alta

resistencia a ambientes ácidos, en sus paredes laterales y contará con una membrana corrediza de Aislamiento térmico con Polietileno expandido.

Servicio de mantenimiento de equipos, insumos y repuestos

El servicio de mantenimiento general se realizará en las instalaciones de FADE en Calama, donde acorde a las bases técnicas, cada 45 días, se hará recambio de un equipo para mantenimiento y cambio de componentes acorde a plan o tempario de cada componente.

Transporte de equipos hacia faena y regreso a talleres.

Esta actividad considera el transporte de los equipos nuevos en su etapa inicial, y reparados durante la operación, desde su lugar de origen. El traslado de cada Kit se hará mediante uso de camión pluma dispuesto para el contrato por FADE, con el objetivo de ser llevados tal cual a terreno, conectar al sistema de alimentación matriz de aire y poner en funcionamiento.



Figura 41. Imagen sistema de transporte kit aireación.

Servicio técnico especializado para la puesta en marcha de cada equipo.

Todos los equipos cuentan con asistencia técnica especializada en la ciudad de Calama, por lo cual este servicio forma parte de las relaciones con cada proveedor, lo que se hará en las instalaciones de FADE una vez confeccionado cada Kit.

Todos los servicios de asistencia técnica especializada se realizarán en las instalaciones FADE dada la naturaleza del servicio solicitado por D.R.T.

Anexo 3 “Distribución Semimódulos División Radomiro Tomic”

Como bien se señaló en la sección 4.4 del presente estudio, se realizó un cambio en la nomenclatura original de los semimódulos de las pilas primarias. Si bien la distribución es similar, su nomenclatura es distinta. Los semimódulos en DRT están numerados desde el 0B al 13B desde izquierda a derecha respectivamente para la Pila 1 y 14A al 27A, igualmente, de izquierda a derecha para la Pila 2, como se ilustra en la figura 42.

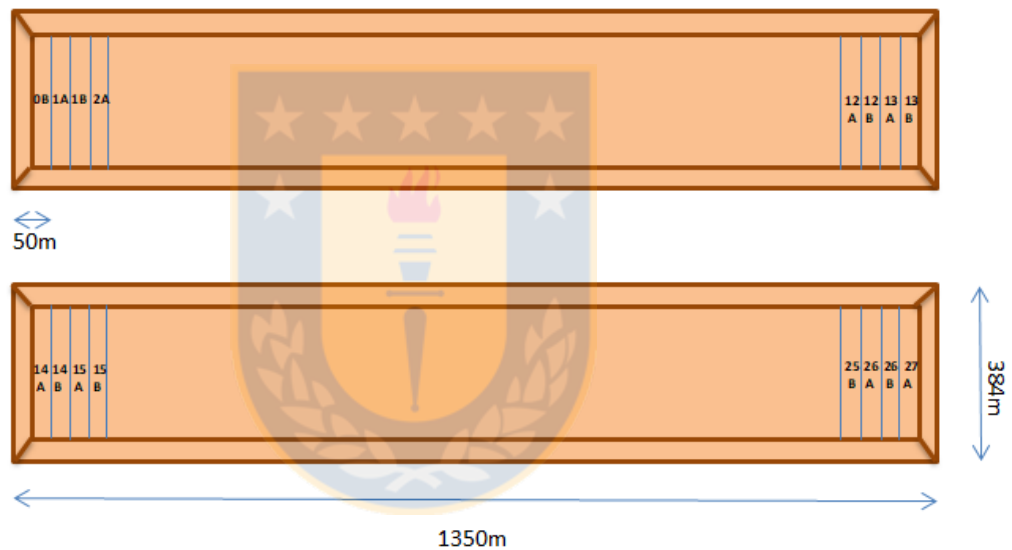


Figura 42. Distribución y numeración de semimódulos en pilas primarias en DRT. Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4 “Resultados modelo matemático mediante Microsoft Excel”

Los resultados entregados por la herramienta de Microsoft Excel se evidencian en Figura 43,

Resumen								
Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,995427475							
Coefficiente de determinación R ²	0,990875859							
R ² ajustado	0,936131011							
Error típico	2,849194599							
Observaciones	8							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados					
Regresión	6	881,599778	146,93329					
Residuos	0	8,11790986	8,1179					
Total	15	889,717688						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	57,30721001	35,6640926	1,606860174	0,35439237	-395,848052	510,462472	-395,848052	510,462472
Tonelaje (tmh)	0,00090014	0,00017586	5,118641509	0,12282575	-0,00133431	0,00313459	-0,00133431	0,00313459
Cobre fino (tmCuf)	-0,121050377	0,02133537	-5,673693528	0,11106483	-0,39214201	0,15004126	-0,39214201	0,15004126
Razón CuS/CuT%	1,373436063	0,42943682	3,198226167	0,19292301	-4,08307605	6,82994817	-4,08307605	6,82994817
%ATACAMITA	-2,591777058	0,74518918	-3,478012181	0,17823368	-12,0603034	6,87674928	-12,0603034	6,87674928
%Calcosina	-1,831304401	0,81662248	-2,242534883	0,26703596	-12,2074768	8,54486804	-12,2074768	8,54486804
Días de aireación	0,69799882	0,23733691	2,940961921	0,20865897	-2,31765257	3,71365021	-2,31765257	3,71365021

Figura 43. Copia de pantalla de resultados del modelo matemático por parte de Microsoft Excel.