

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante
Fernando Parada Luna
Ingeniero Supervisor
Jéssica Olate Gutiérrez

**EFFECTO DE LA AIREACIÓN EN PILAS DE BIOLIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE
BAJA LEY EN MINERA ESCONDIDA LIMITADA, GERENCIA DE PRODUCCIÓN
CÁTODOS.**

FELIPE EDUARDO MELLADO ALVARADO

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Abril 2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Metalúrgico
POR: Felipe Eduardo Mellado Alvarado
FECHA: 05/03/2019
PROFESOR GUÍA: Fernando Parada Luna

EFFECTO DE LA AIREACIÓN EN PILAS DE BIOLIXIVIACIÓN DE SÚLFUROS DE BAJA LEY EN MINERA ESCONDIDA LIMITADA, GERENCIA DE PRODUCCIÓN CÁTODOS

El alza constante de los costos de producción, las repentinas caídas en el precio del cobre y el continuo envejecimiento de los yacimientos ha impulsado a las empresas y a sus alianzas tecnológicas a desarrollar técnicas de procesamiento económicamente más beneficiosas. En este escenario BHP Minerals Americas, ejecutó en 2006 el proyecto EBP (Escondida Bioleach PAD) para hacer frente al procesamiento de minerales de baja ley mediante una técnica limpia y rentable.

El proceso de lixiviación de especies sulfuradas en medio férrico y en presencia de bacterias requiere de una alta disponibilidad de O_2 para maximizar la probabilidad de ocurrencia de las reacciones de lixiviación y asegurar la sobrevivencia de la población bacteriana. El proyecto implementa un sistema de distribución de aire forzado en la pila, donde mediante una red de cañerías y 8 sopladores se inyecta un flujo de $153,000 [Nm^3/h]$ de aire por cada franja. Se estima que los costos asociados al consumo energético de los sopladores y los gastos en mantenimiento mecánico de la red, representan entre el 60 y el 65% de los costos de la superintendencia de lixiviación de sulfuros.

Se estudia la necesidad de suplir aire al sistema, la eficiencia de la técnica y sus efectos en el proceso. Los resultados de estos análisis son algo contradictorios. Se demuestra un correcto ajuste del modelo predictivo de recuperación, lo que permite calcular el consumo estequiométrico de oxígeno donde se verifica que las franjas que más O_2 requieren son aquellas con mayor ley de pirita. Mediante el análisis de datos operacionales se determina el suministro real de aire y con ello la eficiencia del sistema de aireación donde se constata que es altamente variable y la aplicación de la técnica no se rige por una filosofía de operación. Las pruebas de campo verifican el ingreso de aire al lecho de la pila, aunque se evidencia una mala distribución de oxígeno a través del lecho. Respecto a la recuperación, esta demuestra estar directamente relacionada con la tasa de aireación y a pesar de que se verifica que la aireación acelera la cinética de extracción durante los primeros días del ciclo, no se comprueba en el largo plazo que la recuperación acumulada sea más favorable en franjas con aireación que en aquellas que no se airean.

**ABSTRACT OF THE SUBMITTED THESIS TO
OBTAIN THE DEGREE OF:** Metallurgical Engineer
BY: Felipe Eduardo Mellado Alvarado
DATE: March 05th, 2019
THESIS ADVISOR: Fernando Parada Luna

**EFFECT OF AERATION SISTEM ON BIOLEACHING LOW-LAYERED SULFURS
PADS IN MINERA ESCONDIDA LIMITADA, CATHODES PRODUCTION
MANAGEMENT**

The constant rise of production costs, the sudden falls in the price of copper and the constant aging of the deposits has encouraged companies and their technological alliances to develop newer profitable processing techniques. In this scenario, BHP Minerals Americas, during 2006 executed the EBP project (Escondida Bioleach PAD) to deal with the processing of low grade minerals through a clean and more economical technique.

The process of leaching sulfur species in ferric medium under presence of bacteria requires a high availability of O_2 to maximize the probability of occurrence of leaching reactions and ensure the survival of the bacterial population. The project implements a forced air distribution system in the heap, where a flow of $153,000[Nm^3/h]$ of air per heap-strip is injected through a network of pipes and 8 blowers. It is estimated that the costs associated with the energy consumption of the blowers and the mechanical maintenance costs of the network represent between 60 and 65% of the costs of the superintendence of sulphide leaching.

The need to supply air to the system, the efficiency of the technique and its effects on the process are studied. The results of these analyses are somewhat contradictory. A correct adjustment of the predictive recovery model is demonstrated, which allows to calculate the stoichiometric oxygen consumption where it is verified that the heap-strips that more O_2 require are those with higher pyrite law. Through the analysis of operational data, the actual air supply is determined and with it the efficiency of the aeration system where it is shown that it is highly variable and the application of the technique is not governed by an operation philosophy. The field tests verify the entry of air to the bed of the pile, although a poor distribution of oxygen through the bed is demonstrated. Regarding the recovery, this proves to be directly related to the aeration rate and although it is verified that the aeration accelerates the extraction kinetics during the first days of the cycle, it is not demonstrated that the accumulated recovery in the long term is more favorable in strips with aeration than in those that do not aerate.

Para Elena, quién es mi árbol de cuatro hojas

y para Mamá, por su infinita entrega

amor, esfuerzo y dedicación,



A Jessica

por ser la primera piedra

de mi proyecto profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| RESUMEN | II |
| ABSTRACT | III |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | X |
| NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES..... | XI |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. MOTIVACIÓN..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 2 |
| 1.2.1. OBJETIVOS GENERALES..... | 2 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 2 |
| 1.3. ALCANCES | 2 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1. MINERA ESCONDIDA LIMITADA..... | 3 |
| 2.2. LIXIVIACIÓN | 4 |
| 2.2.1. MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN..... | 4 |
| 2.2.2. LIXIVIACIÓN EN PILAS..... | 6 |
| 2.3. LIXIVIACIÓN DE MINERALES SULFURADOS..... | 7 |
| 2.3.1. LIXIVIACIÓN BACTERIANA..... | 7 |
| 2.3.2. BACTERIAS EN HIDROMETALURGIA [5]..... | 9 |
| 2.4. PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE SULFUROS EN MINERA ESCONDIDA | 10 |
| 2.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA COLONIA BACTERIANA | 12 |
| 2.4.2. MINERALOGÍA Y REACCIONES DE LIXIVIACIÓN | 13 |
| 2.4.3. RED DE AIREACIÓN..... | 17 |
| 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL | 18 |
| 3.1. ESTIMACIÓN DE CONSUMO ESTEQUIOMÉTRICO DE OXÍGENO | 18 |
| 3.1.1. METODOLOGÍA | 18 |
| 3.2. ANÁLISIS DEL SUMINISTRO REAL DE OXÍGENO | 19 |
| 3.3. CONCENTRACIÓN DE O ₂ Y PERFÍL DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE LA FRANJA..... | 19 |
| 3.3.1. EQUIPAMIENTO | 19 |
| 3.3.2. MINERALES Y REACTIVOS | 20 |
| 3.3.3. METODOLOGÍA..... | 21 |
| 3.3.3.1. CASO 1.- SIN AIREACIÓN..... | 21 |
| 3.3.3.2. CASO 2.- AIREACIÓN ARTIFICIAL..... | 21 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.3.4. | PROGRAMA DE PRUEBAS | 22 |
| 3.4. | EFFECTO DE LA AIREACIÓN INTERMEDIA EN FRANJAS DE 72 METROS | 23 |
| 3.4.1. | METODOLOGÍA | 23 |
| 3.5. | EFFECTO DE LA AIREACIÓN BASAL EN FRANJAS DE 10 METROS | 23 |
| 3.5.1. | METODOLOGÍA | 23 |
| 4. | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 24 |
| 4.1. | ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ESTEQUIOMÉTRICO DE OXÍGENO | 24 |
| 4.2. | ANÁLISIS DEL SUMINISTRO REAL DE AIRE | 29 |
| 4.3. | CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y PERFÍL DE TEMPERATURA | 36 |
| 4.3.1. | CONCENTRACIÓN DE O ₂ Y PERFÍL DE TEMPERATURA, FRANJAS SIN AIREACIÓN | 36 |
| 4.3.2. | CONCENTRACIÓN DE O ₂ Y PERFÍL DE TEMPERATURA, FRANJAS CON AIREACIÓN | 38 |
| 4.4. | EFFECTO DE LA AIREACION INTERMEDIA EN FRANJAS DE 72 METROS | 43 |
| 4.5. | EFFECTO DE LA AIREACIÓN BASAL EN FRANJAS DE 18 METROS | 50 |
| 5. | CONCLUSIONES | 54 |
| 6.- | REFERENCIAS | 56 |
| ANEXOS | | 58 |
| A. | DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS | 58 |
| A.1. | Proceso de concentración | 58 |
| A.2. | Sistema de aireación | 61 |
| A.3. | Equipos de aireación | 63 |
| B. | CONDICIONES DE OPERACIÓN. PILA DE BIOLIXIVIACIÓN | 64 |
| B.1. | Condiciones generales del sitio | 64 |
| B.2. | Datos generales del proyecto Sulphyde Leach | 64 |
| B.3. | Ciclo de tiempo de la biolixiviación | 65 |
| B.4. | Características del mineral apilado | 65 |
| B.5. | Construcción de la pila | 65 |
| B.6. | Características del riego y operación | 66 |
| B.7. | Características de la solución de riego (refino) | 66 |
| B.8. | Características de la solución de PLS | 66 |
| B.9. | Aireación | 67 |
| B.10. | Pérdidas de solución en la pila | 67 |
| C. | ESQUEMAS Y DIAGRAMAS | 68 |
| C.1. | Pila de biolixiviación | 68 |
| C.2. | Red de aireación | 69 |
| D. | TABLAS | 73 |
| D.1. | Clasificación de las bacterias según su modo de nutrirse | 73 |
| D.2. | Clasificación de las bacterias según su forma de respirar | 73 |

| | |
|--|----|
| D.3. Clasificación de las bacterias según el rango de pH donde se desarrollan | 73 |
| D.4. Clasificación de las bacterias según su rango de temperatura óptimo | 73 |
| D.5. Población microbiológica (caracterización bacterial) | 74 |
| D.6. Mineralogía | 76 |
| D.7. Eficiencia del sistema de aireación. | 79 |
| E. FIGURAS | 81 |
| E.1. Ciclo de vida de una colonia bacterial | 81 |
| E.2. Esquema del mecanismo de acción de una bacteria. | 82 |
| E.3. Mineralogía | 83 |
| E.4. Ajuste de la recuperación real al modelo predictivo para franjas de 2 y 3 pisos. | 85 |
| E.5. Correlación del error del modelo predictivo y el CuT contenido. | 86 |
| E.6. Distribución mineralógica de especies sulfuradas en [t] para franjas de 2 y 3 pisos. | 87 |
| E.7. Distribución mineralógica de especies sulfuradas en [%] para franjas de 1, 2 y 3 pisos..... | 88 |



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Figura 1.- Evolución de la ley de corte de concentradoras..... | 3 |
| Figura 2.- Procesos unitarios asociados a la aplicación de los principales métodos de lixiviación | 4 |
| Figura 3.- Diagrama de flujos para lixiviación en pilas (Elaboración propia). | 6 |
| Figura 4.- Tratamiento de lixiviación de sulfuros y tipo de producto final para el azufre contenido | 7 |
| Figura 5.- Gráfico de extracción de cobre real y modelada [t]. CuT por franja y error relativo | 24 |
| Figura 6.- Gráfico de CuT [%] y error relativo [%] de modelo predictivo..... | 25 |
| Figura 7.- Masa de especie mineralógica por franja totalmente apilada de 1 piso. | 26 |
| Figura 8.- Modelo de recuperación simplificado de Rio Tinto por especie mineralógica. | 26 |
| Figura 9.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 1 piso..... | 27 |
| Figura 10.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 2 pisos. | 28 |
| Figura 11.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 3 pisos. | 28 |
| Figura 12.- Volúmenes de oxígeno requerido, suministrado y eficiencia del sistema, franjas de 1 piso. | 29 |
| Figura 13.- Volúmenes de oxígeno requerido, suministrado y eficiencia del sistema, franjas de 2 pisos. | 30 |
| Figura 14.- Volúmenes de oxígeno requerido, suministrado y eficiencia del sistema, franjas de 3 pisos. | 30 |
| Figura 15.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 1 piso. | 31 |
| Figura 16.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 2 pisos..... | 32 |
| Figura 17.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 3 pisos..... | 32 |
| Figura 18.- Distribución mineralógica para franjas 118, 119, 120 y 121..... | 33 |
| Figura 19.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 1 a 50 días del ciclo. | 33 |
| Figura 20.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 51 al 100 días del ciclo. | 34 |
| Figura 21.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 101 al 150 días del ciclo. | 35 |
| Figura 22.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 151 al 200 días del ciclo. | 35 |
| Figura 23.- Concentración de oxígeno a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación. | 36 |
| Figura 24.- Perfil de temperatura a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación. | 37 |
| Figura 25.- Concentración de oxígeno, casos sin aireación y aireación mediante 2 sopladores..... | 38 |
| Figura 26.- Perfil de temperatura, casos sin aireación y aireación mediante 2 sopladores. | 39 |
| Figura 27.- Concentración de oxígeno a distintas profundidades, aireación mediante 2 y 4 sopladores. | 40 |
| Figura 28.- Concentración de oxígeno a distintas profundidades, aireación mediante 4 y 6 sopladores. | 41 |
| Figura 29.- Perfil de temperatura a distintas profundidades, aireación mediante 2 y 4 sopladores..... | 42 |
| Figura 30.- Perfil de temperatura a distintas profundidades, aireación mediante 4 y 6 sopladores..... | 42 |
| Figura 31.- Distribución mineralógica de las franjas de interés. | 44 |
| Figura 32.- Recuperación de cobre por franja. | 44 |
| Figura 33.- Curvas promedio de recuperación para franjas con y sin aireación intermedia | 45 |
| Figura 34.- Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-S-H ₂ O para especies de Cu. | 47 |
| Figura 35.- Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-H ₂ O. | 47 |
| Figura 36.- Potencial de la solución de PLS para las franjas con y sin aireación intermedia | 48 |
| Figura 37.- pH de la solución de PLS en las franjas con y sin aireación intermedia | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 38.- Distribución mineralógica de las franjas piloto 136 y 138..... | 50 |
| Figura 39.- Recuperación de franjas con (F136) y sin (F138) sistema de aireación. | 51 |
| Figura 40.- Recuperación con respecto a la razón de riego para franjas con y sin sistema de aireación | 51 |
| Figura 41.- Potencial de la solución de PLS saliente de las franjas con y sin aireación..... | 52 |
| Figura 42.- pH de la solución de PLS de las franjas con y sin aireación | 53 |
| Figura 43.- Flowsheet Planta de Concentración Los Colorados..... | 58 |
| Figura 44.- Flowsheet Planta de Concentración Laguna Seca..... | 59 |
| Figura 45.- Flowsheet Planta de Concentración OGP1..... | 59 |
| Figura 46.- Representación esquemática de pila de lixiviación de sulfuros de baja ley | 68 |
| Figura 47.- Esquema del sistema de aireación basal..... | 69 |
| Figura 48.- Distribución de red de tuberías al interior de la pila | 70 |
| Figura 49.- Intervenciones en red de aireación basal para alimentación del piso 4 | 71 |
| Figura 50.- Disposiciones de matrices de 48" aireación en el piso 4..... | 72 |
| Figura 51.- Representación esquemática de las fases de un ciclo de una colonia de bacterias..... | 81 |
| Figura 52.- Representación esquemática de la oxidación de un cristal de pirita | 82 |
| Figura 53.- Distribución mineralógica franjas de 1 piso (En columnas apiladas)..... | 83 |
| Figura 54.- Distribución mineralógica franjas de 2 pisos (En columnas apiladas)..... | 83 |
| Figura 55.- Distribución mineralógica franjas de 3 pisos (En columnas apiladas)..... | 84 |
| Figura 56.- Extracción de cobre real y modelada. CuT por franja y error relativo, franjas de 2 pisos. | 85 |
| Figura 57.- Extracción de cobre real y modelada. CuT por franja y error relativo, franjas de 3 pisos. | 85 |
| Figura 58.- Ley de Cu [%] y error relativo [%] de modelo predictivo para franjas de 2 pisos..... | 86 |
| Figura 59.- Ley de Cu [%] y error relativo [%] de modelo predictivo para franjas de 3 pisos..... | 86 |
| Figura 60.- Distribución mineralógica de especies sulfuradas [kt] para franjas de 2 pisos..... | 87 |
| Figura 61.- Distribución mineralógica de especies sulfuradas [kt] para franjas de 3 pisos..... | 87 |
| Figura 62.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 1 piso. | 88 |
| Figura 63.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 2 pisos..... | 88 |
| Figura 64.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 3 pisos..... | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.- Caracterización de los microorganismos presentes en el proceso..... | 12 |
| Tabla 2.- Características físicas, mineralógicas y químicas de las franjas F009..... | 20 |
| Tabla 3.- Características del aire en lugar de operación. 3050 <i>msnm</i> y 9.8°C de temperatura ambiente..... | 20 |
| Tabla 4.- Características químicas de la solución de riego o refino | 20 |
| Tabla 5.- Programa de mediciones para elaboración de perfil de concentración de O ₂ y temperatura. | 22 |
| Tabla 6.- Valores límite de los equipos de soplado | 63 |
| Tabla 7.- Características operacionales de los equipos de soplado..... | 63 |
| Tabla 8.- Condiciones Generales del Sitio | 64 |
| Tabla 9.- Datos Generales del Proyecto Lixiviación de Óxidos..... | 64 |
| Tabla 10.- Ciclo de tiempo de la biolixiviación..... | 65 |
| Tabla 11.- Características del mineral apilado | 65 |
| Tabla 12.- Construcción de la pila | 65 |
| Tabla 13.- Características del riego y operación | 66 |
| Tabla 14.- Características de la solución de riego..... | 66 |
| Tabla 15.- Características de la solución de PLS..... | 66 |
| Tabla 16.- Parámetros de aireación | 67 |
| Tabla 17.- Pérdidas de solución en la pila..... | 67 |
| Tabla 18.- Clasificación de las bacterias según su forma de nutrirse..... | 73 |
| Tabla 19.- Clasificación de las bacterias según su forma de respirar | 73 |
| Tabla 20.- Clasificación de las bacterias según el rango de <i>pH</i> óptimo donde se desarrollan..... | 73 |
| Tabla 21.- Clasificación de las bacterias según el rango de temperatura óptimo donde se desarrollan | 73 |
| Tabla 22.- Resultados de reacción en cadena de polimerasa en tiempo real (parte 1)..... | 74 |
| Tabla 23.- Resultados de reacción en cadena de polimerasa en tiempo real (parte 2)..... | 75 |
| Tabla 24.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de primer piso | 76 |
| Tabla 25.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 2 pisos. | 77 |
| Tabla 26.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 3 pisos. | 78 |
| Tabla 27.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 4 pisos | 78 |
| Tabla 28.- Tasas de aireación (consumo, suministro y diseño) y eficiencia para franjas de 1 piso..... | 79 |
| Tabla 29.- Tasas de aireación (consumo, suministro y diseño) y eficiencia para franjas de 2 pisos..... | 79 |
| Tabla 30.- Tasas de aireación (consumo, suministro y diseño) y eficiencia para franjas de 3 pisos..... | 80 |

NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

| | |
|--------------|---|
| MEL | Minera Escondida Limitada |
| OGP1 | Organic Growth Project |
| ROM | Run of Mine |
| DAM | Drenaje ácido de mina |
| SL | Sulphide Leach (Superintendencia de Lixiviación de Sulfuros) |
| PLS | Solución cargada de lixiviación |
| SX | Solvent Extraction Plant (Planta de extracción por solventes) |
| CBAR | Centro de Biotecnología de la Universidad Católica del Norte |
| RCP | Reacción inversa en cadena de polimerasa |
| SAG | Semiautógeno |
| CAEX | Camión de extracción |
| Franja | Unidad de área de corona de pila de dimensiones 2,000[m] x 125[m] que se encuentra bajo riego efectivo. |
| Eh | Potencial |
| pH | Medida de acidez |
| P_{80} | Tamaño característico que acumula el 80% pasante de las partículas del producto del circuito |
| ΔH | Entalpía estándar de reacción |
| ΔG | Energía libre |
| $msnm$ | Metros sobre el nivel medio del mar |
| km | Kilómetro |
| $Células/ml$ | Células por mililitro |
| Mt | Millones de toneladas |
| μm | Micrómetros |
| mV/ENH | Milivots respecto al electrodo normal de hidrógeno |
| $^{\circ}C$ | Grados celcius |
| Atm | Atmosferas |
| $kcal/mol$ | Kilocaloría por mol |
| cm | Centímetro |
| m | Metro |
| m^2 | Metro cuadrado |
| m^3 | Metro cúbico |
| m^3/h | Metro cúbico por hora |

| | |
|--------------|---|
| MNm^3 | Millones de normal metros cúbicos |
| $Nm^3/h/m^2$ | Normal metros cúbicos por hora por metro cuadrado |
| kPa | Kilopascales |
| kg/m^3 | Kilogramo por metro cúbico |
| g/L | Gramo por litro |
| ppm | Partes por millón |



1. INTRODUCCIÓN

A pesar de la situación económica mundial que provocó un descenso en el precio de los metales bases e incertidumbre en los proyectos futuros, la industria minera continúa siendo la actividad industrial más relevante del país aportando el 11.8% de producto interno bruto de la nación al trimestre III del año fiscal 17 [1].

Las predicciones por otro lado, hacen de la minería en Chile una buena inversión considerando el prometedor futuro en materia económica de las principales naciones consumidoras. Sin embargo, la mejora continua de las técnicas de producción, la optimización de los insumos y la implementación de alternativas para disminuir los costos de operación se hacen estrictamente necesarias, teniendo en cuenta las leyes de mineral de cobre cada vez menores y el aumento de los recursos que se destinan al cuidado de las personas, las comunidades y el medio ambiente debido a una legislación cada vez más rigurosa.

En este sentido, la lixiviación bacteriana de sulfuros de baja ley en pilas estáticas o permanentes, se ha transformado en una alternativa rentable para los inversionistas en el mediano y largo plazo debido al bajo costo de operación que el proceso requiere y a la larga vida útil de estos proyectos. Esta técnica, sin embargo, requiere en teoría de una considerable disponibilidad de oxígeno para llevar a cabo las reacciones paralelas del mecanismo indirecto de lixiviación de sulfuros metálicos.

Hoy, la discusión se centra en determinar si el uso del sistema de aireación, y el gasto energético que ello implica, supone o no una mejora significativa al proceso de lixiviación de sulfuros de cobre.

1.1. MOTIVACIÓN

El proyecto “Escondida Bioleach” consideró la instalación de una red de aireación por cada franja de pila con la finalidad de oxigenar la comunidad bacteriana y aportar el oxígeno requerido por las reacciones de lixiviación de sulfuros primarios y secundarios de cobre según el Informe Técnico M40035-P-TREP-003. En la actualidad, la Gerencia de Producción Cátodos mediante su Superintendencia de Lixiviación de Sulfuros se encuentra estudiando el aporte real de la red de aireación de la pila de biolixiviación, y el estado actual de la red con la finalidad de justificar el gasto energético de los sopladores y la aplicación de la técnica [2].

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GENERALES

Establecer si la inyección de aire mediante sopladores en la pila permanente de biolixiviación de sulfuros produce un efecto real en el rendimiento del proceso de lixiviación.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar el consumo teórico (estequiométrico) de oxígeno del sistema de biolixiviación.
- Determinar el suministro de oxígeno del sistema de aireación.
- Estudiar el efecto real de la aireación sobre variables metalúrgicas operacionales (recuperación, concentración de elementos disueltos, *pH* de la solución, entre otros).
- Determinar mediante las herramientas disponibles si el aire suministrado por el sistema de aireación ingresa a la pila de forma efectiva.

1.3. ALCANCES

El presente estudio analiza las franjas de la pila que se encuentran 100% apiladas y cuyo ciclo de riego haya finalizado, en adelante, franjas totalmente apiladas, por lo que no serán consideradas para motivos de cálculo o análisis aquellas que estén parcialmente apiladas o cuyo ciclo de riego se encuentre en curso.

A partir de la caracterización mineralógica se estimará el consumo teórico de oxígeno con la finalidad de justificar la inyección de aire al sistema de lixiviación. Paralelamente se estudiarán los antecedentes metalúrgicos de la operación con y sin aireación con la finalidad de determinar diferencias que respalden el uso del sistema de inyección de aire.

2. ANTECEDENTES

2.1. MINERA ESCONDIDA LIMITADA

La compañía Minera Escondida Limitada (MEL) actualmente bajo la presidencia del Sr. Mauro Neves, se encuentra domiciliada en Avenida La Minería #501 en la Comuna de Antofagasta. MEL tiene la concesión de dos yacimientos en la II Región, Escondida y Escondida Norte desde donde extrae minerales de cobre oxidados y sulfurados para procesarlos en sus plantas de tratamiento. La compañía trata los minerales oxidados mediante lixiviación, extracción por solventes y electrobtención al igual que los minerales provenientes de la zona de enriquecimiento secundario y sulfuros primarios cuyas leyes de cobre estén bajo la ley de corte (leyes sub-marginales) de las plantas concentradoras. Los sulfuros de alta ley de cobre se tratan mediante concentración por flotación, en tres plantas concentradoras, *Laguna Seca*, *Los Colorados* y *OGP1* [3].¹

La Figura 1 muestra la evolución que ha tenido la ley de corte de acuerdo al plan minero de la Gerencia de Operaciones Mina para las concentradoras desde el inicio del proyecto Escondida Bioleaching PAD hasta diciembre de 2018.

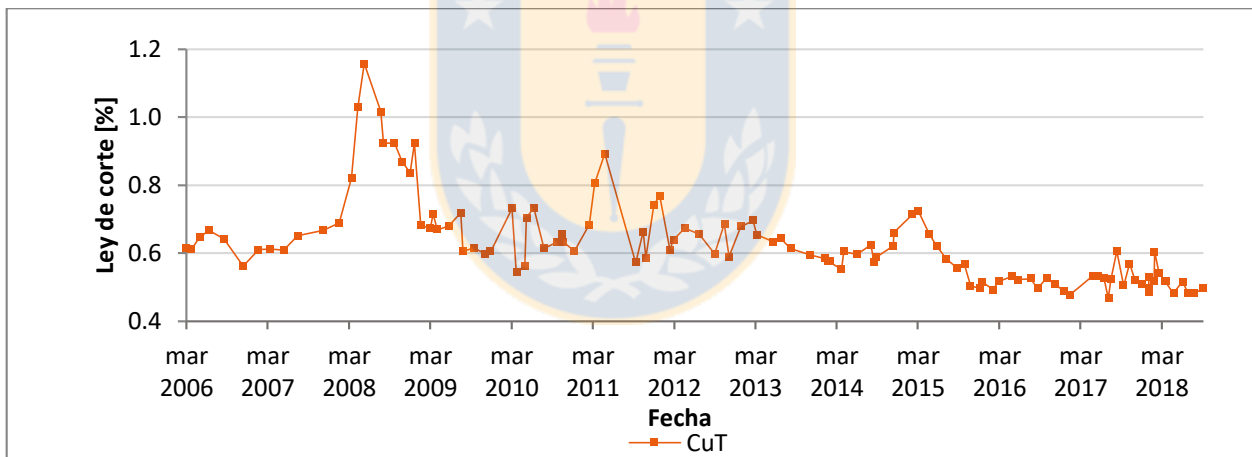


Figura 1.- Evolución de la ley de corte de concentradoras.

Escondida es la operación con mayor producción de cobre a nivel mundial procesando anualmente más de 130 [Mt] de mineral para obtener por sobre un millón de toneladas métricas de cobre fino. El año 2016, Escondida produjo 1,001,031 [t] de cobre en concentrado de cobre y cátodos de alta pureza, lo que representa un 18.0% de la producción nacional de metal rojo. La faena está ubicada a 173 [km] al sureste de Antofagasta y a 3,150 metros sobre el nivel medio del mar. La estructura de su propiedad está compuesta por BHP, empresa operadora, con el 57.5%; Rio Tinto con el 30%; JECO Corporation con el 10% y JECO 2 LTD con el 2.5% [3].

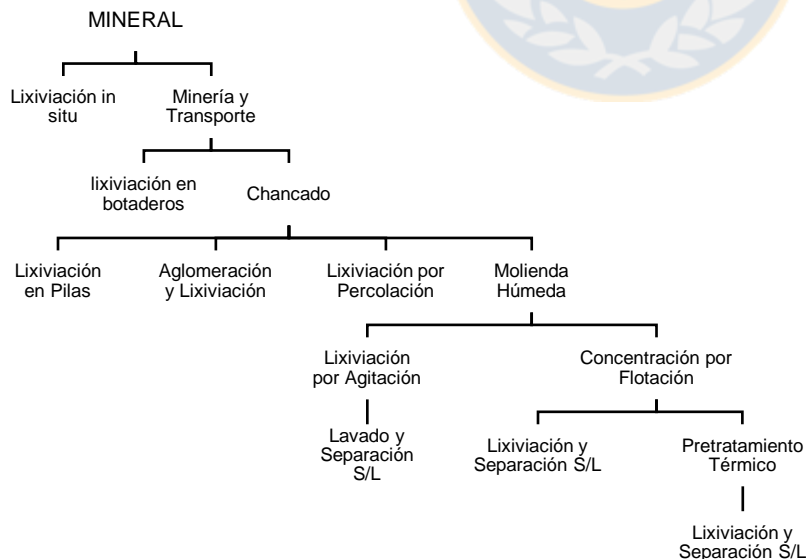
¹ El proceso productivo de las plantas concentradoras se muestra en el ANEXO A.1.

2.2. LIXIVIACIÓN

Según la Doctora Ruiz, la lixiviación corresponde a la disolución selectiva de los constituyentes de interés de la mena o concentrado para obtener una solución acuosa conteniendo el metal valioso y un residuo insoluble conteniendo el material sin valor. [...] La lixiviación es fundamentalmente un proceso de transferencia de masa sólido-líquido. La lixiviación puede ser llevada a cabo en condiciones ambientales o a temperaturas elevadas y/o bajo presión. Las condiciones del proceso dependerán de las reacciones químicas que están teniendo lugar. El objetivo en todos los casos es obtener iones metálicos o complejos que puedan ser extraídos selectivamente desde la solución [4].

2.2.1. MÉTODOS DE LIXIVIACIÓN

En general, los métodos de lixiviación responden a la obtención del máximo beneficio económico, asociado a los mínimos costos y complicaciones posibles. En este sentido, para lograr el ideal balance económico entre los recursos aportados, las inversiones iniciales, los gastos operacionales, los insumos y los beneficios, es que se han diseñado una larga serie de métodos o procesos para la lixiviación de minerales, entre los que destacan la lixiviación in situ, la lixiviación en botaderos y en pilas, entre otras alternativas. Los diferentes métodos de lixiviación pueden requerir diversos procesos unitarios, que se aplican previamente a la lixiviación, algunos de ellos (los más relevantes) se exhiben en la Figura 2.



Es importante destacar que la lixiviación puede ver su cinética acelerada al intervenir el proceso externamente con algunas técnicas desarrolladas. Entre las técnicas más relevantes encontramos el uso de reactivos, la incorporación de la agitación, o la modificación de la presión y la temperatura del sistema de lixiviación [5].

Figura 2.- Procesos unitarios asociados a la aplicación de los principales métodos de lixiviación (Hidrometalurgia, Domic, 2001).

Según la Doctora Ruiz, los métodos de lixiviación más relevantes son; la lixiviación in situ que corresponde al caso donde se aplican soluciones de lixiviación directamente sobre el mineral en el lugar del yacimiento sin someterlo a labores de extracción minera alguna. Ruiz explica que este método es utilizado particularmente en minas subterráneas que hayan terminado su etapa de explotación o a cuerpos mineralizados de baja ley, además agrega que su eficiencia es muy compleja de evaluar debido a que se desconocen generalmente los tonelajes y las leyes de los yacimientos [4].

Se destaca también la lixiviación en botaderos, que se utiliza para procesar minerales de baja ley, esto es, sulfuros primarios y secundarios con leyes sub-marginales (bajo la ley de corte) por lo que se descartan de la operación normal. La técnica consiste en apilar el mineral en un sitio impermeable formando un botadero, donde en la mayoría de los casos estos botaderos son formados cerca de la mina usando formaciones naturales del terreno (con frecuencia se rellenan valles angostos). Por lo general el mineral de los botaderos no es sometido a un proceso de reducción de tamaño. También se tratan por esta técnica, ripsos de lixiviación.

La lixiviación en bateas inundadas, que es una técnica que se aplica a los minerales oxidados más ricos, usualmente se trata en flujo contracorriente, pero con el mineral estacionario. El mineral triturado se carga en bateas o estanques paralelepípedicos de concreto recubiertos de material epóxico y equipados con un fondo falso y un medio filtrante.

La lixiviación por agitación, que es usada generalmente para lixiviar minerales que no pueden ser tratados efectivamente por lixiviación en pilas o en bateas. Se usa industrialmente para el procesamiento de oro, cobre de difícil extracción y uranio. El proceso se efectúa en forma batch o continua, manteniendo las partículas en suspensión en el solvente, esto se realiza en reactores agitados.

Por otro lado, se tiene la lixiviación a presión que otorga la ventaja de poder someter a los sistemas acuosos a temperaturas sobre la temperatura normal de ebullición de la solución. Esta operación permite además usar presiones de agentes gaseosos mucho más elevadas permitiendo velocidades de reacción mucho más rápidas. Este proceso se realiza en reactores autoclave [4].

2.2.2. LIXIVIACIÓN EN PILAS

De todos los métodos de lixiviación, probablemente el más estudiado y utilizado es el de lixiviación en pilas. Desde un punto de vista operacional, las pilas de lixiviación pueden clasificarse como dinámicas o móviles y como estáticas o permanentes. Las dinámicas son aquellas que se desmantelan luego de la lixiviación del mineral, esto es, una vez que se cumple el ciclo de riego, el mineral es removido y dispuesto en botaderos de rípios. Las estáticas por otro lado son aquellas pilas que se construyen y riegan por niveles, esto es, una vez finalizada la lixiviación de un nivel, se monta un segundo nivel sobre el primero y se riega nuevamente con la solución de lixiviación.

Otra forma de clasificar las pilas es de acuerdo a la granulometría del mineral de alimentación, el que puede o no haber sido tratado previamente a su disposición en la pila. En este sentido el mineral puede ser chancado y luego transportado para su disposición en la pila o puede ser apilado directamente desde la tronadura, este segundo caso se conoce como pila ROM (por su sigla en inglés Run Of Mine). Muchas operaciones, además aglomeran y curan el mineral en tambores aglomeradores para aumentar el intercambio del metal de interés y mejorar la estabilidad mecánica de la pila.

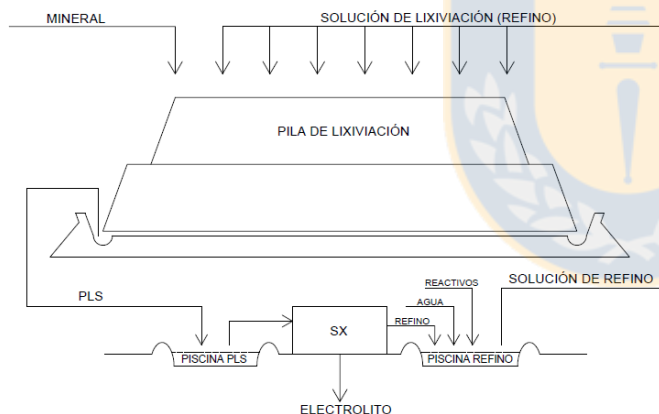


Figura 3.- Diagrama de flujos para lixiviación en pilas (Elaboración propia).

La Figura 3 muestra el diagrama de flujos para un proceso típico de lixiviación en pilas y concentración y purificación de soluciones mediante extracción por solventes.

Desde el punto de vista del riego se tienen principalmente 2 formas de riego. Una es por goteo y otra por aspersión. Según el sitio web minería chilena, en Minera Escondida Limitada, para el proyecto de lixiviación de sulfuros, se ha implementado un

tercer mecanismo, que corresponde a una reciente adaptación llamada manto irrigador, que consiste en una fusión entre líneas de regadío y un termofilm, a través de un encamisado troquelado cada 3.5 [cm], este nuevo sistema logra mejorar la eficiencia del regadío, disminuye considerablemente la evaporización de la solución, además de lograr disminuir hasta en un 66% el tiempo de instalación de la red de riego.

2.3. LIXIVIACIÓN DE MINERALES SULFURADOS

Desde el punto de vista hidrometalúrgico se tienen dos modalidades para la lixiviación de menas sulfuradas, el tratamiento directo desde los minerales sulfurados, sea in situ, en botaderos o en pilas y el tratamiento de concentrado sulfurados.

Según Domic [5], las especies minerales sulfuradas son generalmente insolubles en agua, aún a temperaturas elevadas. Ahora, desde el punto de vista del comportamiento frente a la disolución, los sulfuros pueden clasificarse como aquellos que se disuelven en ambientes reductores y aquellos que lo hacen en presencia de agentes oxidantes. En la Figura 4 se aprecia un esquema que resume los distintos procesos de lixiviación de menas sulfuradas.

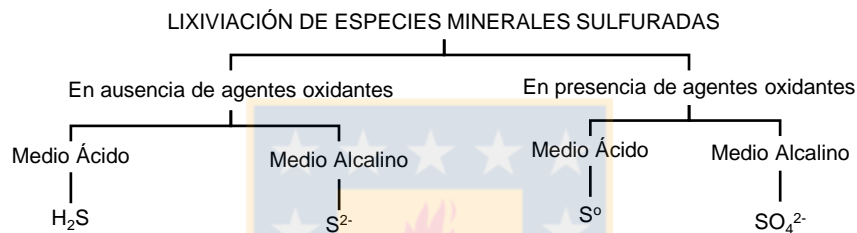


Figura 4.- Tratamiento de lixiviación de sulfuros y tipo de producto final para el azufre contenido (Hidrometalurgia, Domic, 2001).

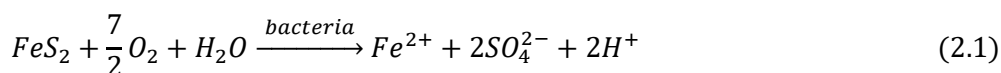
Se concuerda en que los métodos de lixiviación que producen S^0 son más atractivos por su sencillo manejo operacional y ambiental. Ahora, desde el punto de vista químico, la lixiviación de sulfuros primarios, secundarios y minerales mixtos en pilas requiere de un suministro fresco de Fe^{3+} y es un proceso extremadamente lento, especialmente para los sulfuros primarios de cobre [5].

2.3.1. LIXIVIACIÓN BACTERIANA

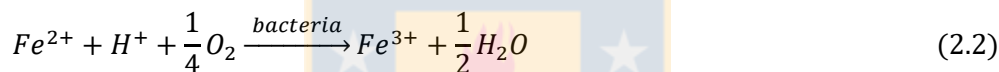
La lixiviación bacteriana se ha dado naturalmente en los DAM (drenajes ácidos de mina), donde las bacterias catalizan la reacción de oxidación de los minerales sulfurados. El interés por la biolixiviación surge de los problemas ambientales que los DAM generaban y que no fueron descritos científicamente sino hasta fines de la década del 40. A partir de ahí, se estudian algunas reacciones biológicas que involucran desarrollo de actividad microbiana asociada a procesos de oxidación de sulfuros. El primer microorganismo estudiado fue la especie *Th. Ferrooxidans* por la facilidad para encontrarla y aislarla desde los drenajes ácidos, así como por su habilidad para acelerar la disolución oxidativa de varios sulfuros [6]. El descubrimiento de esta cepa y su aplicación en la hidrometalurgia ha sido de gran importancia tanto para la economía como para disminuir el impacto provocado por estas actividades [7].

En estricto rigor, la biolixiviación consiste en la solubilización de metales desde minerales en presencia de un medio ácido, que actúa como agente lixivante y es catalizada por microorganismos. Estos microorganismos utilizan el mineral en su metabolismo, específicamente en la transferencia de electrones, liberando metales y calor sin la necesidad de energía externa [8] [9].

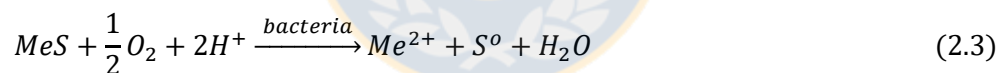
La biolixiviación de sulfuros, involucra la disolución de minerales ya sea por la acción directa o indirecta de microorganismos [10]. La Doctora Ruiz [4], concuerda con que los mecanismos de reacción utilizados en el proceso biogénico de minerales sulfurados son directo e indirecto. La oxidación biológica directa del sulfuro metálico produce sulfato y ácido sulfúrico de acuerdo a la reacción general mencionada en el trabajo de Nordstrom [11].



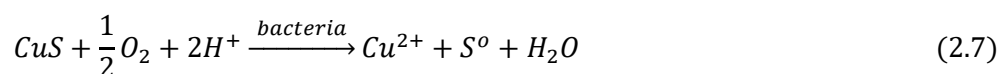
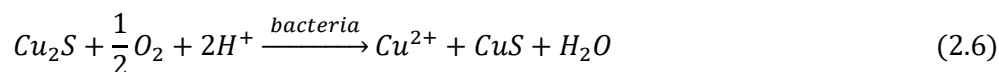
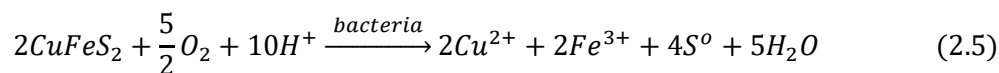
Así mismo es posible describir el proceso que involucra la oxidación de los iones Fe^{2+} a Fe^{3+} en medio ácido, de acuerdo a la siguiente reacción.



Las reacciones (2.1) y (2.2) son llevadas a cabo gracias a la acción bacterial. La acción directa de oxidación de sulfuros metálicos se realiza con O_2 en medio ácido y se puede representar como.



Para los sulfuros de cobre más comunes, las reacciones de oxidación directas son las siguientes.

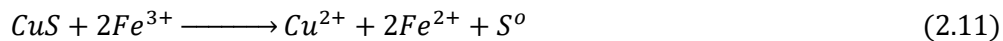
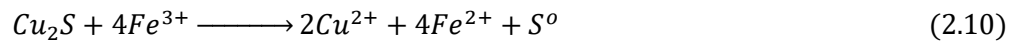
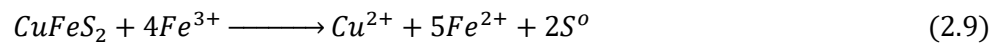


El mecanismo de reacción indirecto se basa en la reacción de formación de ion férrico ya que las reacciones indirectas utilizan al Fe^{3+} como agente oxidante. Así entonces el ion férrico es el

responsable de la oxidación química tanto de la pirita como de los demás sulfuros de metales base [12].



Ahora, para los sulfuros de cobre más comunes, se tienen las siguientes reacciones de disolución en medio férrico



Mientras que la capa de azufre formada en la zona de lixiviación es transformada a sulfato mediante la siguiente reacción.



2.3.2. BACTERIAS EN HIDROMETALURGIA [5]

La presencia natural de bacterias como los géneros *Th. Ferrooxidans* y *Th. Thiooxidans* en procesos industriales y aguas de mina han permitido, en general, la extracción de metales desde minerales de cobre, zinc, oro y uranio a través del uso de la oxidación de sulfuros.

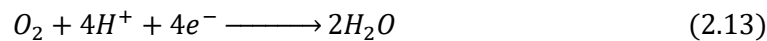
Sin embargo, el reciente uso de otras cepas bacterianas aisladas desde zonas de aguas termales azufrosas, géiseres y volcanismos recientes, ha permitido la operación exitosa de la disolución de concentrados anteriormente considerados más refractarios ante la lixiviación como son los de calcopirita y enargita, por ejemplo.

Las bacterias son organismos unicelulares con un tamaño del orden de 1 $[\mu m]$ y son una de las formas de vida más arcaicas y primarias que existe, estas bacterias generalmente se denominan organismos procariotas. Estas, pueden clasificarse según su modo de nutrirse, según su forma de respirar y según la acidez y temperatura a la que se desarrollan de forma más favorable. Detalles de la clasificación se muestran en anexos².

² Anexo D.1. a D.4.

Aquellas bacterias que intervienen en los procesos de lixiviación son generalmente autotróficas y aeróbicas, las que son capaces de catalizar las reacciones de oxidación en sustancias inorgánicas, como los son los minerales. Son genéricamente clasificadas como quimio-sintéticas, es decir, estas bacterias tienen la facultad de obtener la energía necesaria para desarrollar su metabolismo energético a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos (a partir del intercambio de electrones), fundamentalmente a partir de la oxidación de los sulfuros metálicos, de la oxidación del ion ferroso o bien de la oxidación del azufre elemental.

En términos químicos la reacción de oxidación del ion ferroso, de los sulfuros metálicos o de los compuestos de azufre es catalizada por la bacteria, mientras que el oxidante es normalmente el oxígeno molecular que se reduce según



Se ha demostrado que también se puede dar una oxidación catalizada por las bacterias en condiciones anaeróbicas, en estos casos el oxidante es el ion férrico. Las bacterias acidófilas, capaces de vivir en ambientes ácidos, pueden ser encontradas de forma nativa en algunos yacimientos y es posible aislarlas para utilizarlas en procesos industriales de lixiviación.

2.4. PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE SULFUROS EN MINERA ESCONDIDA

En vista y consideración de las dimensiones y la juventud del yacimiento, MEL sugiere la creación de una nueva área de procesos para mejorar la recuperación de cobre de los sulfuros de baja ley. En 2004 la compañía ingresó a su cartera, el proyecto Escondida Norte y Sulphide Leach Project, el cual hoy se encuentra en pleno funcionamiento y con 3 etapas de expansión ya implementadas.

El proyecto consta de una primera etapa de lixiviación bacteriana de mineral ROM (Run of Mine) proveniente de los rajos Escondida y Escondida Norte en una pila de 2,000 [m] de ancho por 4,875 [m] de frente y una elevación de 7 pisos de 18 [m] de altura cada uno. La pila de lixiviación se compone de franjas dispuestas a todo su ancho (2,000 [m]), de dimensiones 125[m] de frente y 18[m] de alto. A su vez, cada franja está dividida en 4 bloques de 62.5[m] de ancho por 1,000[m] de largo. En cuanto al riego, cada bloque se divide en 10 unidades de riego de 62.5[m] por 100[m] [13].³

En la actualidad, la pila de lixiviación se encuentra en etapa de apilamiento de su piso 5 verticalmente y de la franja F138 a lo largo. Por lo que sus dimensiones actuales son 4,750 [m] de

³ Se adjunta diagrama de pilas de lixiviación (Anexo C.1).

frente por 2,000 [m] de fondo y 93.54 [m] de altura en las franjas *F502*, *F503*, *F504* y *F505*. Mientras que las franjas de la *F406* a la *F417*, el apilamiento solo tiene 74.65 [m] de altura por tratarse de un piso 4. De la misma forma las franjas de la *F318* a la *F328* tienen 55.32 [m] y las franjas de la *F129* a la *F138* tienen solo 18 [m] a excepción de la *F136*, *F137* y *F138*, que debido a una prueba metalúrgica tienen solo 10 [m] de altura.

En forma simultánea, hasta 15 franjas de la pila se riegan con un flujo volumétrico de diseño de $16,500 \text{ m}^3/\text{h}$ de solución de refino concentradas en ácido sulfúrico (6.1 g/L de H^+) proveniente de las piscinas de refino (2 piscinas de $25,000 \text{ m}^3$ y dos piscinas de emergencia de $300,000 \text{ m}^3$ y $500,000 \text{ m}^3$), el PLS es recolectado en la zona de colección o percolado y es llevado a las piscinas de PLS (2 piscinas de $54,000 \text{ m}^3$), el rebose es dirigido a las piscinas de refino) para alimentar la etapa de extracción por solventes. Paralelamente al riego, a las franjas que se encuentran en ciclo de regadío se les inyecta un suministro de aire con la finalidad de oxigenar la zona y así optimizar las condiciones del medio para el incremento de la colonia de bacterias aeróbicas y garantizar que ocurran las reacciones de lixiviación de los minerales asegurando la conservación de la razón $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$.

El proceso de extracción por solventes para el PLS de la línea sulfuros se realiza en dos trenes de SX (tren E y tren F), ambos de idénticas características estructurales e hidráulicas. El proceso de intercambio se realiza en 5 etapas (dos etapas de extracción en serie más una extracción en paralelo, una etapa de lavado y una etapa de descarga o re-extracción). El proceso de SX originalmente diseñado para tratar $10,000 \text{ m}^3/\text{h}$, actualmente trata $11,000 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo que la planta está trabajando por sobre su capacidad de diseño. La diferencia de $5,500 \text{ m}^3/\text{h}$ entre el flujo de riego y lo procesado por los trenes de extracción por solventes constituye una corriente de recirculación de PLS a las pilas, lo cual permite amortiguar las variaciones de flujo y controlar el manejo de soluciones [13].

La re-extracción o striping se realiza con el electrolito pobre (40 g/L promedio) proveniente de la nave de electrobtención distante a 17 [km] de la planta de SX. El electrolito pobre se carga en la etapa de re-extracción hasta los 55 g/L – 56 g/L de cobre convirtiéndose en electrolito rico que es retornado a la nave de electrobtención. El flujo promedio de solución bombeada desde y hacia EW (Electrobtención por sus siglas en inglés), esto es, electrolito agotado y de avance, es de poco más de $1,820 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA COLONIA BACTERIANA

La Universidad Católica del Norte en su centro de biotecnología (CBAR), ubicado en la comuna de Antofagasta, recibió durante el mes de diciembre de 2018, 21 muestras de soluciones de diversos puntos del proceso de lixiviación para estudiar la presencia de bacterias mediante reacción en cadena de polimerasa. De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar la presencia de 14 especies cuya caracterización en biomasa (*células/ml*), se exhibe en anexos⁴.

En base al estudio teórico, la tabla 1 caracteriza a los principales microorganismos identificados en la pila según las características más relevantes desde el punto de vista de la operación industrial a gran escala, en función de la abundancia en la solución de PLS y en orden decreciente.

Tabla 1.- Caracterización de los microorganismos presentes en el proceso de biolixiviación de sulfuros en Minera Escondida Limitada.

| Microorganismo | Forma de Respirar | pH | Temperatura | Metabolismo | Abundancia [células/ml] |
|---|-------------------|-----------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| <i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i> | - | 1.9 - 2.4 | Termófila | Mixotrófica | 2.18E6 |
| <i>Leptospirillum Ferriphilum</i> | Aeróbica | 2.0 - 3.0 | Mesófila | Quimioautotrófica | 3.18E5 |
| <i>Acidithiobacillus Ferrooxidans</i> | Aeróbica | 1.5 | Mesófila | Quimioautotrófica | 3.18E5 |
| <i>Acidithiobacillus Thiooxidans</i> | Aeróbica | 2.0 | Mesófila | Quimioautotrófica | 1.63E5 |
| <i>Acidiphilum Sp.</i> | - | - | - | - | 1.60E5 |
| <i>Sulfobacillus Sp. MAD</i> | - | - | - | - | 1.37E5 |
| <i>Acidithiobacillus Caldas</i> | - | - | - | - | 4.73E4 |
| <i>Archeas Totales</i> | - | - | - | - | 2.07E4 |
| <i>Sulfobacillus Sp. Escondida</i> | - | - | - | - | 2.05E4 |
| <i>Alicyclobacillus Sp. G1</i> | - | - | - | - | 2.01E4 |
| <i>Sulfolobus metallicus</i> | - | - | Extremadamente Termófila | - | <1.00E2 |

⁴ Anexo D.4.

2.4.2. MINERALOGÍA Y REACCIONES DE LIXIVIACIÓN

La pila permanente de biolixiviación de sulfuros de baja ley y su extensión actual de 38 franjas de 1 piso, 28 de 2 pisos, 27 de 3 pisos, 16 de 4 pisos y 5 del 5 pisos se cargan con minerales procedentes de los rajos y acopios de Escondida y Escondida Norte utilizando camiones de extracción, los cuales descargan directamente el material sobre la pila de lixiviación mediante el volteo de su carga a través de los taludes longitudinales de cada franja de la pila. El mineral que se procesa en la planta de biolixiviación, corresponde a mineral ROM de baja ley en cobre correspondiente a especies sulfuradas que contienen: calcopirita ($CuFeS_2$) presente en un 50% como sulfuro primario, una mezcla de calcosina (Cu_2S) y covelina (CuS) presentes en un 50% como sulfuros secundarios y una pequeña proporción de óxidos de cobre. El mineral ROM presenta una granulometría de P_{80} Entre 8" – 12", humedad de 2.7% y una ley de cobre comprendida en el rango de 0.3 – 0.7% Cu [2].

La colección de datos operacionales entrega información acotada respecto a la mineralogía de cada franja de la pila de lixiviación en función de la fecha de apilado del cuerpo. Los datos otorgados por operaciones mina, así como los gráficos correspondientes a la caracterización mineralógica por franja se muestran en anexos⁵.

Con los antecedentes anteriores podemos determinar las reacciones de lixiviación que predominarán en el sistema de lixiviación, donde los sulfuros de cobre (calcopirita, covelina y calcosina) son ampliamente preponderantes.

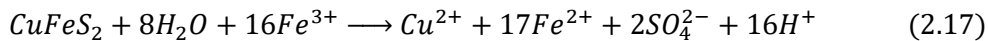
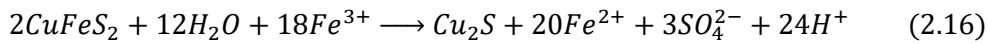
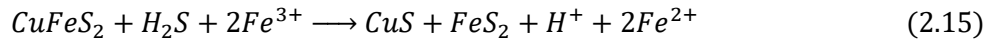
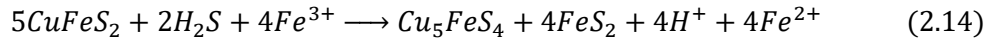
Según el diagrama de Pourbaix para el sistema $Cu - Fe - S - H_2O$ a $25^\circ C$ y 1 [atm] de presión⁶, es posible predecir la formación de especies en solución en función del potencial ($[mV/ENH]$) y el pH . En el diagrama se verifica que las especies de minerales oxidadas de cobre, a excepción de la cuprita (Cu_2O), solo requieren condiciones de acidez para disolverse, mientras que los sulfuros simples y la cuprita necesitan condiciones ácidas oxidantes. Si bien es cierto que, a una determinada condición de potencial y temperatura, el diagrama $Eh - pH$ permite conocer teóricamente la especie que se forma, la realidad en la práctica dista mucho de la predicción termodinámica.

En los procesos metalúrgicos de gran escala, los productos de las lixivitaciones están ligados enormemente a la cinética de la reacción, esto explica por qué en la mayoría de los casos, se forman productos que no son necesariamente los más favorables termodinámicamente y en algunas ocasiones incluso pueden formarse productos que el diagrama no predice. Con el objetivo de ilustrar

⁵ Tablas de mineralogía en anexo D.6. Gráficos de distribución mineralógica en anexo E.3.

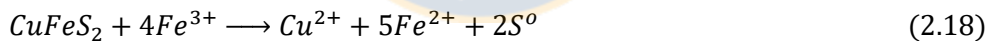
⁶ Diagrama de Pourbaix para el sistema $Cu - Fe - S - H_2O$ a $25^\circ C$ y 1atm ANEXO F.1.

esta idea, la Doctora Ruiz [4] estudia la oxidación de calcopirita en la zona ácida. Para ello considera la oxidación de $CuFeS_2$ con iones Fe^{3+} a potenciales cada vez mayores. Luego, las siguientes reacciones termodinámicas son posibles.

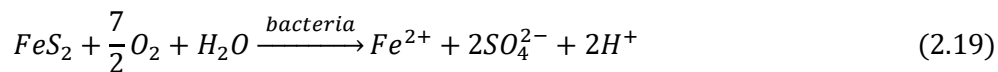


Las reacciones (2.14) y (2.15) requieren H_2S Como reactivo, ya sea por suministro externo o por la acción de reacciones laterales. Pero aun cuando el H_2S esté disponible, es muy improbable que estas reacciones ocurran, ya que requieren la nucleación y el crecimiento de la pirita, lo cual no ocurre con facilidad en condiciones de lixiviación. Por otro lado, ningún estudio de laboratorio ha evidenciado la ocurrencia de estas dos reacciones de lixiviación. La reacción (2.16) tiene una cinética muy lenta para ser observable en condiciones de laboratorio, aunque se presume que puede ser importante en la lixiviación bacteriana en pilas. La reacción (2.17) se observa comúnmente en estudios de lixiviación, donde en lixiviación ácida oxidante es particularmente importante debido a que es la responsable de la oxidación parcial del azufre del mineral a sulfato.

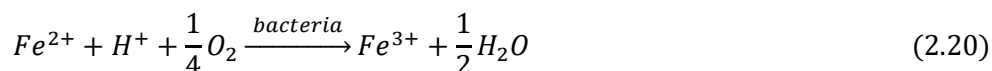
Lo intrigante del caso, es que, la reacción que posee mayor velocidad ni siquiera es predicha por el diagrama de Pourbaix. La reacción es descrita por la siguiente ecuación.



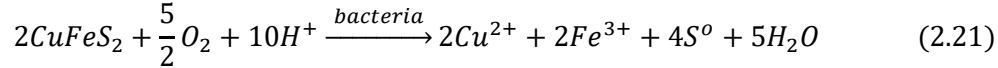
Lo anterior es esencial para comprender que a pesar de todas las reacciones que pueden ser termodinámicamente relevantes para un sistema, solo tendrán implicancia práctica aquellas que tengan una cinética favorable. En este sentido, las reacciones de biolixiviación más relevantes para la operación de lixiviación de sulfuros de Minera Escondida Limitada están dadas por las siguientes ecuaciones.



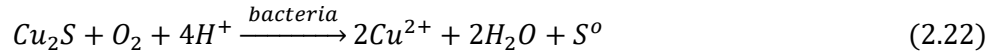
$$\Delta H_{282.95} = -344.287 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -285.985 \text{ kcal/mol}$$



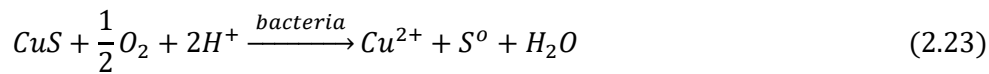
$$\Delta H_{282.95} = -23.889 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -11.252 \text{ kcal/mol}$$



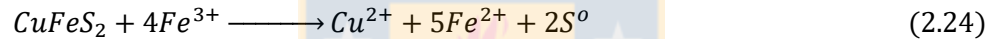
$$\Delta H_{282.95} = -121.589 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -86.609 \text{ kcal/mol}$$



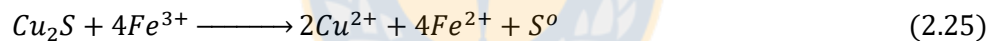
$$\Delta H_{282.95} = -86.719 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -62.935 \text{ kcal/mol}$$



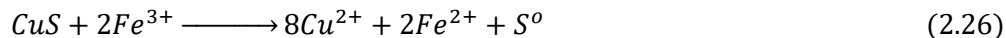
$$\Delta H_{282.95} = -39.483 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -28.207 \text{ kcal/mol}$$



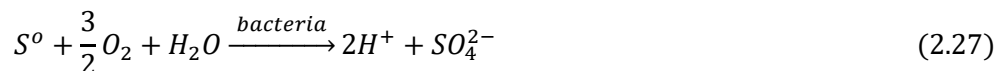
$$\Delta H_{282.95} = -2.143 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -30.350 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{282.95} = 8.839 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -17.928 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{282.95} = 8.296 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -5.703 \text{ kcal/mol}$$



$$\Delta H_{282.95} = -147.454 \text{ kcal/mol} \quad \therefore \quad \Delta G_{282.95} = -122.608 \text{ kcal/mol}$$

La doctora Ruiz menciona que, aunque es difícil separar los efectos directos e indirectos de la catálisis bacteriana, existe evidencia que permite concluir que ocurren ambas, aunque generalmente se considera que el mecanismo indirecto es el más importante en la lixiviación de minerales.

Para el doctor Wolfgang Sand [14], se hace evidente que no existe realmente un “mecanismo directo”, es decir, un ataque enzimático directo sobre los sulfuros de metales base. En su investigación, el doctor Sand, demuestra que sin presencia de iones de hierro, la bacteria *T. Ferrooxidans* no tiene efectos visibles sobre la oxidación de pirita y sulfuros de metales base.

La adición de iones de hierro (III) a los cultivos generalmente mejora las tasas de lixiviación. En ausencia de iones de hierro, la bacteria *T. ferrooxidans* actúa de la misma manera que *T. thiooxidans* (por oxidación de azufre). En consecuencia, el mecanismo "directo" a menudo citado como lixiviación de sulfuro de metal no es más que la oxidación biológica del azufre elemental a sulfato [14].

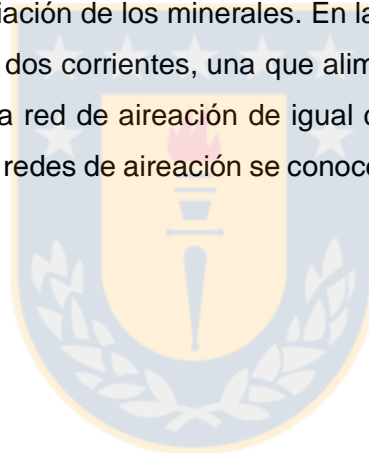
La principal característica de esta investigación es la conjetura de que los iones de hierro (III) son los únicos agentes químicos que disuelven un sulfuro de metal. El mecanismo de lixiviación considerado para el desarrollo de esta memoria es, por lo tanto, *sensu strictu* indirecto.

De acuerdo a muestreos de ripio realizados por la Gerencia de Geometalurgia se logró determinar el porcentaje de lixiviación de la pirita apilada. Los antecedentes disponibles aseguran que la recuperación promedio de los muestreos realizados es de 35.30%. Por razones relacionadas con la propiedad intelectual y la separación de unidades de negocio dentro de la minera, los informes técnicos que acreditan lo antes mencionado no pueden ser distribuidos públicamente [15].

2.4.3. RED DE AIREACIÓN

De acuerdo a la naturaleza de las reacciones de lixiviación y principalmente a las reacciones laterales de oxidación de la pirita y del ion ferroso a ion férrico, es que se verifica que el proceso requiere necesariamente de un sistema de aireación que permita que todas las reacciones de lixiviación se lleven a cabo. En el ámbito bacteriológico se conoce la existencia de al menos 3 especies de bacterias aeróbicas, una de las cuales es la especie más abundante en el cultivo. Por estas razones y avalado por el desarrollo de memorias técnicas y planificación de largo plazo, es que se implementó un sistema de aireación artificial en la pila de lixiviación de sulfuros. Este sistema, su descripción y planos digitalizados se muestran en anexos⁷.

En términos generales, el sistema de aireación contempla dos redes de 21 tuberías que se introducen en la base de la pila distribuyendo el aire insuflado por 8 sopladores, con un flujo de diseño de $24,202 [m^3/h]$ cada uno, con la finalidad de aumentar la concentración de oxígeno en el lecho de la pila y asegurar la lixiviación de los minerales. En las franjas de la *F402* a la *F413* el flujo de aire suministrado se divide en dos corrientes, una que alimenta la red de 21 tuberías de la base de la pila y otra que alimenta una red de aireación de igual característica a la basal, pero que se ubica en la base del piso 4. Estas redes de aireación se conocen como “aireación basal” y “aireación intermedia”.



⁷ La descripción del sistema de aireación se adjunta en anexo A.2.
Los planos digitalizados de la red de aireación se adjuntan en el anexo C.2.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el marco de esta investigación y con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos es que se desarrollan cuatro líneas de análisis.

- 1- Estimación del consumo de oxígeno por franja de la lixiviación de minerales de cobre a partir del modelo simplificado de recuperación de Rio Tinto⁸ mediante un balance estequiométrico.
- 2- Medición de las concentraciones de oxígeno al interior de la pila mediante monitoreo en condiciones sin aireación y con aireación artificial a distintas tasas.
- 3- Comparación de resultados operacionales para franjas de 4 pisos con distintas condiciones de aireación.
- 4- Comparación de resultados operacionales para franjas de 1 piso con distintas condiciones de aireación.

3.1. ESTIMACIÓN DE CONSUMO ESTEQUIOMÉTRICO DE OXÍGENO

La estimación del consumo de oxígeno destinado al proceso de lixiviación de los minerales, se realiza a nivel industrial considerando el modelo simplificado de recuperación de Rio Tinto y los antecedentes operacionales históricos reportados por la Gerencia de Planificación y Control de Procesos.

3.1.1. METODOLOGÍA

Por una parte, el modelo simplificado de recuperación de cobre de RioTinto, permite obtener a un determinado tiempo la recuperación de cobre por cada especie mineralógica presente en el apilado. Los datos operacionales por otro lado, solo permiten conocer la recuperación total de cobre en forma de Cu^{2+} disuelto en el PLS pero no la recuperación de cobre por especie. Sin embargo, los antecedentes disponibles permiten determinar si existe una concordancia entre la recuperación real y el modelo predictivo. De ser así, entonces se puede suponer la recuperación modelada como recuperación real. En base al modelo es posible determinar mediante un balance estequiométrico el requerimiento de oxígeno por franja totalmente apilada en $[Nm^3/ciclo\ de\ riego]$ para cada una de las franjas cuyo ciclo de riego haya finalizado.

Considerando el modelo predictivo y la distribución mineralógica de cada franja, es posible modelar la recuperación. De existir una adecuada correlación de la recuperación real y el modelo, será aceptado estimar un consumo de oxígeno estequiométrico en función de la distribución mineralógica y el modelo predictivo.

⁸ La figura 8 (página 41) muestra las recuperaciones por especie mineralógica según el modelo simplificado de Rio Tinto.

3.2. ANÁLISIS DEL SUMINISTRO REAL DE OXÍGENO

Además de lo anterior se cuenta con el registro histórico de aireación suministrado a pilas, por lo que es posible determinar la eficiencia de aireación considerando el oxígeno requerido según la memoria de cálculo y el oxígeno suministrado durante la operación. Donde la eficiencia se define como:

$$ef = \frac{\text{Volumen de } O_2 \text{ requerido}}{\text{Volumen de } O_2 \text{ suministrado}} * 100 \quad (2.28)$$

3.3. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y PERFIL DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE LA FRANJA

El estudio del desempeño del sistema de aireación fue analizado a escala industrial en la franja F409 de la pila de biolixiviación de sulfuros de MEL. Esta franja de 1,548 [m] de fondo por 125 [m] de frente (193,585 [m²] de área metalúrgica efectiva bajo riego) se utilizó durante el curso de esta memoria como franja piloto para estudiar el efecto de la aireación de forma empírica.

Durante los meses de enero y febrero se realizaron sondajes de 72 [m] de profundidad a lo largo de la franja en 6 ubicaciones distribuidas de forma lineal a lo largo del fondo, con la finalidad de instalar sensores de monitoreo de concentración de oxígeno molecular de la mezcla gaseosa presente en el lecho y temperatura a diferentes profundidades. Se distribuyeron 14 sensores verticalmente en cada ubicación de monitoreo, desde 4.5 [m] bajo la superficie o corona del piso 4 hacia la base de la pila (63 [m] bajo la corona) en forma equidistante. En la superficie de la franja (corona) se instalaron 6 estaciones de monitoreo (1 por cada sondaje o ubicación), a las cuales reportan de forma instantánea los sensores instalados en el sondaje.⁹

3.3.1. EQUIPAMIENTO¹⁰

1. Equipo de medición de concentración de O_2 y perfil térmico vertical 3100-CP. (Soltex Chile S.A.) con instrumentación y softwares proporcionados por la nipona Yokogawa Electric (Yokogawa América Do Soul (Chile)).
2. VL FPM 19U 2913021 Phoenix Contact flat panel LCD monitor resistive touch screen.
3. Cuatro unidades por cada estación de monitoreo de multi-parameter transmitter M800 (Mettler Toledo).

⁹ El diagrama de la disposición de los instrumentos utilizados se exhibe en anexos C.3.

Fotografías de los equipos utilizados se exhiben en ANEXO E.

¹⁰ La distribución y/o reproducción total o parcial de los manuales e informes técnicos de los fabricantes está prohibida de acuerdo a la ley de propiedad intelectual.

3.3.2. MINERALES Y REACTIVOS

Para el estudio se utilizaron las franjas F009, esto es, la franja superior F409 y los 3 cuerpos inferiores (F309 - F209 - F109) de dimensiones, leyes, recuperaciones y mineralogías conocidas. Al 05 de marzo de 2018, la franja F409 así como todas las franjas bajo su nivel se consideran en abandono. En la tabla 2 se muestran las características principales de la franja.

Tabla 2.- Características físicas, mineralógicas y químicas de las franjas F009. (Fuente, Superintendencia de Control de Procesos, Gerencia de Producción Cátodos).

| Franja | F109 | | | | F209 | | | | F309 | | | | F409 | | | |
|----------------------------|---------|----|-----|----|---------|----|-----|----|---------|----|-----|----|---------|----|-----|----|
| Área Metalúrgica [m^2] | 239,332 | | | | 226,213 | | | | 190,526 | | | | 193,584 | | | |
| Altura [m] | 18.00 | | | | 18.44 | | | | 18.88 | | | | 19.33 | | | |
| Masa [Mt] | 8.41 | | | | 8.14 | | | | 7.02 | | | | 7.30 | | | |
| Ley de Cu de cabeza [%] | 0.61 | | | | 0.61 | | | | 0.74 | | | | 0.50 | | | |
| Cu Total [t] | 51,268 | | | | 49,382 | | | | 52,121 | | | | 36,760 | | | |
| | Cc | Cv | Cpy | Ox | Cc | Cv | Cpy | Ox | Cc | Cv | Cpy | Ox | Cc | Cv | Cpy | Ox |
| Mineralogía de Cu [%] | 51 | 7 | 31 | 11 | 51 | 6 | 36 | 7 | 57 | 6 | 19 | 18 | 46 | 13 | 38 | 3 |

En la siguiente tabla se muestran las principales características del aire a 3,050 $msnm$ y 9.8°C.

Las tablas 3 y 4 muestran las características del aire en el sitio de la operación y las características químicas de la solución de riego de la pila respectivamente.

Tabla 3.- Características del aire en lugar de operación. 3050 $msnm$ y 9.8°C de temperatura ambiente.

| Presión Atmosférica (kPa) | Densidad (kg/m^3) | Flujo de Diseño (Nm^3/h) | Flujo Nominal (Nm^3/h) |
|-------------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|
| 73.66 | 0.91 | 153,000 | 20,015 |

En la siguiente tabla se muestran las características principales de la solución de riego (refino)

Tabla 4.- Características químicas de la solución de riego o refino. (Fuente: Sala de control, Superintendencia de Lixiviación Sulfuros).

| Cu^{2+} [g/L] | H^+ [g/L] | pH | Fe^{2+} [g/L] | Fe^{3+} [g/L] | Eh [mV/ENH] | Cl^- [ppm] |
|---------------------|-----------------|------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 0.69 | 8.23 | 1.30 | 0.04 | 1.34 | 787 | 1446 |

3.3.3. METODOLOGÍA

La estrategia utilizada fue recolectar los datos instantáneos de medición de O_2 [%] de la mezcla gaseosa y T [°C] del medio, esto es, tabular los datos de concentración de oxígeno y temperatura en la franja en estudio a distintas profundidades. Luego de obtenidos los resultados para los 2 casos (caso sin aireación y caso con aireación) podremos comparar las gráficas de ambos escenarios para verificar si existe efectivamente ingreso de aire al lecho de la pila, y con ello apoyar o refutar la teoría que postula que no existe un ingreso real de aire a la pila producto de fallas estructurales de la red como colapso físico (fracturas por exceso de carga de mineral) o roturas en uniones enflanchadas y soldaduras.

3.3.3.1. CASO 1.- SIN AIREACIÓN

Corresponde a la situación inicial, donde la franja se encuentra sin aireación ni riego. Una vez los sensores y estaciones de monitoreo son instaladas, es posible capturar datos de cómo se encuentra y comporta una franja que no tiene inyección de aire mediante sopladores.

3.3.3.2. CASO 2.- AIREACIÓN ARTIFICIAL

Corresponde al caso donde se pone en marcha el sistema de aireación y es posible visualizar el efecto de la inyección de aire en los sensores de medición vertical. En este sentido, se realizan tres ciclos de mediciones, variando el caudal de aire dosificado, esto es, usando 2, 4 y 6 equipos de soplado.

3.3.4. PROGRAMA DE PRUEBAS

En la Tabla 5 se muestra el calendario de pruebas de terreno para las mediciones de oxígeno y temperatura en el lecho de la pila.

Tabla 5.- Programa de toma de muestras para elaboración de perfil de concentración de oxígeno y temperatura.

| Pruebas de campo franja F409 | | | |
|-------------------------------------|----------------------|--|----------------------|
| Prueba 1 | | Sin aireación ni riego | |
| Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ | Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ |
| 13 de febrero de 2018 | 21.7 | 21 de febrero de 2018 | 19.1 |
| 14 de febrero de 2018 | 23.2 | 22 de febrero de 2018 | 19.8 |
| 15 de febrero de 2018 | 19.8 | 26 de febrero de 2018 | 20.3 |
| 19 de febrero de 2018 | 17.3 | 27 de febrero de 2018 | 21.5 |
| 20 de febrero de 2018 | 18.6 | 28 de febrero de 2018 | 20.9 |
| Prueba 2 | | Con aireación, 2 sopladores ($40,030[N m^3/h]$). | |
| Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ | Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ |
| 05 de abril de 2018 | 17.4 | 10 de abril de 2018 | 18.1 |
| 06 de abril de 2018 | 18.3 | 11 de abril de 2018 | 16.3 |
| 09 de abril de 2018 | 17.9 | - | - |
| Prueba 3 | | Con aireación 4 sopladores ($80,060[N m^3/h]$). | |
| Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ | Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ |
| 12 de abril de 2018 | 18.3 | 18 de abril de 2018 | 18.7 |
| 16 de abril de 2018 | 17.2 | 19 de abril de 2018 | 18.2 |
| 17 de abril de 2018 | 19.1 | - | - |
| Prueba 4 | | Con aireación 6 sopladores ($120,090[N m^3/h]$). | |
| Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ | Fecha | $T_{atm}[^{\circ}C]$ |
| 23 de abril de 2018 | 16.3 | 26 de abril de 2018 | 16.9 |
| 24 de abril de 2018 | 18.1 | 27 de abril de 2018 | 16.2 |
| 25 de abril de 2018 | 17.7 | - | - |

3.4. EFECTO DE LA AIREACIÓN INTERMEDIA EN FRANJAS DE 72 METROS

A partir de antecedentes operacionales se trabajó en el procesamiento de datos para evidenciar brechas relevantes en variables como la recuperación o la acidez que puedan ser atribuibles a la aireación externa. Para este propósito se seleccionan las franjas *F411*, *F412*, *F413*, *F414*, *F415* y *F416*, donde las franjas *F411*, *F412* y *F413* poseen aireación basal e intermedia mientras que las franjas *F414*, *F415* y *F416* solo poseen red de aireación basal.

3.4.1. METODOLOGÍA

Se procesarán datos de planta para determinar el comportamiento de las extracciones de cobre de las franjas en estudio y poder visualizar de forma gráfica las diferencias en las curvas de recuperación. Otro factor de importancia relacionado con la presencia de oxígeno es una posible disminución del potencial electroquímico de la solución. Es de vital importancia mantener los valores de Eh por sobre los 410 [mV/ENH], ya que según la ecuación 2.20 descrita en la página 29, una baja concentración de oxígeno implicaría una menor razón Fe^{3+}/Fe^{2+} y con ello valores de potencial menores, lo que podría afectar la lixiviación indirecta de los minerales sulfurados de cobre.

3.5. EFECTO DE LA AIREACIÓN BASAL EN FRANJAS DE 10 METROS

De la misma forma que en el caso anterior se procesan los datos operacionales de las franjas *F136* y *F138*, ambas franjas son de 1 piso de 10 [m]. La franja *F136* posee aireación basal mientras que la franja *F138* no posee sistema de aireación. Gracias a estos antecedentes se podrá determinar en forma más evidente la relación entre el desempeño del proceso de lixiviación y la aireación artificial.

3.5.1. METODOLOGÍA

Se manipulan los datos de planta para ver y comparar gráficamente las recuperaciones de cobre para ambas franjas y analizar el comportamiento del potencial y el pH de las soluciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO ESTEQUIOMÉTRICO DE OXÍGENO

Uno de los factores más relevantes en los procesos de lixiviación bacteriana de menas sulfuradas, es la presencia de oxígeno en el sistema. En sistemas de lixiviación ácida en ausencia de férrico, el oxígeno es fundamental para la ocurrencia de las reacciones directas de lixiviación de sulfuros metálicos, mientras que para procesos en medio férrico como el de Minera Escondida, es requerido para las reacciones paralelas a la lixiviación indirecta, como la oxidación del ion ferroso a férrico y la sulfatación del azufre elemental (consumo de la capa de pasivación). A partir de datos históricos y con los antecedentes bibliográficos disponibles es posible determinar mediante un balance metalúrgico el consumo de oxígeno necesario para satisfacer el requerimiento estequiométrico de las reacciones de lixiviación de minerales.

El modelo simplificado de recuperación de Río Tinto permite predecir la recuperación de cobre para cada especie mineralógica presente en la pila. A partir de estos antecedentes y conociendo la mineralogía del apilado es posible calcular el consumo de oxígeno de la lixiviación de los minerales sulfurados mediante un balance estequiométrico. Para este fin es primordial verificar que las recuperaciones reales se ajustan de forma satisfactoria a la recuperación calculada a partir del modelo.

La Figura 5 muestra el comportamiento de la extracción real y su relación con los resultados obtenidos del modelo predictivo para franjas de 1 piso (18[m] de altura).

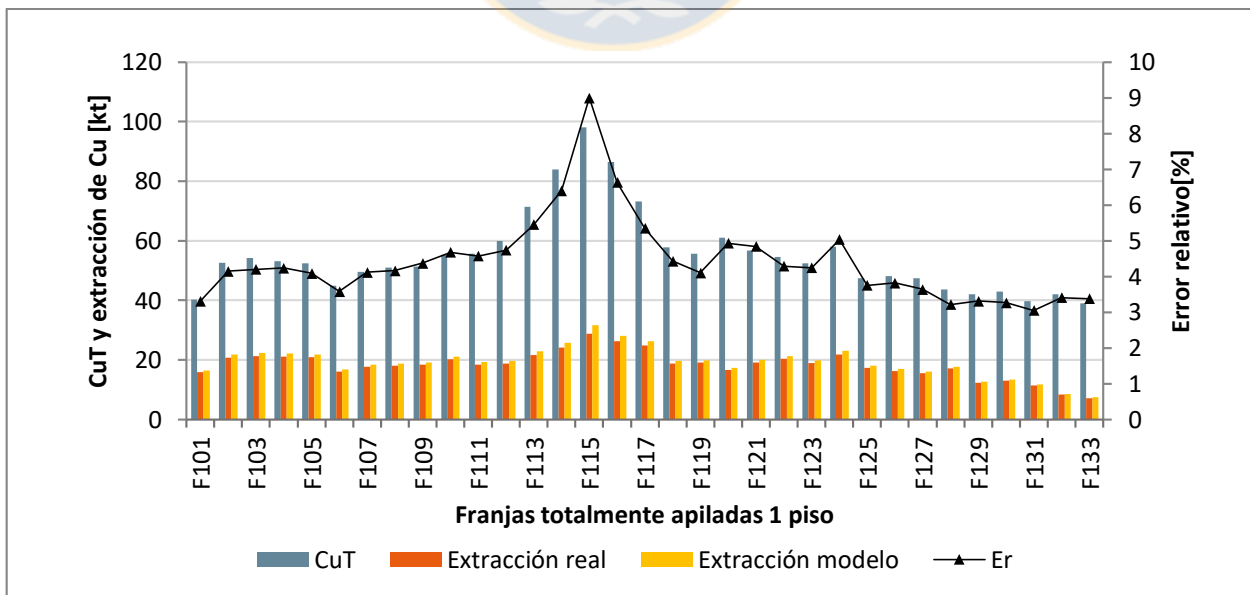


Figura 5.- Gráfico de extracción de cobre real y modelada [t]. CuT por franja y error relativo [%] del modelo predictivo.

Se observa en la Figura 5 que existe una buena concordancia entre la extracción real y la extracción predicha por el modelo. Esto se verifica ya que el conjunto de franjas presenta un error relativo porcentual del 4,26% en promedio, lo que considerando la magnitud de la operación y los múltiples factores operacionales y ambientales que pueden influir es un margen aceptable de error. En la Figura 6 se puede observar que el error del modelo predictivo de recuperación se incrementa en las franjas (F113 a F117) con mayor contenido de CuT para franjas de 1 piso.

Las Figuras que corroboran el ajuste del modelo para las franjas de 2 y 3 pisos se adjuntan en anexos¹¹. Así también, se anexan los gráficos de correlación del error del modelo predictivo y la ley de cobre para pisos superiores¹².

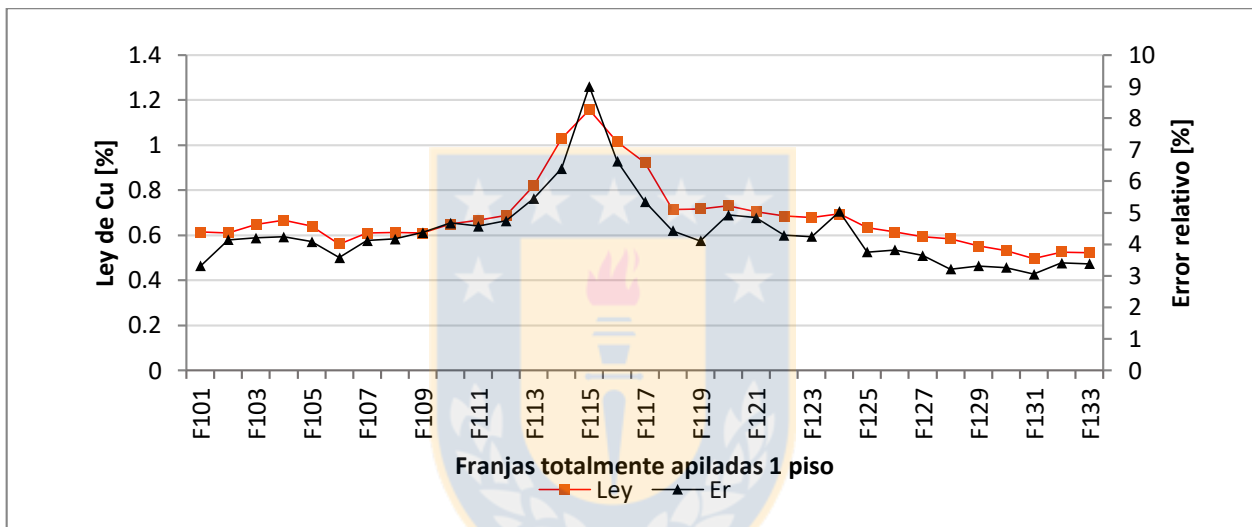


Figura 6.- Gráfico de CuT [%] y error relativo [%] de modelo predictivo.

Si bien es cierto que el modelo predictivo presenta errores, sobre todo en las franjas con mayor contenido de cobre, se observa que en el 97.7% de los casos el modelo predice una extracción mayor a la extracción real durante ese período. Más claro, si durante un período de tiempo de x días se extraen y [t] de cobre, el modelo generalmente habría predicho una extracción de donde $a > 0$. Debido al efecto de las numerosas variables del proceso, la recuperación real se ve mermada y usualmente no alcanza los valores predichos por el modelo.

Aun así, el cálculo del volumen de oxígeno es obtenido a partir del modelo predictivo y aun cuando este cálculo podría no ser exacto, será en el 97.7% de los casos mayor o ligeramente mayor al requerimiento de oxígeno real de la franja, asegurando así que el O_2 no sea el reactivo limitante del proceso de lixiviación.

¹¹ Anexos E.4.

¹² Anexos E.5.

En la Figura 7, se muestra la distribución mineralógica por especie mineralógica de cobre para franjas de 1 piso, además se exhibe el contenido de pirita para cada franja. De la misma forma que para el caso anterior los gráficos de distribución de minerales sulfurados de cobre y contenido de pirita para franjas de 2 y 3 pisos se adjuntan en anexos¹³.

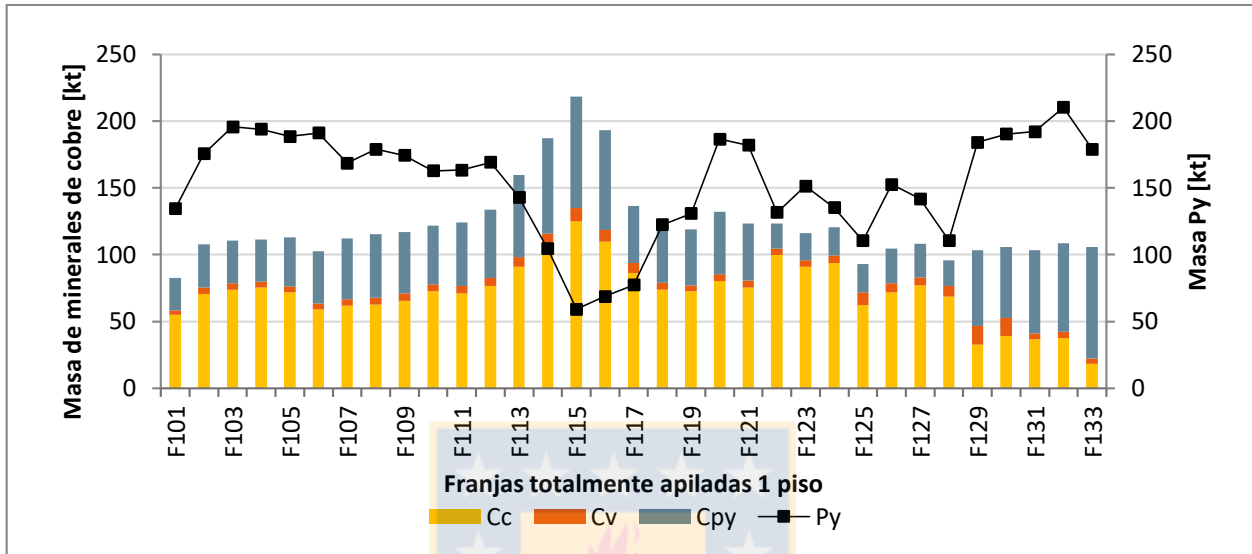


Figura 7.- Masa de especie mineralógica por franja totalmente apilada de 1 piso.

La recuperación por especie mineralógica se obtiene del modelo Río Tinto. En Figura 8 se puede observar el comportamiento de la recuperación de cada especie mineralógica presente en la pila según el modelo.

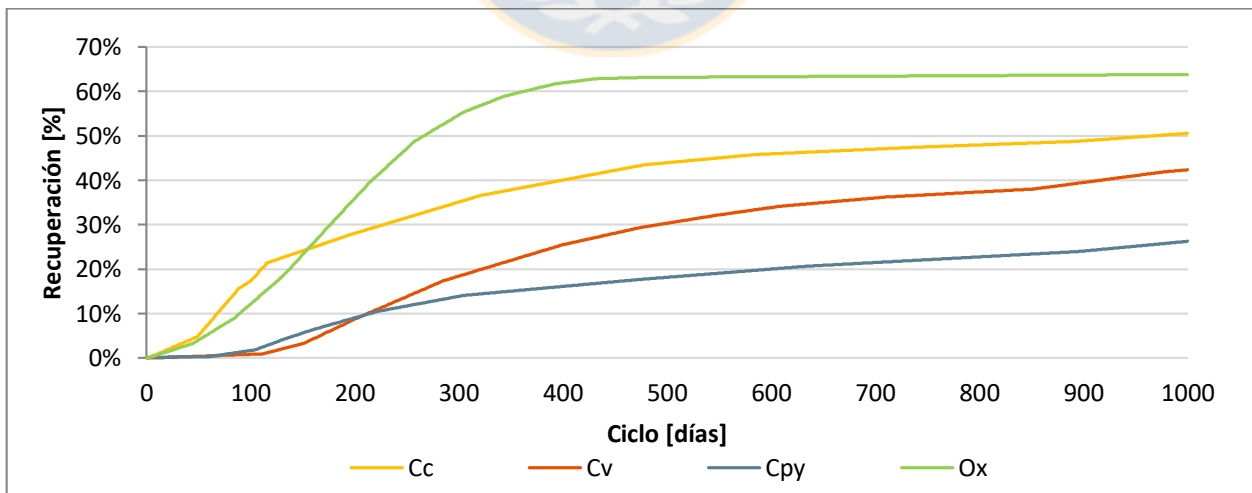


Figura 8.- Modelo de recuperación simplificado de Río Tinto por especie mineralógica.

¹³ Anexos E.6.

A partir de estos antecedentes es posible estimar mediante un balance estequiométrico de oxígeno, el volumen en MNm^3 que requirió cada franja durante su ciclo de lixiviación. La Figura 9 muestra el requerimiento de oxígeno por franja en MNm^3 , este volumen de oxígeno corresponde al requerido por cada franja durante todo su ciclo de lixiviación.

Se trabajó en correlacionar el consumo de oxígeno con los parámetros metalúrgicos más importantes sin embargo mostró no tener relación gráfica con la ley de cobre [%], el cobre total [t] o la distribución de minerales de cobre [%]. Distinto fue el caso de la ley de pirita, en la Figura 9, se muestra además la relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita de cada franja totalmente apilada para franjas de 1 piso.

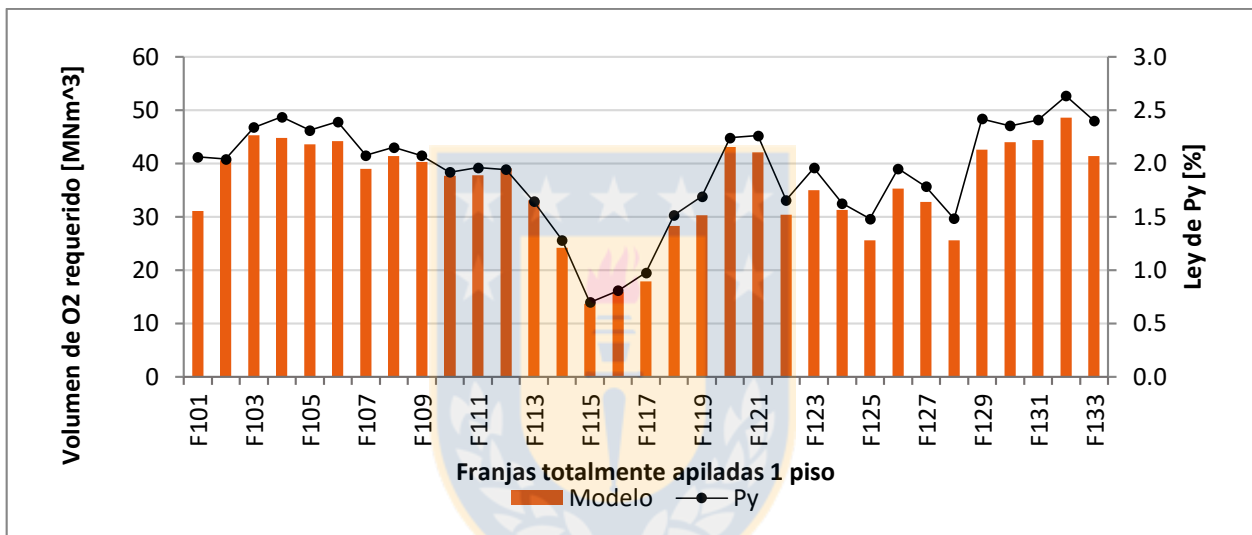


Figura 9.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 1 piso.

Se verifica que para franjas de 18 [m] existe una evidente relación entre el requerimiento de oxígeno y la ley de pirita del mineral de cabeza. Esto entrega una importante oportunidad para la operación, donde por primera vez se podrá trabajar en un manual de operación del sistema de aireación que permita conocer en que franjas la aireación desarrollará un rol más preponderante. Esto es replicable en todas las operaciones de lixiviación bacteriana de sulfuros donde los recursos de aireación son limitados y se debe privilegiar la aireación en una u otra zona de la pila.

A continuación se exhiben los resultados del consumo de oxígeno de acuerdo al balance estequiométrico para los pisos 2 y 3, esto es, para franjas de 36[m] y 54[m] de altura. En la Figura 10 se observa el oxígeno en MNm^3 que requirió cada franja de 2 pisos durante su ciclo de lixiviación, esto, en función del modelo de recuperación y asumiendo el mecanismo de lixiviación indirecto en medio férrico, además se puede observar la estrecha relación entre el oxígeno requerido y la ley de pirita.

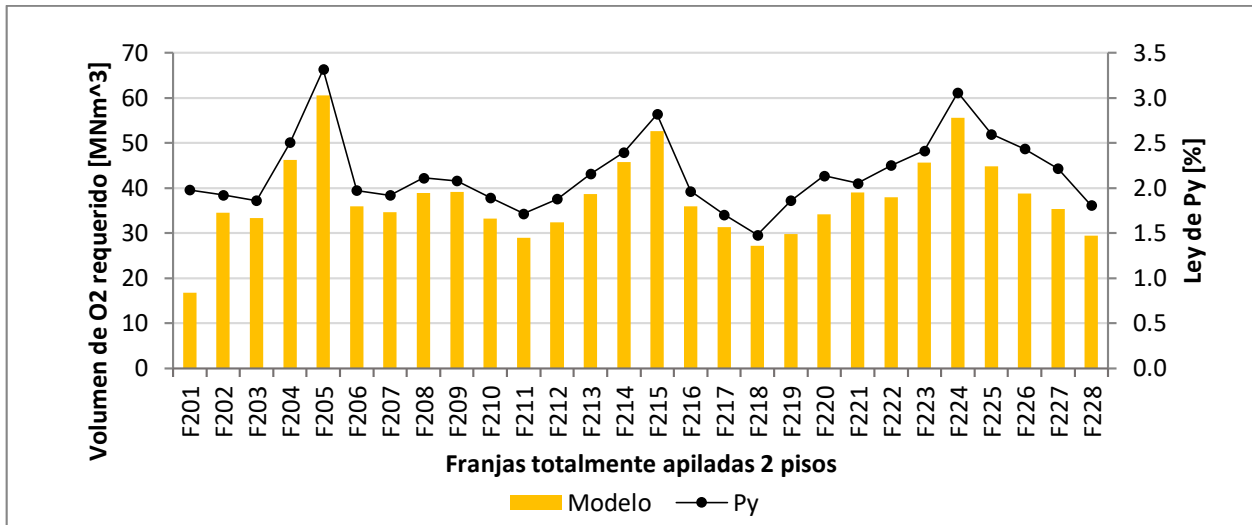


Figura 10.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 2 pisos.

La Figura 11 al igual que las Figuras 9 y 10, muestra el oxígeno que requiere cada franja, esta vez de 3 pisos, para el ciclo de lixiviación, además se observa nuevamente la relación entre el consumo de oxígeno y la ley de pirita.

Se corrobora el efecto de la ley de pirita sobre el requerimiento de O_2 . Se observa que, a mayor contenido de pirita, aumenta el requerimiento de oxígeno, ese hallazgo tiene base teórica considerando que el mecanismo de lixiviación se sustenta en la conservación de niveles elevados de ion férrico en solución y, por lo tanto, una constante producción del ion férrico. Las franjas que mayor contenido de pirita tengan aportarán al sistema una mayor cantidad de iones Fe^{2+} de acuerdo a la ecuación 2.19 y según información entregada por la misma ecuación 2.19 esas franjas requerirán más oxígeno que las franjas menos ricas en pirita.

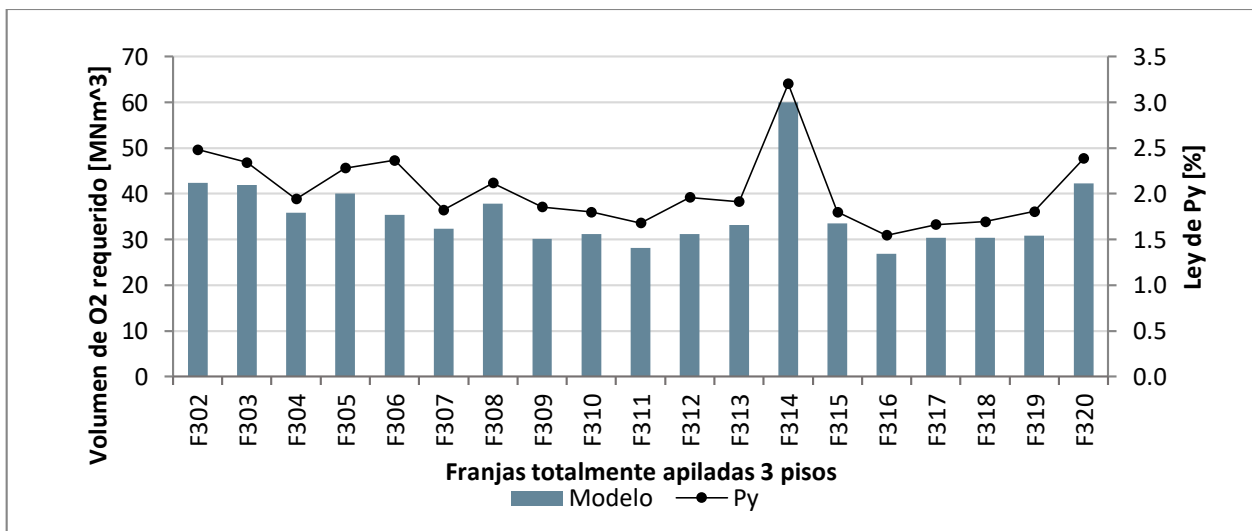


Figura 11.- Relación del requerimiento de oxígeno con la ley de pirita para franjas de 3 pisos.

4.2. ANÁLISIS DEL SUMINISTRO REAL DE AIRE

Los datos operacionales realizan un seguimiento al volumen de oxígeno suministrado realmente al sistema de lixiviación por día a cada una de las franjas. Estos antecedentes permiten la construcción de las Figuras 12, 13 y 14 que entregan un acercamiento a la eficiencia del sistema de aireación.

En la Figura 12 se observa como el aire suministrado mediante sopladores no sigue una tendencia clara ni se verifica relación alguna con el volumen de oxígeno requerido. Es más, es posible aseverar que se suministra de acuerdo a los recursos disponibles (sopladores en buen estado, medios para el transporte de los sopladores, conexiones a la red eléctrica, etc.) y que no sigue ningún patrón evidente. Esta falta de control operacional explica por qué la eficiencia del sistema de aireación sigue una curva tan variable con valores del 15.56 al 77.05%.

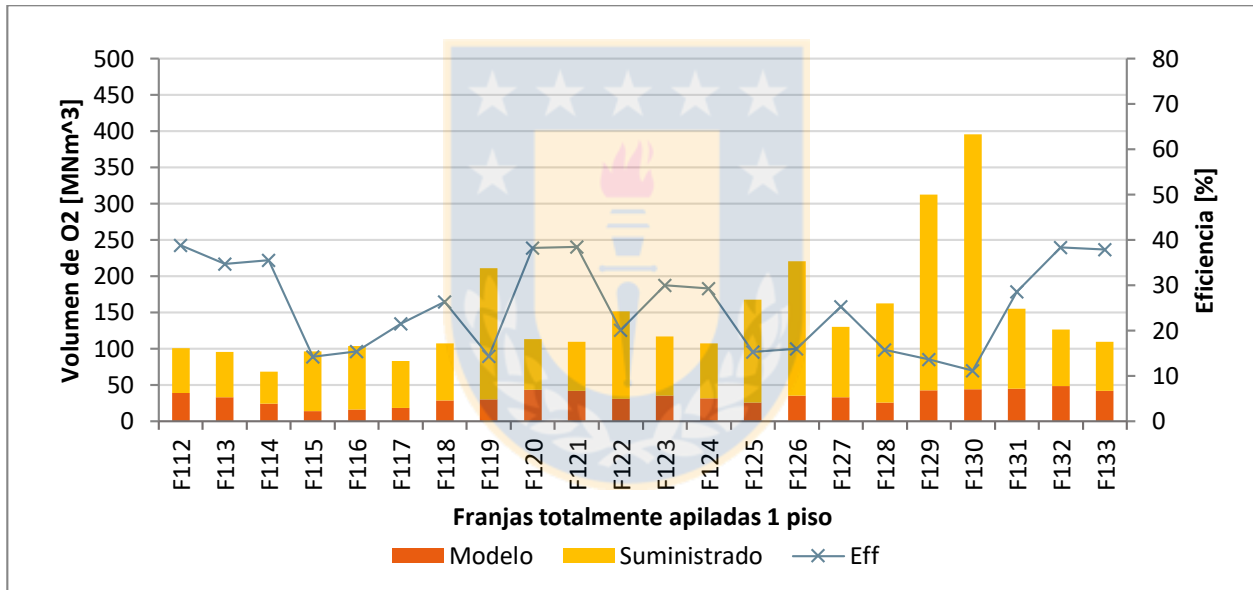


Figura 12.- Volúmenes de oxígeno requerido y suministrado real. Eficiencia del sistema de aireación para franjas de 1 piso.

Las Figuras 13 y 14, confirman lo comentado respecto a la información sustraída de la Figura 12. No se verifica la aplicación de una filosofía de aireación, por el contrario, se puede visualizar un accionamiento aleatorio del sistema de aireación que responde más bien al estatus mecánico de los componentes de la red (estado de los sopladores) y que hace que tanto el flujo de aire suministrado al sistema, así como la eficiencia (ec. 2.28) sean valores imposibles de predecir.

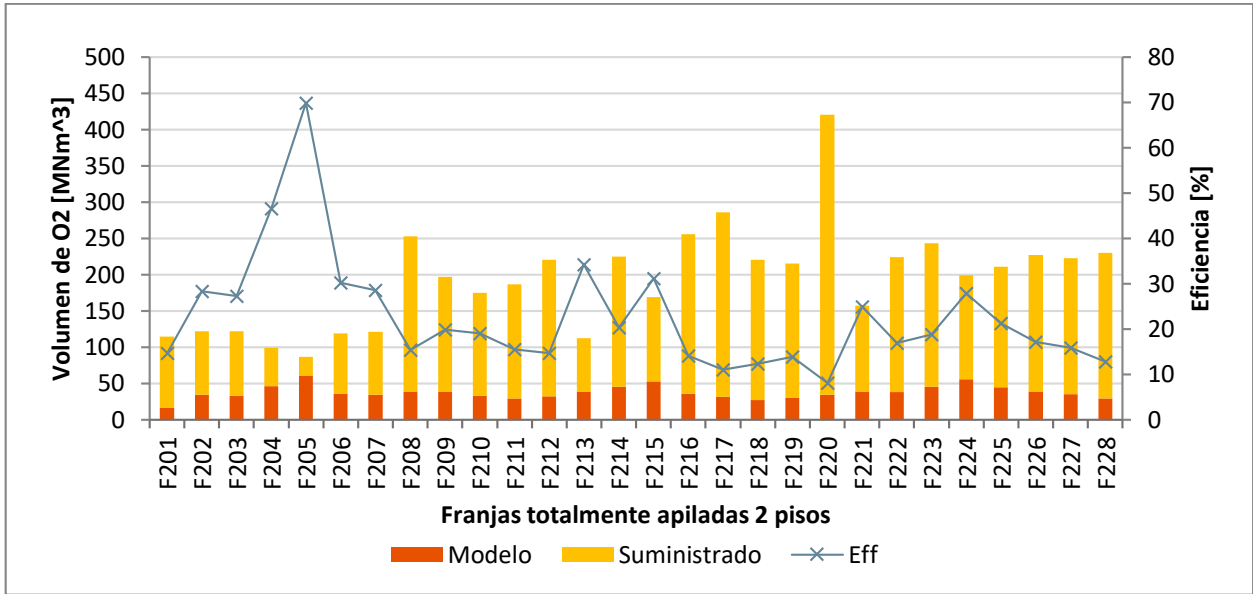


Figura 13.- Volúmenes de oxígeno requerido y suministrado real. Eficiencia del sistema de aireación para franjas de 2 pisos.

La Figura 14 muestra el volumen en MNm^3 suministrados en forma real y el volumen de oxígeno requerido según el modelo de recuperación, se verifica que las franjas de 3 pisos son, en relación con las franjas de 1 y 2 pisos, las que poseen una eficiencia más baja pero menos dispersa.¹⁴

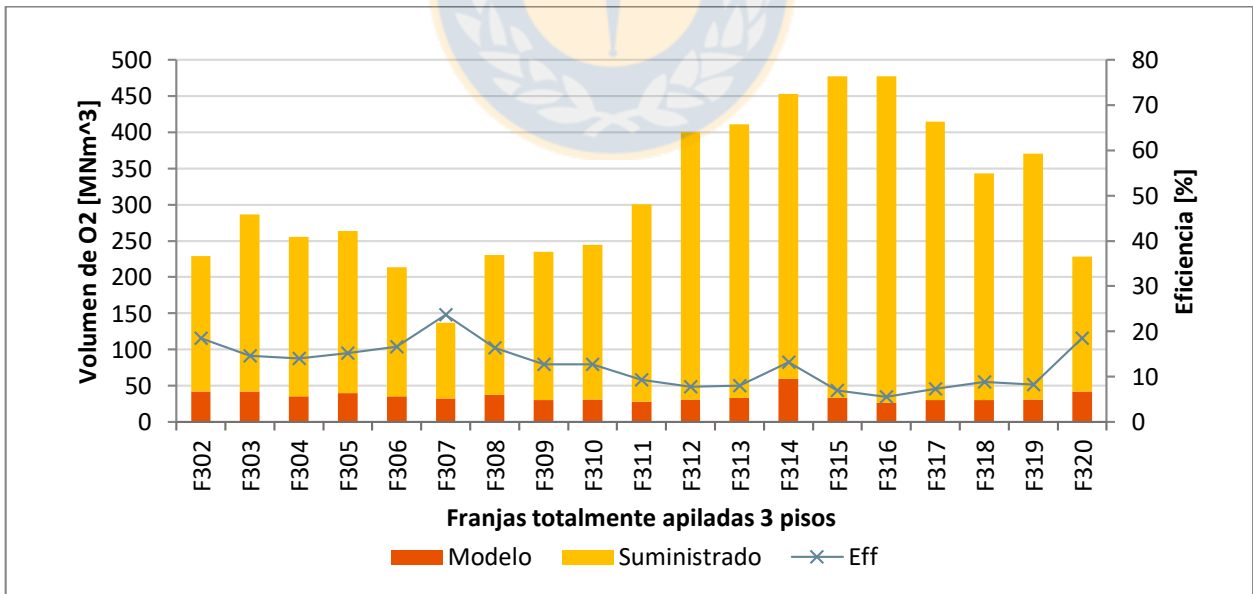


Figura 14.- Volúmenes de oxígeno requerido y suministrado real. Eficiencia del sistema de aireación para franjas de 3 pisos.

¹⁴ Las tablas que permiten la elaboración del gráfico de eficiencia se muestra en anexos D.7.

Otro aspecto valioso al que se tiene acceso es la tasa de aireación para cada franja bajo riego efectivo. Las Figuras 15, 16 y 17 muestran el resultado del cálculo de la tasa de aireación real promedio utilizada en las franjas de 1, 2 y 3 pisos durante todo el ciclo de riego. Para la elaboración de estas figuras se introduce el valor de la tasa de aireación de diseño igual a $0.612 \text{ Nm}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Este valor es obtenido de la Tabla 13, anexo B.9.

La Figura 15 muestra la tasa de aireación real y la tasa de aireación de diseño. Se verifica que, para franjas de 1 piso, a excepción de la franja F130, nunca se alcanzó la tasa de diseño. Esta conducta operacional es reiterativa y reafirma la teoría del descontrol de la operación respecto a la filosofía de aireación.

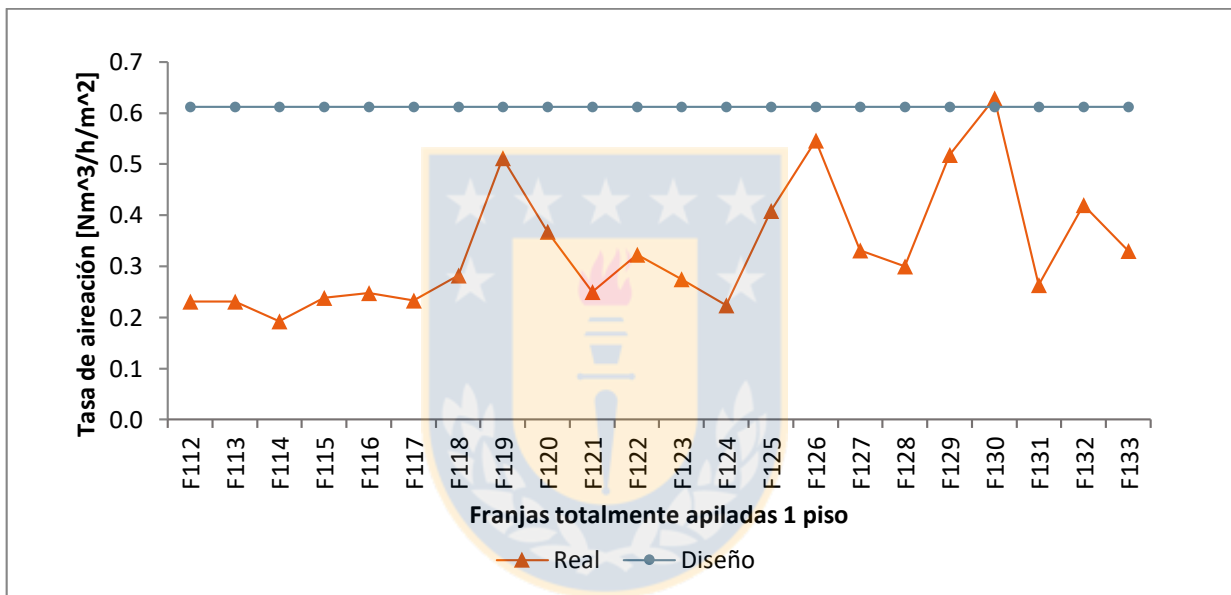


Figura 15.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 1 piso.

En las Figuras 16 y 17, se verifica nuevamente una tasa de aireación real por debajo de la tasa de diseño, lo que podría afectar el rendimiento del proceso de lixiviación.

Es válido destacar que la tasa de diseño es fija y no presenta ninguna modificación frente a la variabilidad de antecedentes geometalúrgicos u operacionales. Se puede mencionar que el suministro de aire en ningún caso responde al modelo predictivo o cumplimiento de alguna filosofía, se demuestra que es aleatorio, ya que no se comprueba la existencia de ningún patrón en la aplicación de la técnica.

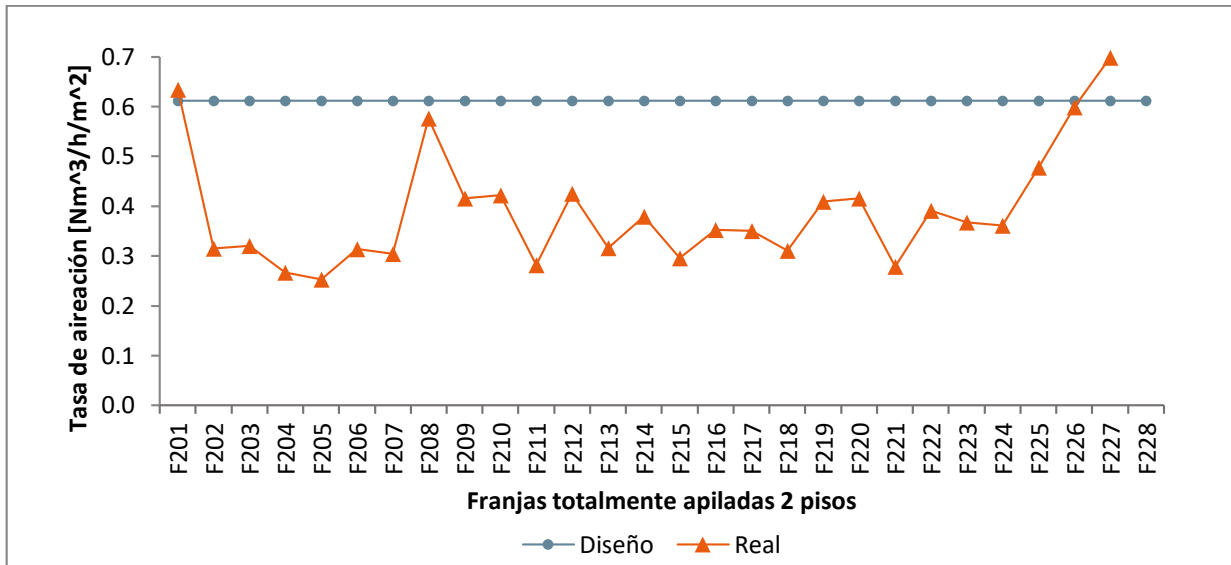


Figura 16.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 2 pisos.

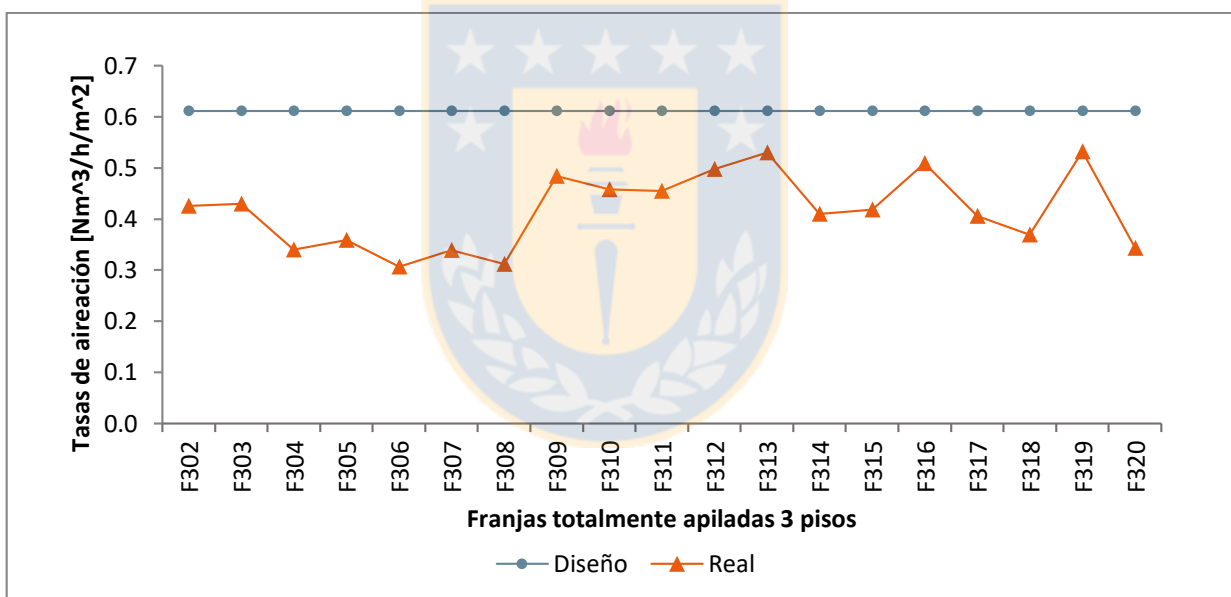


Figura 17.- Tasas de aireación real y de diseño para franjas de 3 pisos.

A continuación, se presenta el efecto de la tasa de aireación en la recuperación de cobre acumulada por período. Se consideran 4 períodos de 50 días para analizar los primeros 200 días del ciclo de riego. Para este propósito, se seleccionan 4 franjas (*F118*, *F119*, *F120* y *F121*) por poseer mineralogías muy similares, esto es, con un error relativo porcentual máximo de 4.76% respecto a la media del conjunto seleccionado.

La Figura 18 muestra la distribución mineralógica para minerales de cobre para las franjas de la *F118* a la *F121*, en ella se verifica que poseen una mineralogía bastante similar y no se observan grandes desviaciones de la media de la muestra. Es entonces admisible exhibir la

recuperación acumulada de las franjas F118, F119, F120 y F121 en función de la tasa de aireación real para cada franja antes mencionada. Se construyen 4 Figuras, una para cada período de 50 días hasta el día 200 para estudiar la relación entre la recuperación acumulada de cobre y la tasa de aireación.

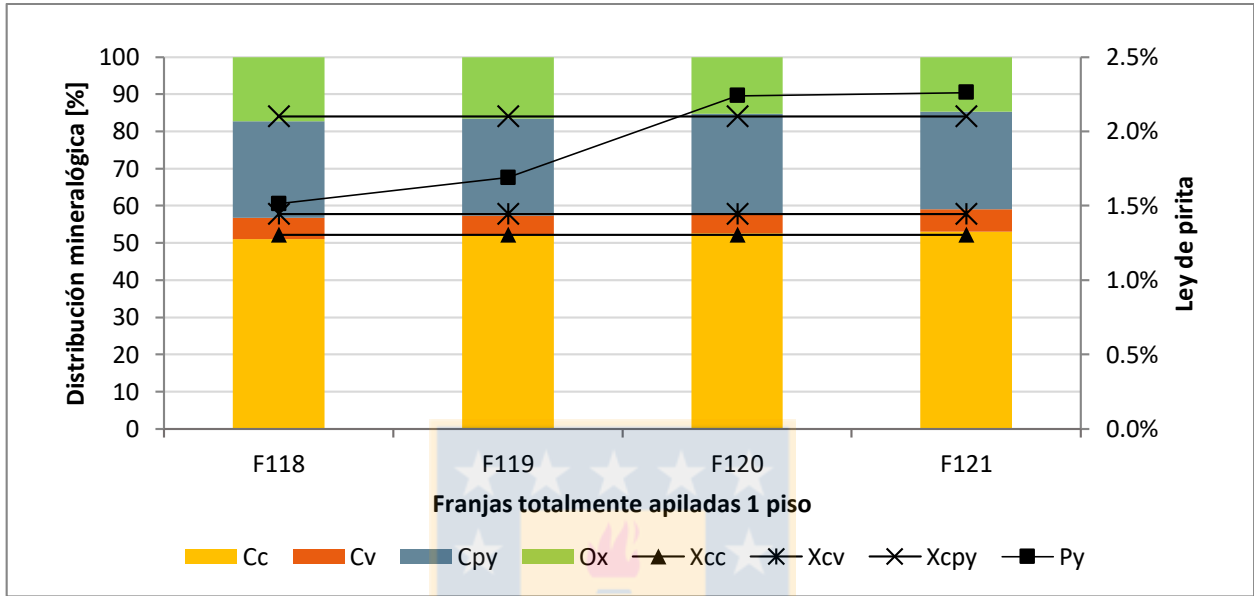


Figura 18.- Distribución mineralógica para franjas 118, 119, 120 y 121.

En la Figura 19, se puede apreciar una relación entre la recuperación del periodo (día 1 al día 50) y la tasa de aireación utilizada durante dicho periodo. Las Figuras de la 19 a la 22 abren una ventana al desarrollo de un estudio que permita correlacionar de forma veraz la recuperación acumulada con la tasa de aireación implementada.

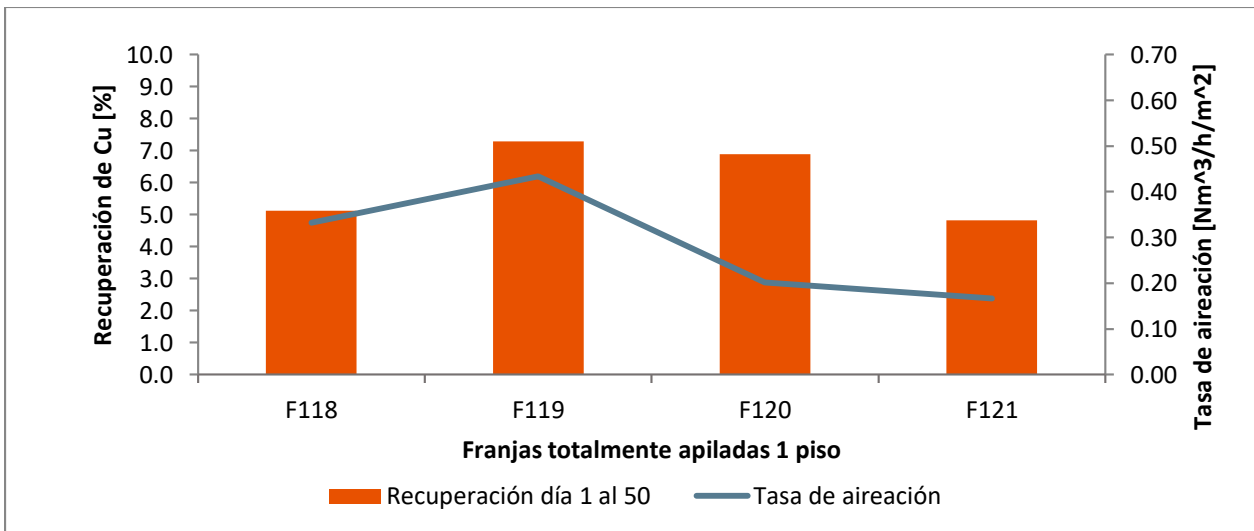


Figura 19.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 1 a 50 días del ciclo.

La Figura 19 muestra una relación entre la recuperación de cobre y la tasa de aireación suministrada utilizada para la aireación de cada franja. Se observa que al día 50 de riego, la franja que mejor desempeño presenta es coincidentemente la que tiene mayor tasa de aireación.

La Figura 20, muestra los mismos antecedentes, pero para el periodo del día 51 al día 100 del ciclo de riego, Sin embargo, ya no se verifica la misma condición que en la Figura 19. En este caso la franja que presenta mayor recuperación durante el periodo no es precisamente la que posee mayor tasa de aireación. A pesar de lo anterior, en 3 de las 4 franjas estudiadas aún se observa una tendencia que relaciona la recuperación de cobre con la tasa de aireación suministrada a la franja en cuestión.

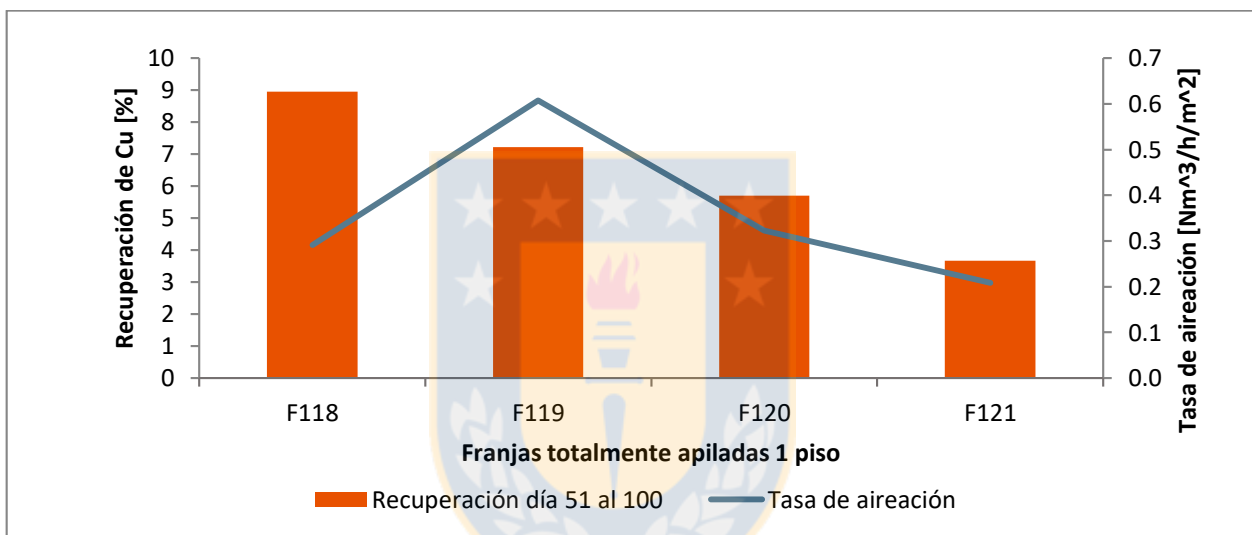


Figura 20.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 51 al 100 días del ciclo.

Las Figuras 21 y 22 muestran resultados similares a los expuestos en la Figura 19. La Figura 21 exhibe el comportamiento de la recuperación y la tasa de aireación suministrada para el período entre los días 101 y 150 mientras que la Figura 22 muestra el periodo entre los días 151 y 200. En ambos casos se observa la tendencia del período inicial del ciclo de riego (primeros 50 días), donde las franjas presentan mayor recuperación a mayor tasa de aireación y menor recuperación en los casos donde la tasa de aireación es más baja.

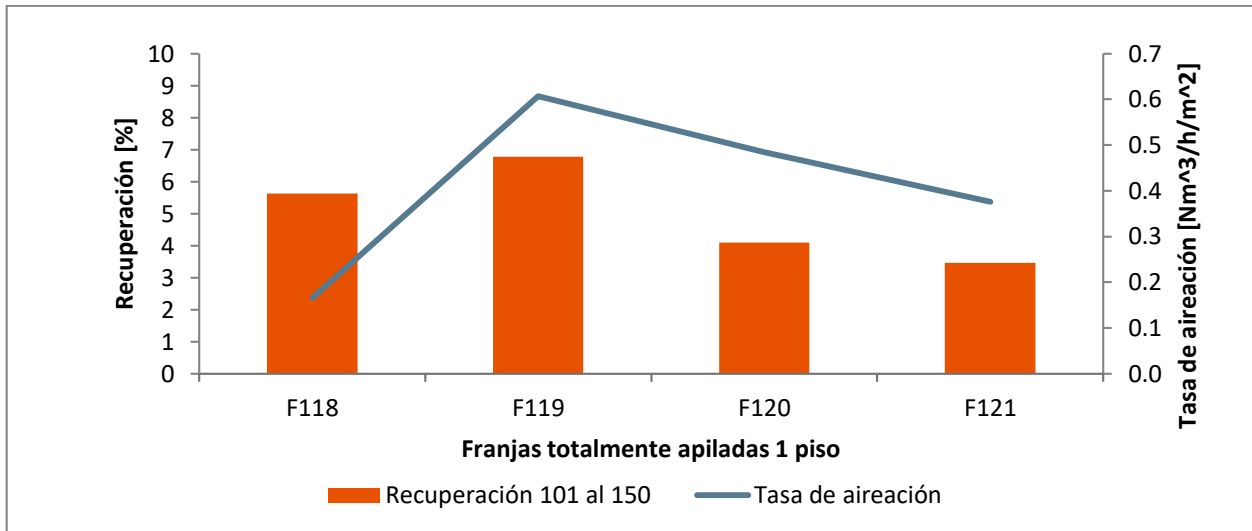


Figura 21.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 101 al 150 días del ciclo.

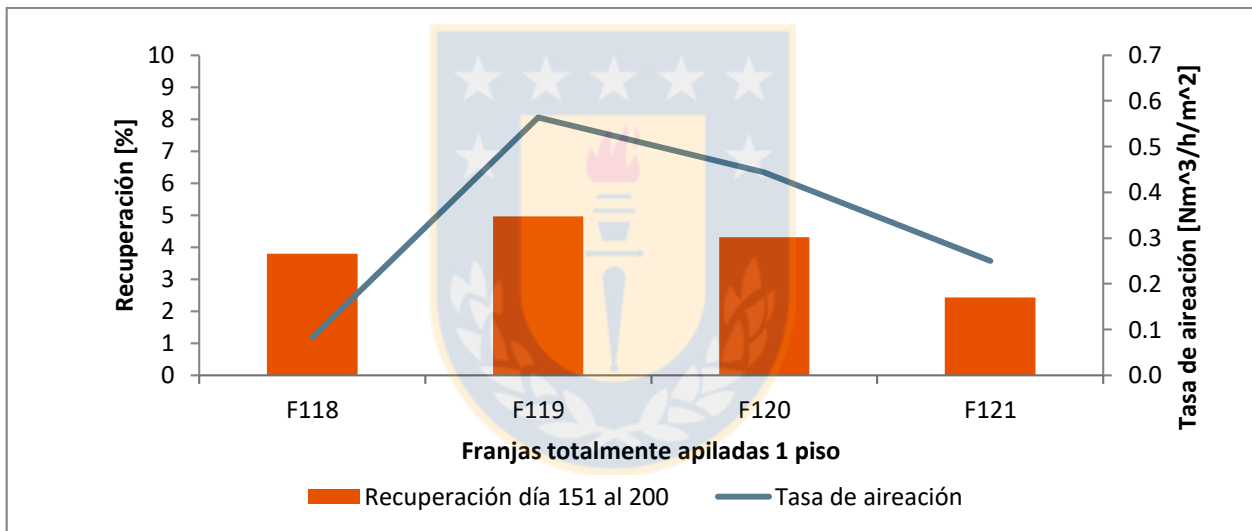


Figura 22.- Recuperación acumulada y tasa de aireación para el período 151 al 200 días del ciclo.

4.3. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y PERFIL DE TEMPERATURA

Los factores más relevantes para una adecuada lixiviación bacteriana en medio férrico son principalmente el potencial redox expresado en $[mV/ENH]$, la acidez de la solución de riego, medida directamente con pH-metro, la concentración de oxígeno gaseoso expresada en $[\%]$ y la temperatura del lecho expresada en $[^{\circ}C]$. Estas dos últimas variables son de especial interés para Minera Escondida Limitada, ya que, salvo fases de estudio en las etapas de pre-factibilidad y factibilidad de proyectos se desconocen sus mediciones y el impacto en el proceso.

Las figuras que muestran el perfil de concentración de oxígeno y temperatura en función de la profundidad del sondaje se obtuvieron mediante mediciones en terreno a través de los equipos previamente descritos en la sección 3.2.

4.3.1. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y PERFIL DE TEMPERATURA PARA LAS FRANJAS SIN AIREACIÓN

La Figura 23, muestra cómo se comporta la concentración de O_2 en el lecho de la pila expresado en $[\%]$ para las franjas F009 (F109, F209, F309 y F409) cuando el apilado se encuentra sin riego y con el sistema de aireación desconectado. La Figura 26 se construyó a partir del promedio de 15 mediciones puntuales independientes en iguales horarios y similares condiciones climáticas.

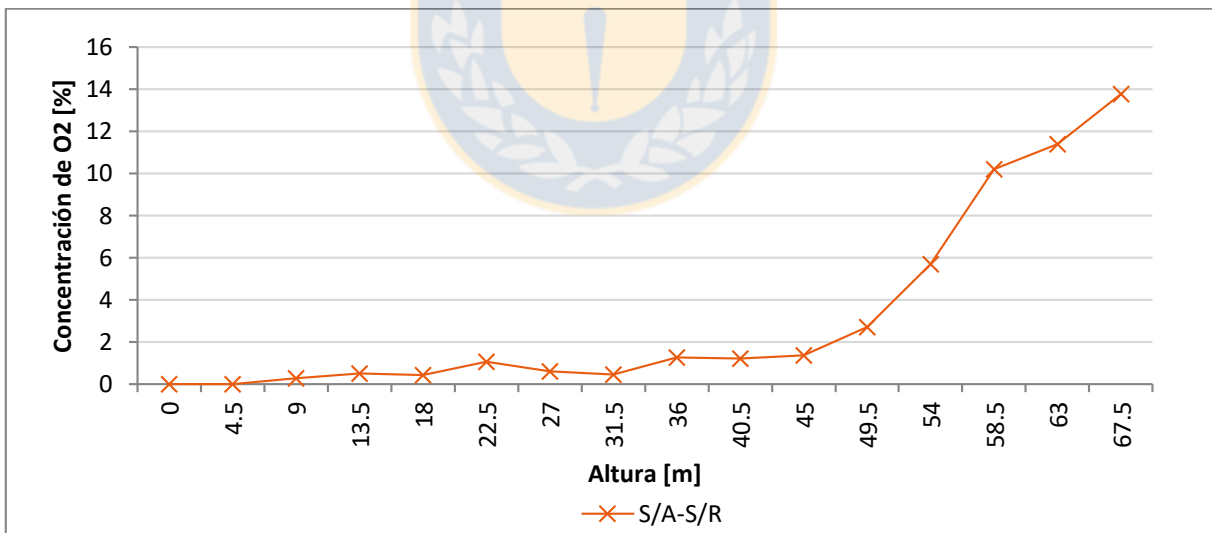


Figura 23.- Concentración de oxígeno a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación.

El eje de las abscisas muestra la altura de la pila donde el último punto de la derecha (67.5, 13.7) es la medición reportada por el sensor ubicado a mayor altura, esto es, 4.5 $[m]$ bajo la corona de la franja. De ahí hacia la izquierda, los puntos muestran la concentración de oxígeno a medida que se penetra en la pila hasta llegar los 9 $[m]$ de altura respecto a la base real.

Se verifica que a medida que se profundiza en la pila la concentración de oxígeno disminuye hasta extinguirse. Esta situación acusa un consumo de oxígeno provocado por algún fenómeno químico. La explicación más probable, es que la humedad residual de la pila (9%) sea la causante de seguir generando reacciones de lixiviación. La humedad dinámica, según sondajes, alcanza entre un 11% y un 12% mientras que la humedad estática de la pila permanece entre un 8% y un 9%, a pesar de no estar en riego. La solución que se almacena en la pila junto con la mena residual pueden ser los responsables del consumo de oxígeno, además, las enormes dimensiones de la pila dificultan el ingreso de gases al lecho, lo que respalda la teoría de una prácticamente nula circulación del aire por lo que el oxígeno estaría comportándose como un reactivo limitante en la lixiviación de los minerales residuales. Este fenómeno explicaría el por qué el oxígeno es consumido obteniéndose una mezcla gaseosa al interior de la pila con una composición de menos del 1.0% de oxígeno en los niveles inferiores.

La Figura 24 por otro lado, muestra el perfil de temperatura vertical para las franjas F009 para las mismas condiciones, esto es, cuando las franjas se encuentran sin riego y sin aireación artificial.

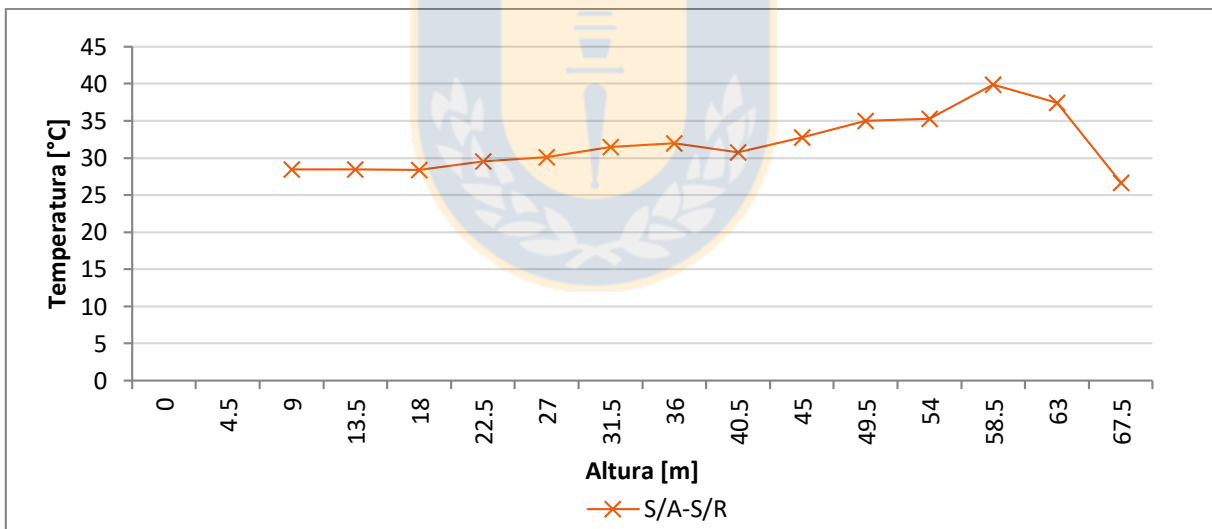


Figura 24.- Perfil de temperatura a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación.

En la Figura 24 se observa (de derecha a izquierda) que la temperatura del sensor ubicado a mayor altitud presenta la menor temperatura, este fenómeno se debe a la cercanía de dicho sensor con la corona de la pila (4 [m]) donde por ende se encuentra más expuesto a la temperatura atmosférica. Conforme se desciende en forma vertical (hacia la izquierda del gráfico), la temperatura aumenta considerablemente alcanzando los 39.91 °C a los 58.50 [m]. De ahí en más, la temperatura comienza a disminuir hasta estabilizarse en los 27 °C. Este aumento significativo de la temperatura se localiza entre la corona del piso 3 y la zona media del piso 4.

Tal como se comentaba anteriormente en relación a la humedad estática, es muy posible que aún sigan ocurriendo reacciones de lixiviación en el interior de la pila con los recursos residuales que quedan luego de su etapa de abandono. En este sentido, la zona donde ocurrirán con mayor probabilidad las reacciones será donde quede la mayor cantidad de mena y esto ocurre en la última franja cargada debido a que ha experimentado únicamente un ciclo de riego, mientras que el piso 3 ha sido regado en 2 ocasiones, el piso 2 en 3 y el piso 1 ha sido sometido a 4 ciclos de riego de más de 500 días cada uno. Es de esperar, lógicamente que el mayor aporte de las franjas antiguas provenga de aquellas que tienen más cantidad de cobre residual y es allí donde se espera la mayor cantidad de reacciones. En otras palabras, la temperatura aumenta en las franjas que poseen mayor cantidad de cobre residual (aquellas que han sido menos regadas) debido a la exotermicidad de las reacciones de lixiviación que allí tienen lugar. Esta interpretación entrega una respuesta acertada respecto al aumento de temperatura y la baja concentración de oxígeno.

4.3.2. CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO Y PERFIL DE TEMPERATURA PARA LAS FRANJAS CON AIREACIÓN

Adicionalmente realizan mediciones para la confección de ambos perfiles (concentración de O_2 y temperatura) cuando la pila se está aireando mediante el sistema de aireación a diferentes tasas. Específicamente se estudia el comportamiento de estas variables para $0.21 [Nm^3/h/m^2]$, $0.41 [Nm^3/h/m^2]$ y $0.62 [Nm^3/h/m^2]$, tasas que corresponden al aire suministrado por 2, 4 y 6 sopladores respectivamente.

La Figura 25 muestra la concentración de oxígeno a diferentes alturas del lecho durante un ciclo de aireación de $0.21 [Nm^3/h/m^2]$ es decir el flujo suministrado por la acción de 2 sopladores.

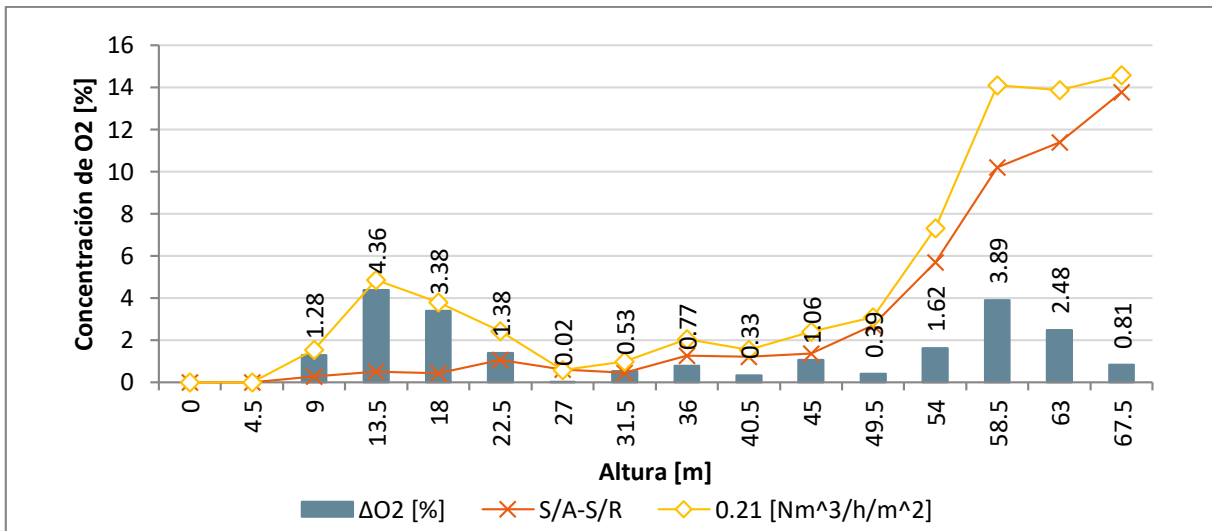


Figura 25.- Concentración de oxígeno gaseoso a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación y para el caso de aireación mediante 2 sopladores.

En el gráfico se puede observar que, a excepción de un punto de muestreo, todos los demás experimentan un aumento en la concentración de oxígeno, este aumento es especialmente considerable en la base del apilado (13.5 [m]) y en el piso 4 (54 [m]). Tal como se señalan en 2.5.3. en la franja F409 está implementado el sistema de aireación intermedio, que permite que la corriente de soplado se divida en dos flujos, uno direccionado a la base del piso 1 y otro direccionado a la base del piso 4. En ese escenario es admisible afirmar que el mayor aumento de concentración debiese darse en los puntos más cercanos a la zona de inyección de oxígeno, esto es a los 9 [m] y 54 [m] de altura.

Adicionalmente se observa que el flujo de aire suministrado mediante la red de aireación intermedia en la base del piso 4, muestra una distribución bastante homogénea a medida que asciende hacia la corona de la pila. Situación que no ocurre en el nivel inferior probablemente debido a una mayor compactación del lecho producto del prolongado tránsito de camiones de extracción durante las etapas de apilado de mineral.

En la Figura 26 se observa la curva original de perfil de temperatura y el nuevo perfil para el caso de aireación mediante dos sopladores. Se verifica en la Figura una variación significativa en la temperatura en dos zonas específicas de la altura del lecho. En primer lugar, entre los 9 [m] y 18 [m] de altura se constata una disminución de temperatura de hasta 1.29 °C (13.5 [m]), este fenómeno ocurre debido a la combinación de dos eventos, uno, el ingreso de aire frío mediante los ductos de aireación que bajan la temperatura del lecho, sumado a una inexistente o muy baja cantidad de cobre soluble disponible para llevar a cabo las reacciones de lixiviación. Además, todo el piso 3 y parte del piso 4 muestran un incremento en la temperatura del lecho de hasta 3.08°C (40.5 [m]).

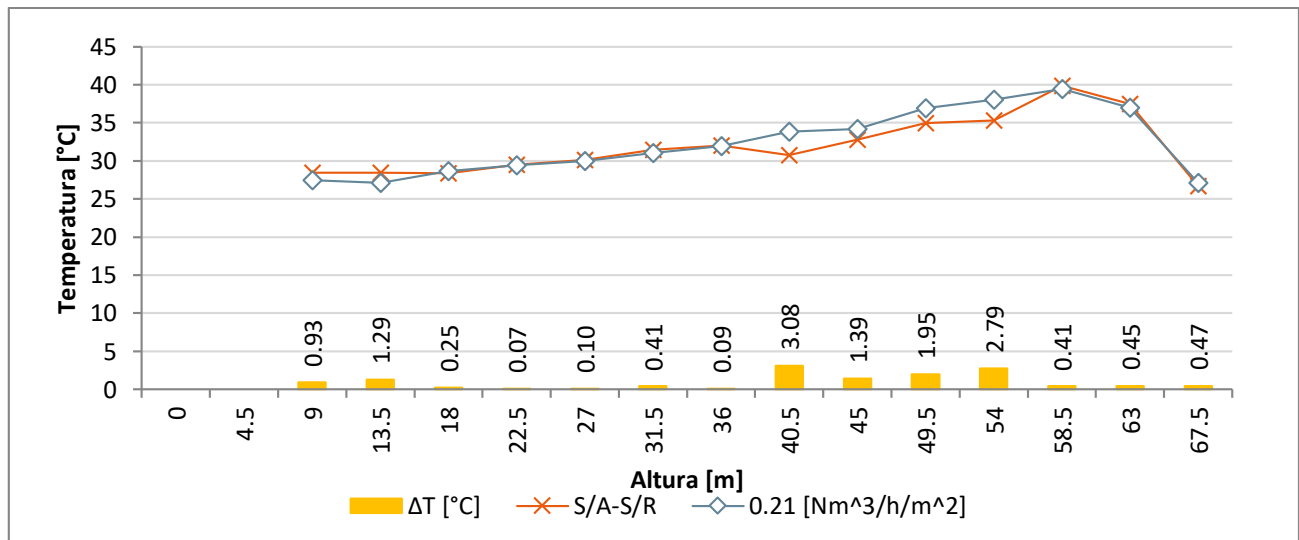


Figura 26.- Perfil de temperatura a distintas profundidades de la pila para el caso sin aireación y para el caso de aireación mediante 2 sopladores.

Este hallazgo está relacionado al incremento de oxígeno molecular en esa zona, que al estar disponible en mayor concentración provoca que acontezcan las reacciones de la 2.19 a la 2.27.

La Figura 27 muestra cómo evoluciona la concentración de oxígeno al interior de la pila cuando se incrementa la tasa de aireación de 0.21 a 0.42 [$Nm^3/h/m^2$], esto es, de 2 a 4 sopladores. Salvo una leve disminución de la concentración en la zona baja de la pila y un muy leve incremento en la zona media y la corona del piso 4 no se observan mayores variaciones. Es admisible postular que, ante la falta de evidencia de un incremento en la concentración de oxígeno, no existe la permeabilidad necesaria para penetrar el lecho de forma homogénea.

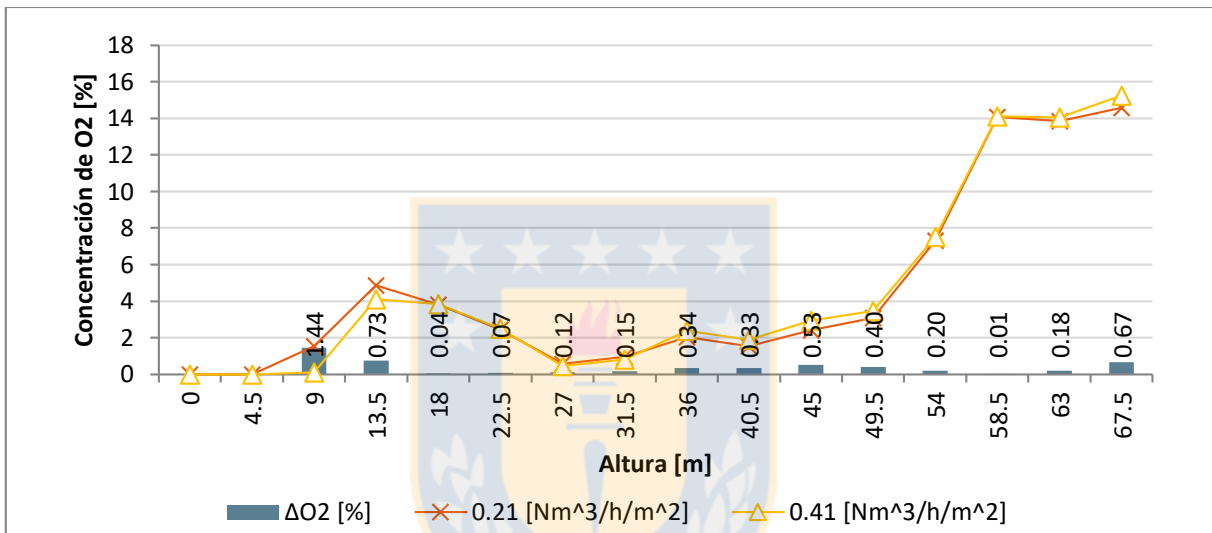


Figura 27.- Concentración de oxígeno gaseoso a distintas profundidades de la pila para el caso de aireación mediante 2 y 4 sopladores.

La Figura 28, refuerza los comentarios respecto a la Figura 27, en ella se puede observar que pese a aumentar la tasa de aireación de 0.41 a 0.62 [$Nm^3/h/m^2$], no se registra un aumento significativo en la concentración de oxígeno al interior de la pila y más relevante aún, pese a que han transcurrido 27 días de aireación ininterrumpida, no es posible evidenciar una distribución homogénea de la mezcla gaseosa al interior del lecho, lo que permite inferir que el aire tiene dificultades para atravesar la permeabilidad del lecho y distribuirse de forma homogénea al interior del apilado.

En las Figuras anteriores (25, 27 y 28), se puede verificar el ingreso de aire al lecho de la pila, sin embargo, se observa que el flujo que aporta el sistema de aireación no basta para elevar la concentración de oxígeno en el interior del lecho a valores cercanos a la concentración atmosférica y que la distribución de oxígeno en la pila es severamente desigual llegando a valores de entre 0%

y 1% de O_2 a los 27[m] de altura y donde la concentración nunca logró elevarse de forma observable y por otro lado alcanzando valores de 14% a los 67.5[m].

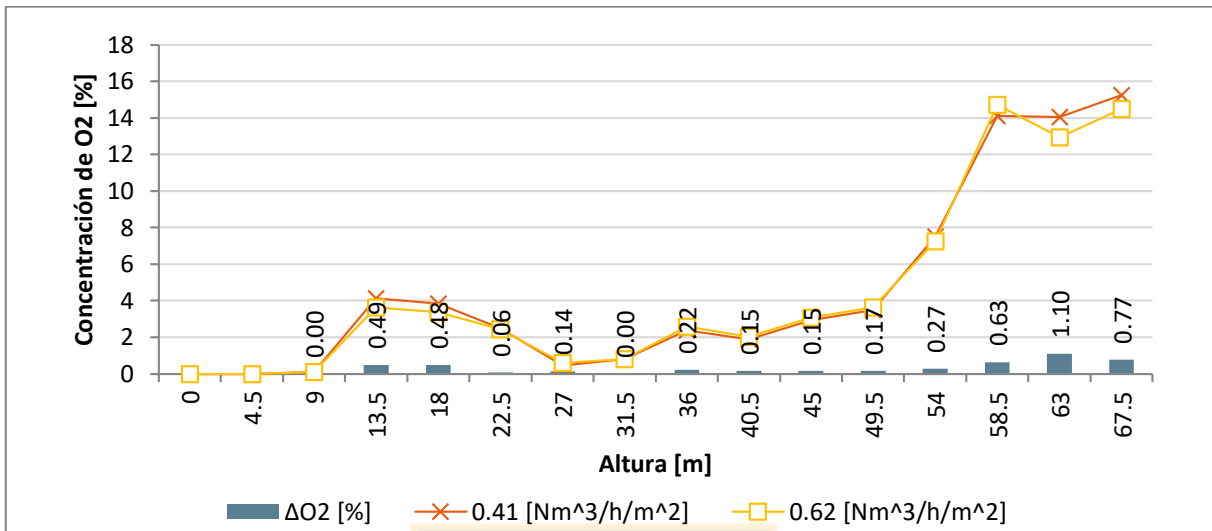


Figura 28.- Concentración de oxígeno gaseoso a distintas profundidades de la pila para el caso de aireación mediante 4 y 6 sopladores.

Las Figuras 29 y 30 estudian la evolución del perfil de temperatura de la pila cuando se airea con 4 y 6 sopladores. En las curvas se puede observar un fenómeno similar al comportamiento de la concentración de oxígeno. No se verifican alteraciones evidentes en la temperatura con respecto al perfil construido con los resultados de la prueba 2 ($0.21[Nm^3/h/m^2]$). Se verifica un perfil relativamente estable sin mayores alteraciones lo que permite afirmar que la aireación no afecta significativamente la temperatura estática de la pila, incluso durante los primeros días del ciclo de aireación no se verifican incrementos o disminuciones con respecto al caso base (sin aireación).

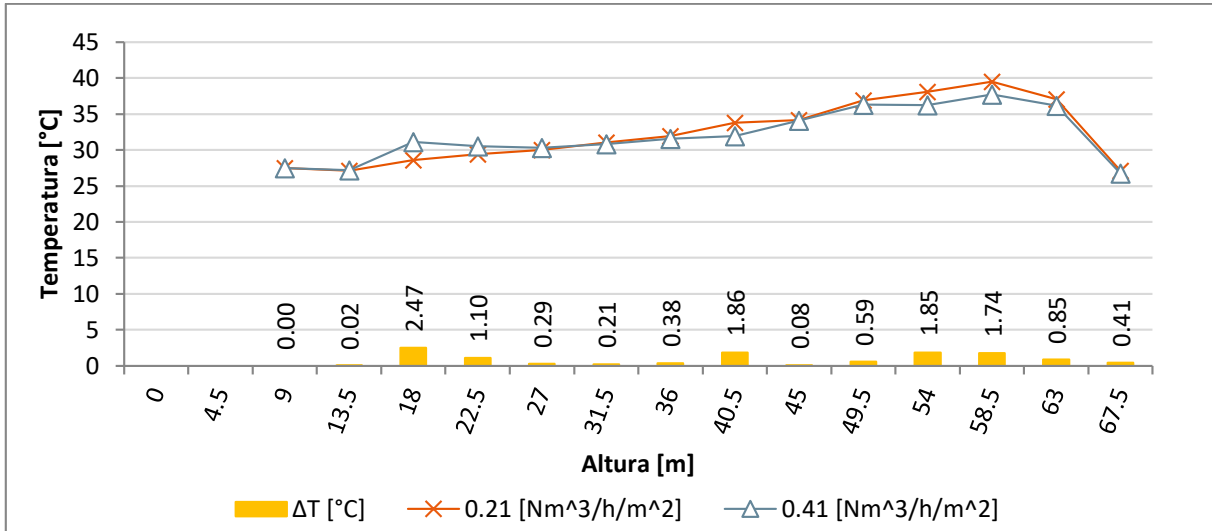


Figura 29.- Perfil de temperatura a distintas profundidades de la pila para el caso de aireación mediante 2 y 4 sopladores.

Por otra parte, se corrobora que la temperatura de la pila es la adecuada para la supervivencia de bacterias mesófilas, sin embargo, es baja para ser hábitat de bacterias termófilas y extremadamente termófilas, lo que explica la baja concentración de células extremadamente termófilas en el estudio de RCP.

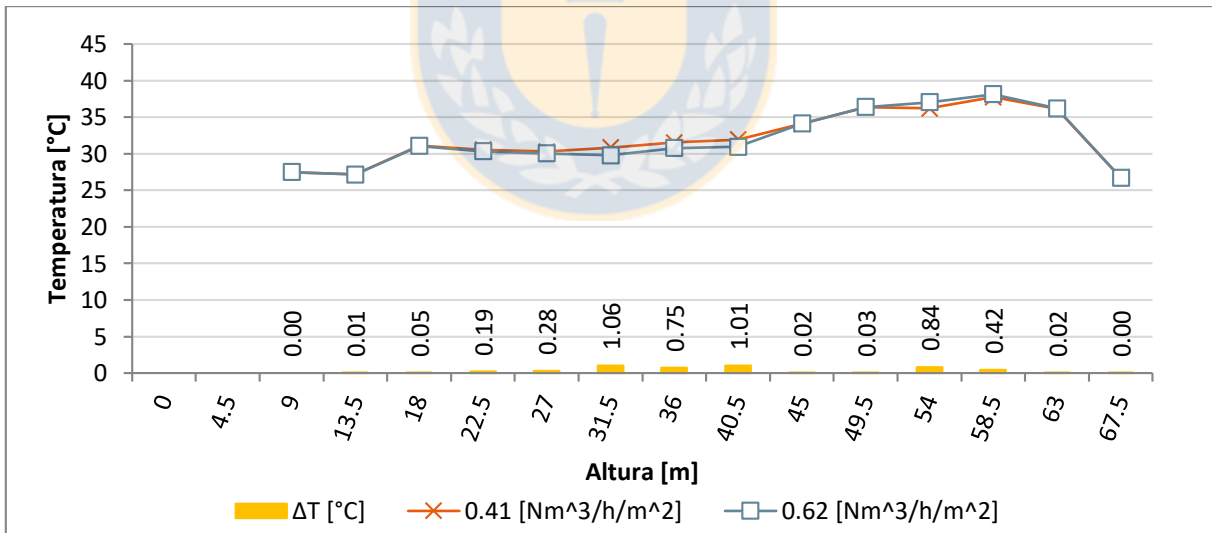


Figura 30.- Perfil de temperatura a distintas profundidades de la pila para el caso de aireación mediante 4 y 6 sopladores.

4.4. EFECTO DE LA AIREACION INTERMEDIA EN FRANJAS DE 72 METROS

En este escenario se obtuvieron datos operacionales que permiten la comparación de las variables metalúrgicas más importantes de franjas que tienen diferentes condiciones de aireación. De los antecedentes analizados cobran principal importancia, la recuperación de cobre de la pila [%], principal variable económica-operacional del área y por otro lado el potencial Eh [mV/ENH] de las soluciones que abandonan las franjas en riego (solución lixiviada), que indica la eficiencia con la que estamos re-oxidando el ion ferroso de la solución a ion férrico y el pH del sistema. Estas dos variables (en conjunto) permiten conocer la especie predominante en el diagrama de Pourbaix para $Cu - Fe - S - H_2O$ y determinar si es o no termodinámicamente favorable la formación de Cu^{2+} en esas condiciones. Estas variables junto con la concentración bacteriana son probablemente las más relevantes de un sistema de biolixiviación en medio férrico.

Para este propósito, se seleccionan las franjas de la $F411$ a la $F416$, debido a que poseen distinta ingeniería de aireación, pero similar mineralogía. Las franjas $F411$, $F412$ y $F413$ tienen dos niveles de aireación tal como se verifica en anexos¹⁵ (la red de aireación basal y una red de aireación intermedia que dirige una corriente de aire a la base del piso 4), para asegurar la llegada de oxígeno a la franja cargada más recientemente. Las franjas de la $F414$ a la $F416$ por otro lado, solo tienen red de aireación basal, ya que por razones de estudio se cargó el piso 4 de mineral sin la implementación de la red de aireación intermedia.

En la Figura 31, se observa la distribución mineralógica de para minerales de cobre de las franjas en estudio para este caso, donde se verifica que poseen similares condiciones mineralógicas. Además, se muestra mediante un eje auxiliar la ley de pirita para cada una de las franjas estudiadas. De aquí en más, es válido suponer que se esperen similares comportamientos en el proceso de lixiviación. Ya que se riegan con una solución de refino que conserva estable en el tiempo las variables más relevantes (acidez, potencial, población microbiana, temperatura, concentración de impurezas, entre otros elementos menos relevantes).

¹⁵ Anexo C.2.

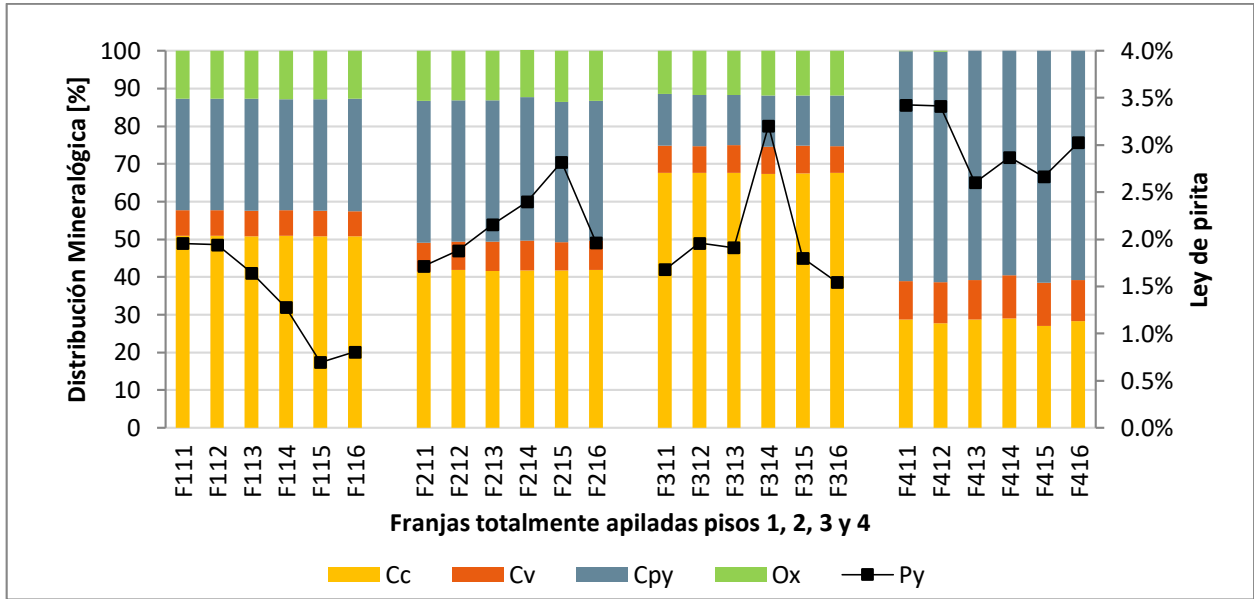


Figura 31.- Distribución mineralógica de las franjas de interés.

La Figura 32 muestra el comportamiento de la recuperación de cobre para los primeros 300 días de riego, en la gráfica se muestran las curvas independientes para cada franja.

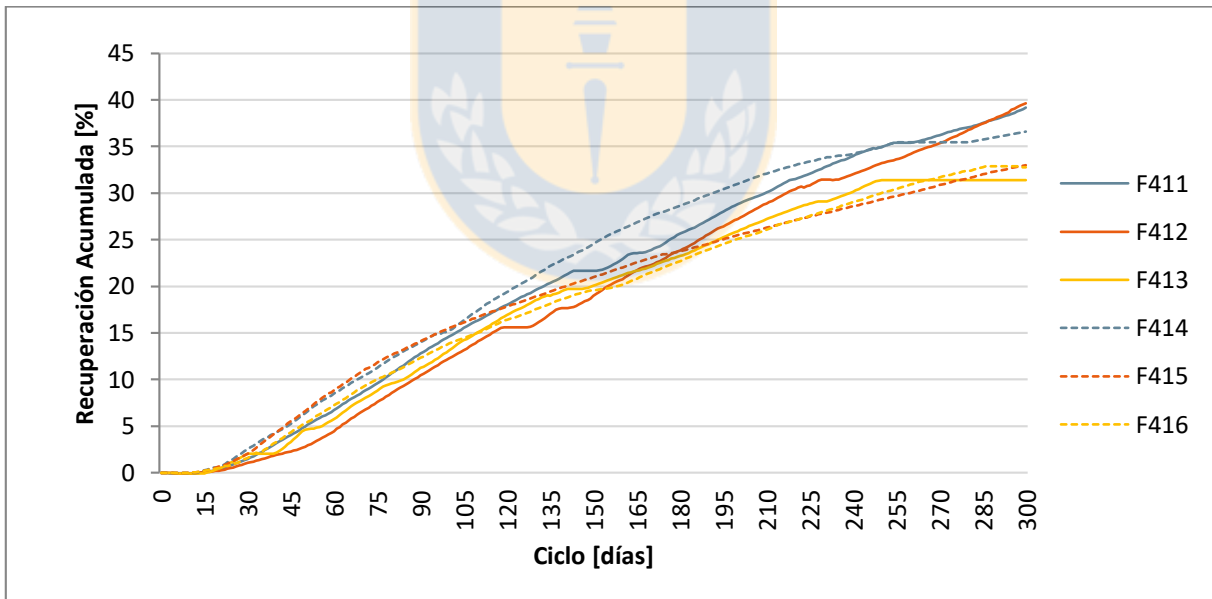


Figura 32.- Recuperación de cobre por franja.

Durante los primeros días del ciclo de riego se puede verificar que las franjas F411, F412 y F413 (con aireación intermedia) presentan valores de recuperación menores a los de las franjas F414, F415 y F416, exhibiendo en promedio 2.56 puntos porcentuales menos que las franjas sin aireación intermedia el día 60 del ciclo. En otras palabras, las franjas con aireación intermedia tienen un peor desempeño durante los primeros 196 días de riego (ver Figura 33) que las franjas donde se

utiliza la aireación basal. Sin embargo, esta situación se ve revertida con el paso de los días, en la Figura 32 se observa como las curvas de recuperación de las franjas con aireación intermedia (líneas continuas) comienzan a experimentar un incremento mientras que las curvas de recuperación de franjas sin aireación intermedia (líneas segmentadas) comienzan a padecer una desaceleración de su crecimiento. Para el día 300 del ciclo se verifica que la recuperación acumulada de franjas con red de aireación intermedia presenta 2.62 puntos porcentuales más que las franjas que poseen solo aireación basal.

Se observa que la curva de recuperación de la franja F413 detiene su crecimiento logarítmico esperado y se mantiene constante (31.40[%]) a partir del día 251 debido a la detención anticipada de su ciclo de riego.

La Figura 33 muestra la recuperación en el tiempo de las franjas en estudio de forma promediada, esto permite ver con mayor claridad las diferencias de la curva de recuperación para una franja que se oxigena de forma basal e intermedia versus una que se oxigena solo de forma basal.

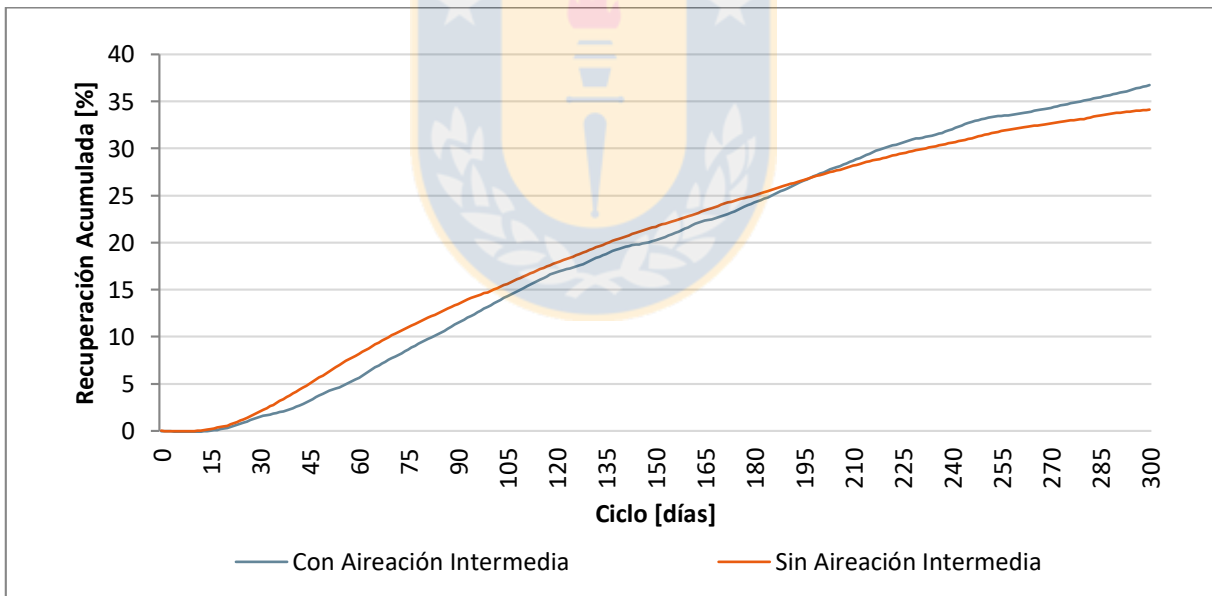


Figura 33.- Curvas promedio de recuperación para franjas con y sin aireación intermedia bajo similares condiciones de operación.

Este fenómeno es perfectamente explicable a partir de los antecedentes. Durante los primeros días del ciclo, el mayor aporte de cobre al PLS proviene del cobre residual lixiviado por la humedad estática en los niveles inferiores (piso 1, 2 y 3), donde solución de riego (refino) actúa como una solución o corriente de lavado de la pila, por lo que las concentraciones de cobre en PLS aumentan rápidamente a niveles inusuales. Este incremento se ve favorecido en las franjas F414,

F415 y *F416* ya que, al dirigir toda la aireación a la base de la pila, las reacciones de lixiviación se ven enormemente favorecidas en la parte baja de la pila. Sin embargo, se demuestra que el cobre en los pisos inferiores no es un aporte permanente, sino que solo contribuye durante los primeros días del ciclo.

Adicionalmente, se observa en la Figura 31 que las franjas de la *F411* a la *F416* son altamente calcopíricas con un contenido medio de cobre por sobre el 60% en forma de calcopirita. De la Figura 8 sabemos que la calcopirita es la especie mineralógica que peor desempeño tiene en estas condiciones frente a la lixiviación y presenta una curva de recuperación menos pronunciada que la de sulfuros secundarios de cobre. En este escenario el aporte de cobre de las franjas del piso 4 no será significativo sino a partir del día 100, cuando la curva de recuperación de calcopirita comienza a experimentar un aumento de su pendiente. Frente a este fenómeno cinético, la inyección de aire se hace particularmente relevante en el piso 4 a partir del día 100 cuando el mineral con mayor presencia en la franja (calcopirita) comienza su real aporte de cobre. Este análisis teórico se verifica en las Figuras 32 y 33, donde las franjas sin aireación intermedia presentan altas recuperaciones al inicio del ciclo, ya que el aire favorece la extracción de cobre residual de los pisos inferiores, mientras que las franjas con aireación intermedia, si bien es cierto presentan un desempeño menos favorable durante el inicio del ciclo, tienen un comportamiento más beneficioso en el largo plazo, debido al aporte de oxígeno directamente al piso 4 donde se requiere para la lixiviación de los minerales frescos recientemente cargados.

La Figura 34 muestra el diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-S-H₂O para especies de Cu, de acuerdo a las concentraciones de elementos disueltos presentes en la solución de riego. En la Figura 35 se observa el diagrama Eh-pH para el sistema Fe-H₂O. Las figuras 34 y 35 permitirán realizar observaciones respecto a las variables operacionales Eh y pH.

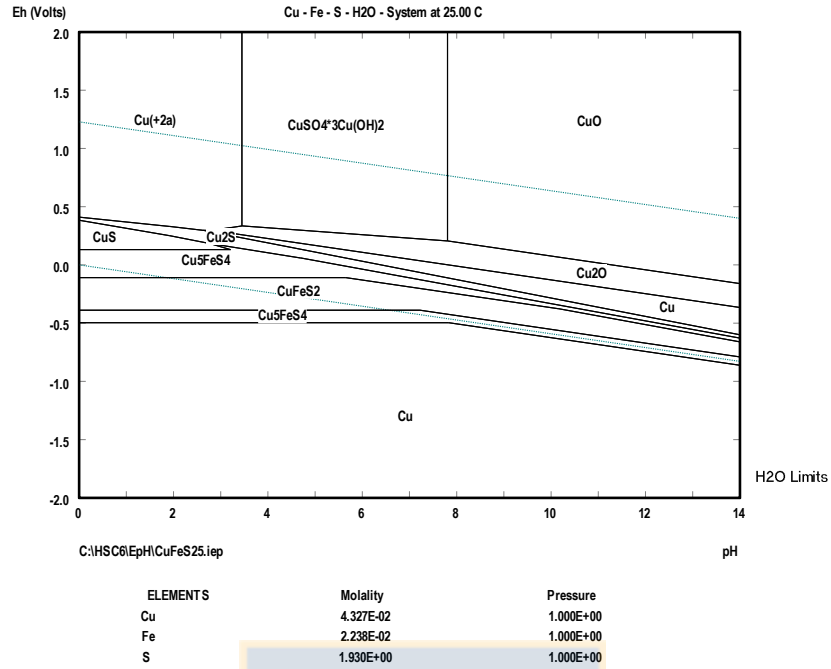


Figura 34.- Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-S-H2O para especies de Cu.

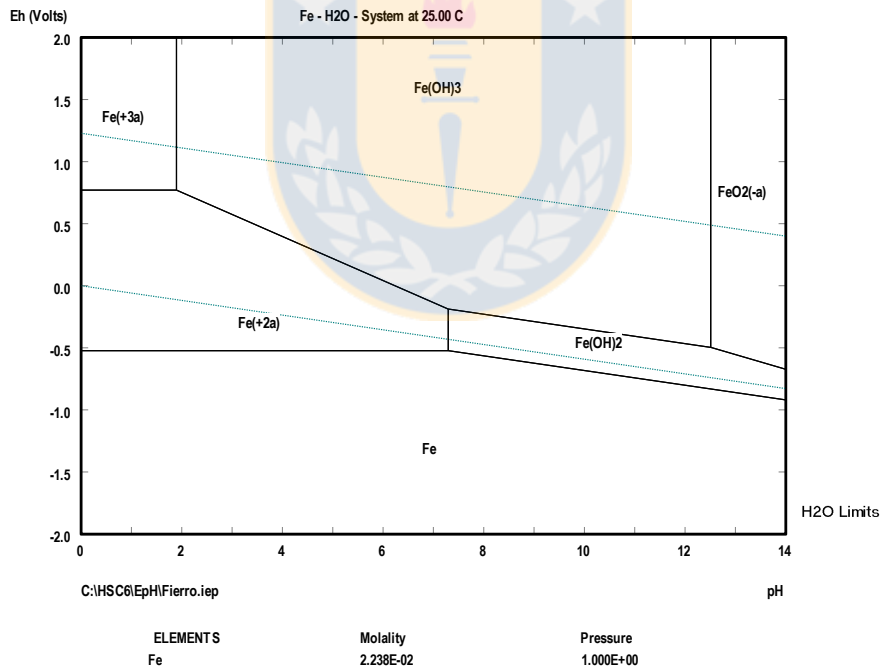


Figura 35.- Diagrama Eh-pH para el sistema Fe-H2O.

La Figura 36 muestra el comportamiento del potencial del PLS saliente de las franjas en estudio. Se exhibe el resultado en $[mV/ENH]$ promedio para los casos con y sin aireación intermedia. Del diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-Fe-S-H₂O se sabe que para que ocurran las reacciones de lixiviación en medio férrico, el potencial electroquímico de la solución debe estar

por sobre los 410[mV] y el pH debe ser inferior a 3.5 estos son los valores extremos requeridos para ubicarse dentro de la zona de equilibrio termodinámico del Cu^{2+} . En la Figura 34, la zona de predominancia termodinámica del ión cúprico se encuentra delimitada por las curvas $Eh = 2.0$, $pH = 3.5$, $Eh = 0.1pH + 0.1$, $Eh = 0.3$, $Eh = 0.4 - 0.1pH$, $Eh = 0.4pH$ y $pH = 0.0$. Entonces, para cualquier valor de potencial superior a 410[mV] será favorable termodinámicamente la presencia de iones Cu^{2+} para valores de pH inferiores a 3.5.

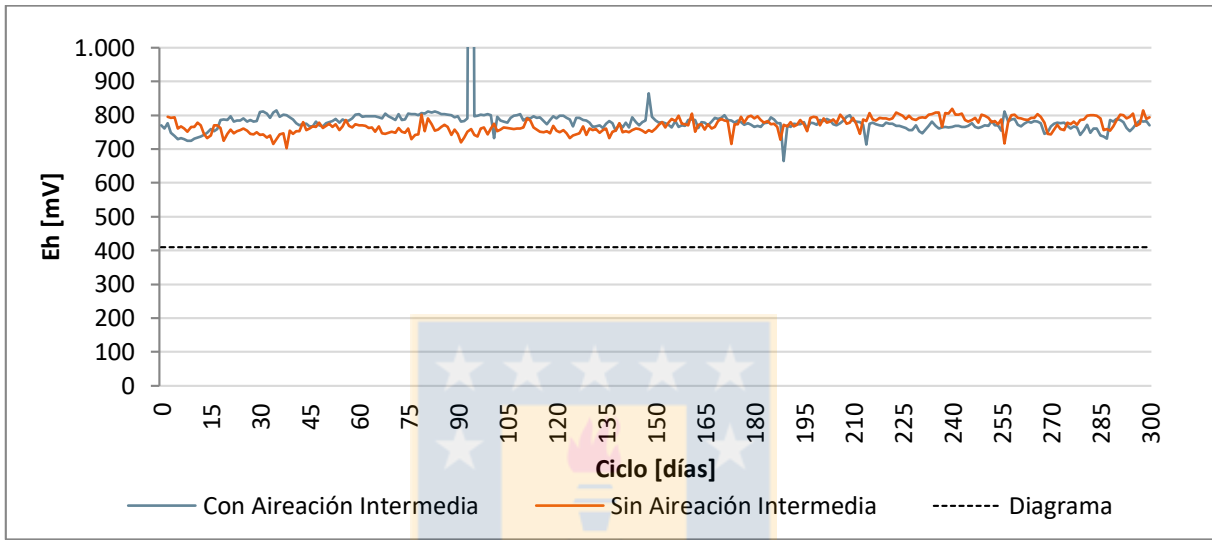


Figura 36.- Potencial de la solución de PLS para las franjas con y sin aireación intermedia para los primeros 300 días de riego.

En las curvas de la Figura 36 se observa que a excepción de un dato de la colección, todos los valores históricos de Eh se ubican por sobre los 700[mV/ENH], entonces, de acuerdo a la información gráfica disponible es posible garantizar el potencial requerido para favorecer termodinámicamente la formación de Cu^{2+} . Es importante destacar también, que se evidencian comportamientos diferentes para ambas curvas de la Figura 36, existen períodos del ciclo donde las franjas con aireación intermedia presentan un potencial de salida ligeramente superior a las franjas sin aireación intermedia y otros periodos donde se evidencia el fenómeno contrario. Sin embargo, a pesar del comentario anterior, se verifica que el comportamiento de ambas curvas es relativamente similar y ninguna presenta una discontinuidad para el proceso.

En la Figura 37 se puede observar el comportamiento del pH de la solución de PLS para las franjas con y sin mecanismo de aireación intermedio. Se verifica que ambas curvas presentan valores y tendencias similares, siempre bajo pH 3.5, estos antecedentes permiten corroborar que la totalidad de los datos capturados del ciclo de lixiviación se ubican con seguridad dentro del campo de estabilidad del ión cúprico, asegurando una adecuada lixiviación de los minerales de cobre. Se observan en la gráfica notorios descensos del pH en algunos puntos o periodos de tiempo que se

atribuyen a incrementos en la adición de ácido sulfúrico a la solución de riego debido a la presencia de menas más oxidadas o a desajustes en el control operacional.

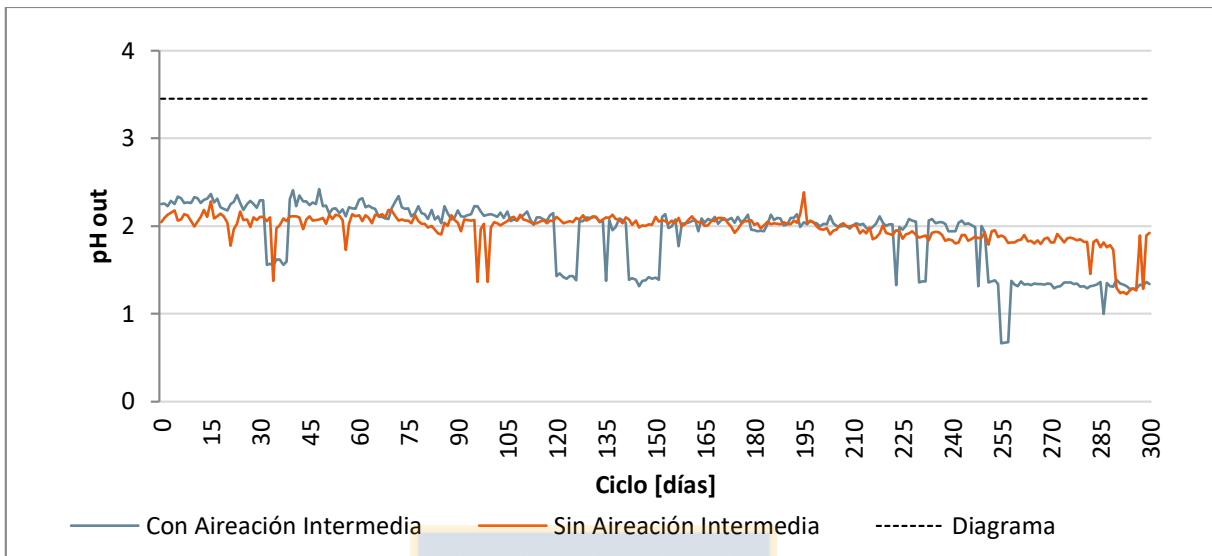


Figura 37.- pH de la solución de PLS en las franjas con y sin aireación intermedia para los primeros 300 días de riego.

En cuanto a la relación entre las curvas de pH para los casos con y sin aireación no se observan mayores antecedentes. Para ambos casos se verifica un comportamiento relativamente similar, siempre con valores bajo la línea de equilibrio termodinámico del diagrama de Pourbaix. Ambas curvas presentan discontinuidades considerables tal como se describe en el párrafo anterior. La mayor brecha se observa a partir del día 250, sin embargo, no es posible atribuir ningún efecto en la recuperación debido a las variaciones de pH .

Desde la perspectiva del control operacional las dificultades no están relacionadas con el comportamiento del cobre y sus especies disueltas, sino con el análisis de la Figura 35. En el diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H₂O se puede constatar que el valor límite de pH para poder evitar la precipitación de especies de Fe es 1.9. Sin embargo, los valores operacionales de pH descritos en la Figura 37 muestran un proceso sobre el límite de formación de especies disueltas de acuerdo al diagrama. Este fenómeno podría afectar significativamente las concentraciones de iones de hierro en solución ya que podrían estar precipitando en forma de hidróxidos o compuestos de la familia jarosita.

4.5. EFECTO DE LA AIREACIÓN BASAL EN FRANJAS DE 18 METROS

De la misma forma que en 4.4, a partir de antecedentes operacionales, se construyen Figuras que permiten realizar observaciones respecto al desempeño del proceso de lixiviación en franjas de un piso para dos casos, con y sin aireación. La franja *F136* se regó con inyección de aire durante todo su ciclo, mientras que la franja *F138*, de similares características mineralógicas se regó sin adición de aire mediante sopladores.

La Figura 38 muestra la mineralogía de las franjas *F136* y *F138* donde se verifica que poseen una distribución mineralógica similar, lo que permite que sean comparables entre ellas. Destaca en la Figura 38 la inexistencia de minerales oxidados de cobre en la distribución mineralógica.

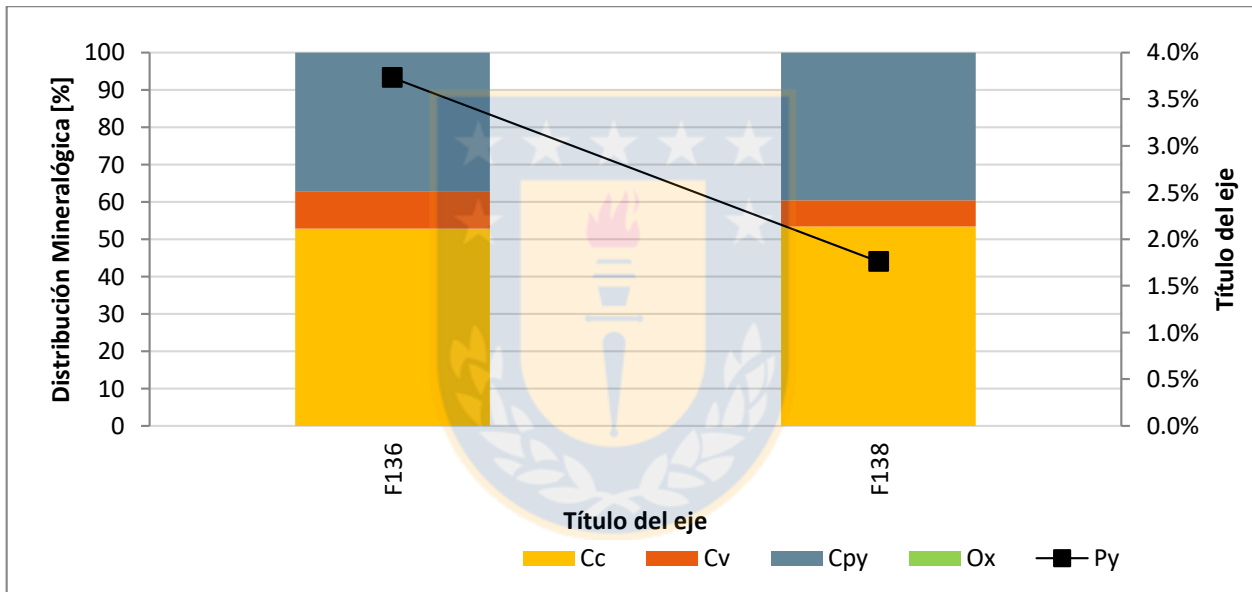


Figura 38.- Distribución mineralógica de las franjas piloto 136 y 138.

La Figura 39 muestra el comportamiento de la recuperación de cobre en función del tiempo para las franjas *F136* y *F138*. Se puede observar una notable diferencia entre el caso con y sin aireación durante los primeros 40 días de riego, luego del día 40 esta brecha comienza a acotarse hasta extinguirse al día 110 de riego.

Las recuperaciones de las franjas con y sin aireación muestran una brecha promedio de 3.84 puntos porcentuales para los primeros 110 días de riego. Es evidente que la aireación desempeña un rol fundamental durante los 110 días iniciales del ciclo, acelerando visiblemente la cinética de lixiviación de los minerales de cobre, sin embargo, el aporte de la aireación pierde relevancia hacia el día 100 de riego, donde la franja *F138* alcanza los valores de recuperación mostrados por la franja *F136* a pesar de que la primera no posee implementado el sistema de aireación.

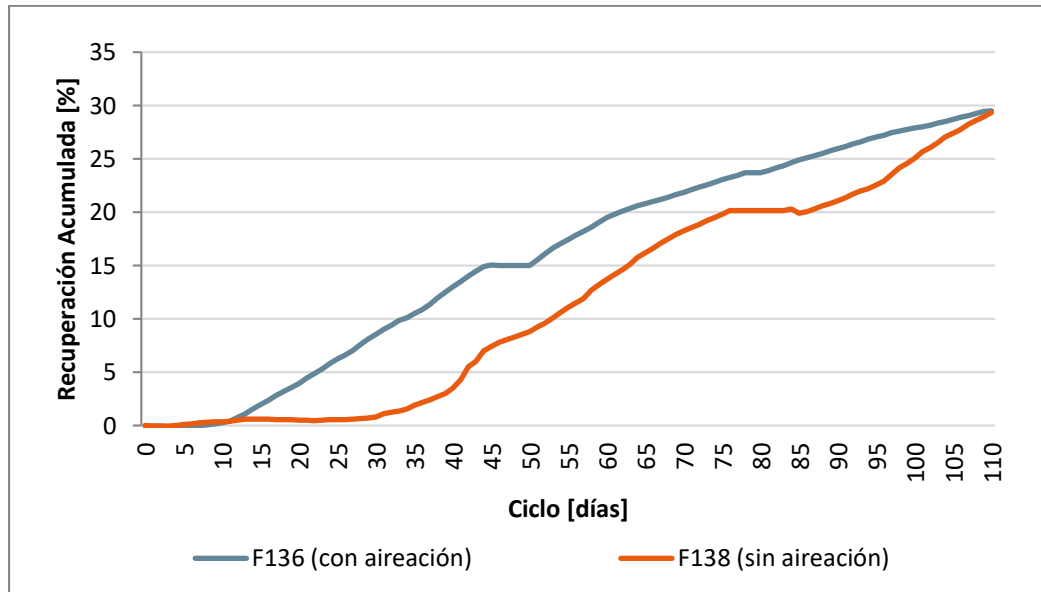


Figura 39.- Recuperación de franjas con (F136) y sin (F138) sistema de aireación.

La Figura 40 muestra el comportamiento de la recuperación en función de la razón de riego, esto es el volumen en m^3 de solución de riego por tonelada de mineral apilado. En la Figura se puede observar que la aireación no tiene un efecto relevante en la recuperación de cobre en el largo plazo (para ciclos de lixiviación de más de 100 días), la franja sin aireación (F138) presenta una mayor recuperación acumulada de cobre que la franja aireada. Se hace evidente entonces que la aireación mejora la cinética de extracción durante los primeros días del ciclo (baja razón de lixiviación), pero que una vez avanzado el período de lixiviación pierde total relevancia.

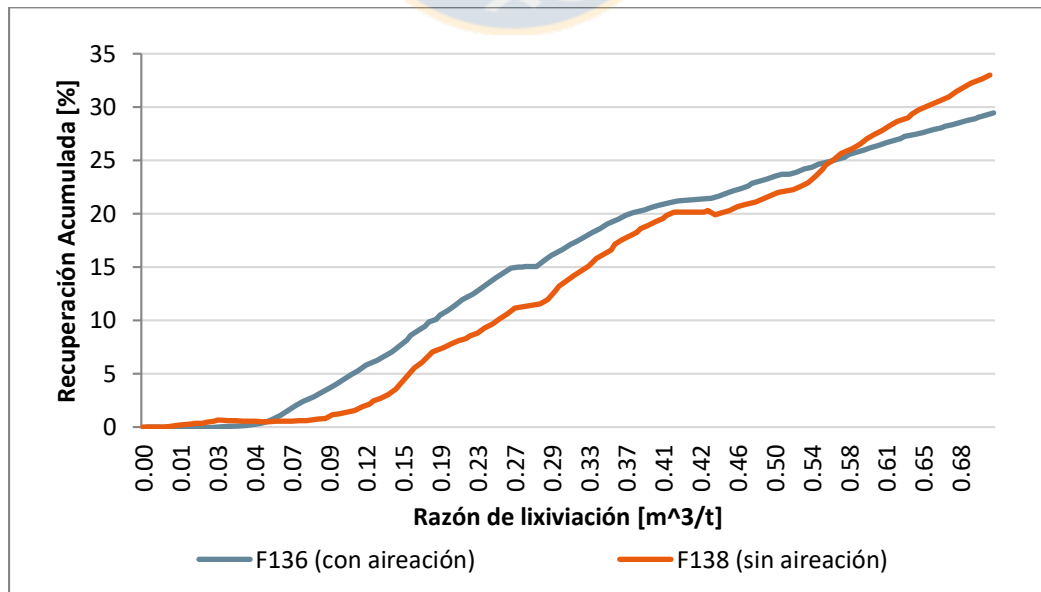


Figura 40.- Recuperación con respecto a la razón de riego para franjas con (F136) y sin sistema de aireación (F138).

La Figura 41 muestra el comportamiento del potencial de la solución cargada (PLS) saliente de las franjas. Es válido esperar que las franjas con aireación exhiban valores en la zona más oxidante, esto es hacia valores más altos de potencial electroquímico. Sin embargo, no se verifican mayores desviaciones de la tendencia ni discontinuidades prolongadas o puntuales. De acuerdo a estos antecedentes y al caso anterior (aireación intermedia) es válido entonces afirmar que no se verifica una relación evidente entre la aireación de la franja y el potencial electroquímico, esto, a pesar de que la información bibliográfica sugiere que existe una relación directa entre la oxigenación, la oxidación del ion ferroso a ion férrico y el potencial electroquímico de la solución.

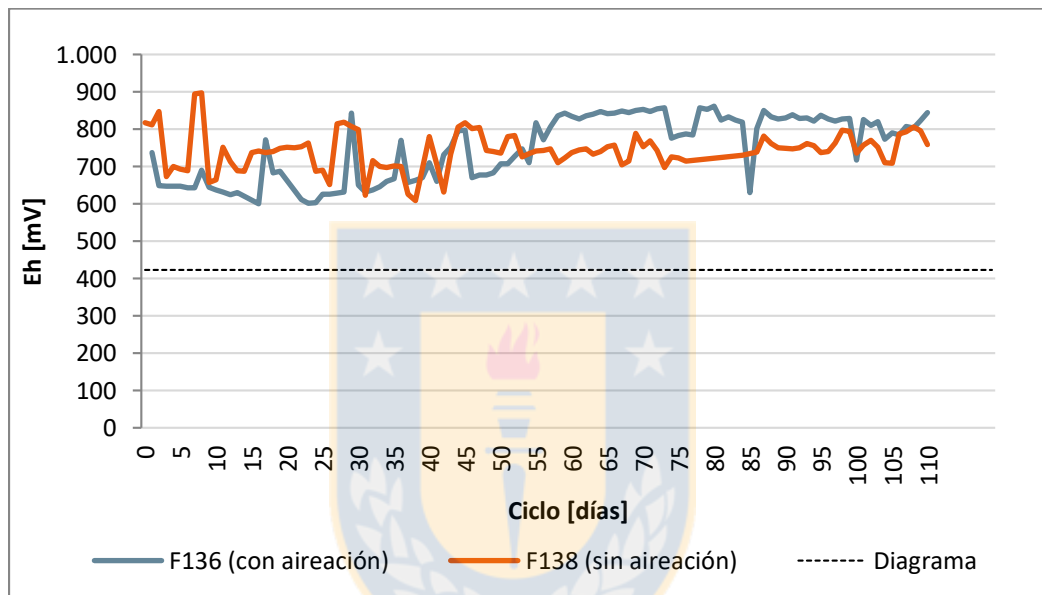


Figura 41.- Potencial de la solución de PLS saliente de las franjas 136 (con aireación) y 138 (sin aireación) en [mV/ENH].

En la Figura 42 se observa el comportamiento del pH de la solución de PLS que abandona las franjas $F136$ y $F138$ respectivamente. En este caso se observan mayores antecedentes que no se encontraban presentes en el análisis del sistema de aireación intermedio. En este escenario es relevante mencionar que en el ciclo de riego de ambas franjas se identifica un descontrol operacional evidente en relación a la adición de ácido sulfúrico (única fuente de ácido). Durante 21 días el pH se ubicó peligrosamente a la derecha del equilibrio (fuera de la zona de estabilidad del Cu^{2+}) pudiendo perjudicar la lixiviación de los minerales. La franja $F138$ también presentó discontinuidades puntuales fuera de la zona termodinámicamente estable sin embargo son menos alarmantes que la prolongada desviación de los valores de pH de la $F136$. En cuando al efecto de la aireación en el pH , no existe ningún elemento que permita concluir respecto a los efectos del aire en relación al pH ya que los valores de pH se regulan casi exclusivamente mediante la adición de ácido al sistema.

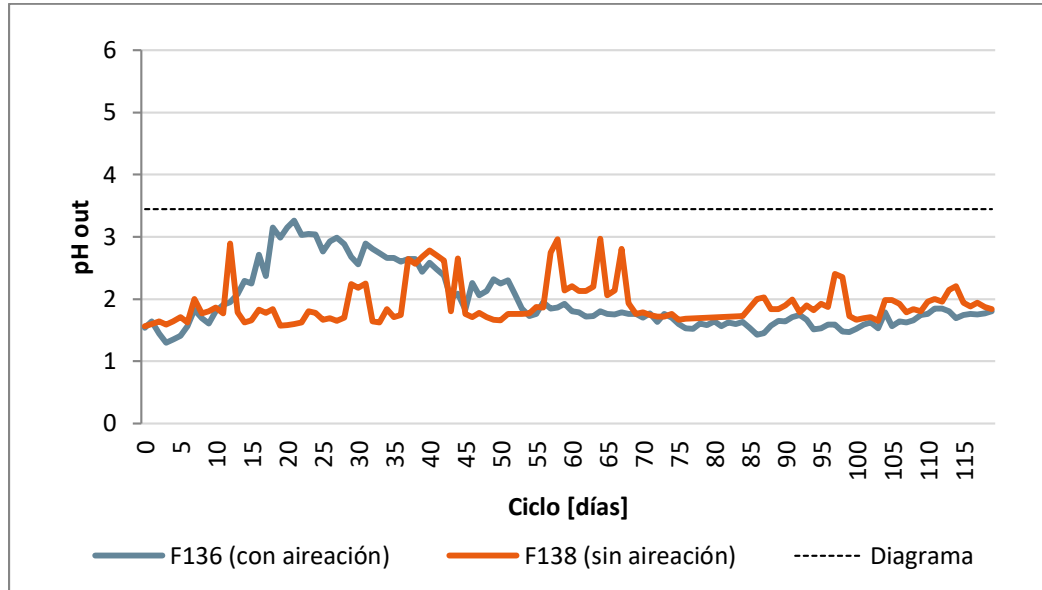


Figura 42.- *pH* de la solución de PLS de las franjas 136 (con aireación) y 138 (sin aireación).

La franja F136 presenta cifras alarmantes de *pH* sobre todo en el período del día 15 al 50 donde el *pH* alcanza valores de hasta 3.5. Tal como se verifica para las franjas de 4 pisos, un *pH* tan elevado implica de acuerdo a la figura 35 formación de precipitados de hierro lo que disminuye la concentración de *Fe* total del sistema pudiendo verse afectado el proceso a nivel químico además de presentarse alteraciones físico químicas en los procesos posteriores debido a la presencia de compuestos de hierro como la jarosita.

5. CONCLUSIONES

El modelo predictivo de recuperación utilizado en Minera Escondida Limitada demostró ajustarse de buena forma a las extracciones de cobre reales del proceso, por lo cual es válido obtener el consumo estequiométrico de oxígeno del proceso de lixiviación mediante este modelo.

Se demuestra que, el requerimiento de oxígeno de las reacciones de lixiviación (indirectas) está directamente relacionado con la ley de pirita.

Se verifica que la eficiencia de aireación determinada a partir del suministro real de aire y del requerimiento estequiométrico es muy variable y no se rige por una filosofía de aireación u operación.

Los resultados del capítulo 4.2 permiten concluir que existe una tendencia favorable entre la tasa de aireación y la recuperación de cobre mediante el estudio de 4 franjas de similares características mineralógicas y de operación.

Se prueba que, las franjas sin aireación intermedia (todo el flujo de aire por la red basal) presentan una mejor recuperación acumulada que las franjas con aireación intermedia (con distribución del aire en las redes basal e intermedia de aireación) durante los primeros 196 días del ciclo de riego. Para tiempos superiores a 196 días se corrobora un mejor desempeño de las franjas con aireación intermedia.

En franjas de 1 piso, se determinó un efecto positivo en la recuperación de cobre al aumentar la tasa de aireación.

Las mediciones de O_2 en una misma franja con y sin aireación, permiten concluir que existe un leve aumento en la concentración de oxígeno en los primeros 20 [m]. Entre los 20 [m] y los 50 [m] no se observa una diferencia apreciable en las curvas de concentración de oxígeno, lo que permite concluir que el aire suministrado no penetra a esa zona de la pila. Sobre los 50 [m] se aprecia el efecto de la aireación intermedia que genera un aumento considerable en la concentración de O_2 . Sobre los 70 [m] se observa que esta diferencia prácticamente ha desaparecido.

Se demuestra que, en promedio para un ciclo completo de lixiviación, las franjas con aireación basal e intermedia reportan una mejor recuperación acumulada que franjas que solo se airean de forma basal.

Al comparar franjas de 1 piso con y sin aireación, se verifica que la franja que posee sistema de aireación presenta una cinética de extracción de cobre más rápida durante los primeros días del ciclo de riego en relación a aquellas que no sea airean. Sin embargo, hacia el fin del ciclo de

lixiviación, esta diferencia comienza a disminuir hasta igualarse. A la luz de estos antecedentes se puede concluir que la aplicación de la técnica de aireación no genera un impacto significativo en el proceso y que las recuperaciones alcanzadas por franjas con inyección de aire son muy similares a las recuperaciones de franjas que no reciben aporte de aire.



6.- REFERENCIAS

- [1] A. Contreras, «Banco Central de Chile,» 16 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://si3.bcentral.cl/estadisticas/principal1/excel/ccnn/trimestrales/excel.html>. [Último acceso: 18 Diciembre 2018].
- [2] AMEC International Ingeniería y Construcción Ltda., «M40035-P-TREP-003,» Santiago de Chile, 2013.
- [3] BHP Chile, «Informe de Sustentabilidad,» Santiago de Chile, 2016.
- [4] M. Ruiz, Hidrometalurgia, Concepción, Chile, 2013.
- [5] E. Domic, Hidrometalurgia : fundamentos, procesos y aplicaciones, Santiago de Chile, 2001.
- [6] A. Colmer, K. Temple y H. H., «An iron-oxidizing bacterium from the acid drainage of some bituminous coal mines,» *J. Bacteriol*, vol. 59, pp. 317-328, 1950.
- [7] J. Matschullat, B. Perobelli, E. Deschamps, F. Riberiro, T. Gabrio y M. Schwenk, «Human an enviromental contamination in the iron Quadangle, Brazil,» *Applied Geochistry*, nº 15, pp. 181-190, 1999.
- [8] P. Rodríguez, «Estudio de la Expresión de Proteínas en Sulfolobus Metallicus durante la Biolixiviación de Calcopirita,» Santiago de Chile, 2007.
- [9] I. Jaque, «Estudio de la biolixiviación de pirita por un cultivo de sulfobacillus acidophilus a 45°C,» Santiago de Chile, 2012.
- [10] A. DiSpirito, P. Dugan y O. Tuovinen, «Sorption of Thiobacillus ferrooxidans to particulate material,» *Biotechnol. Bioeng.*, nº 25, pp. 1163 - 1168, 1983.
- [11] D. Nordstrom, «Aqueous pyrite oxidation and consequent formation of secondary iron minerals in acido sulphate weathering,» *Soil Sci. Soc. Ann.*, nº 10, pp. 37 - 56, 1982.
- [12] L. Leduc y G. Ferroni, «the chemolitotrophic bacterium Thiobacillus ferrooxidans,» *FEMS microbiology reviews*, nº 14, pp. 103 - 113, 1994.

- [13] Minera Escondida Limitada, «Manual Operación Lixiviación de sulfuros,» Antofagasta, Chile, 2005.
- [14] W. Sand, P. Jozsa y A. Schippers, «Chemistry of bacterial leaching - direct vs indirect bioleaching,» *Hidrometallurgy*, nº 59, pp. 159 - 175, 2001.
- [15] D. Jofré, «Pirita Residual (reporte confidencial),» Antofagasta, Chile, 2018.



ANEXOS

A. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS PRODUCTIVOS

A.1. Proceso de concentración

La compañía cuenta con 3 procesos productivos. Concentración de minerales primarios, lixiviación de minerales oxidados y biolixiviación de minerales sulfurados de baja ley. Los primeros se tratan en tres plantas concentradoras. Los colorados concentra mediante flotación minerales de

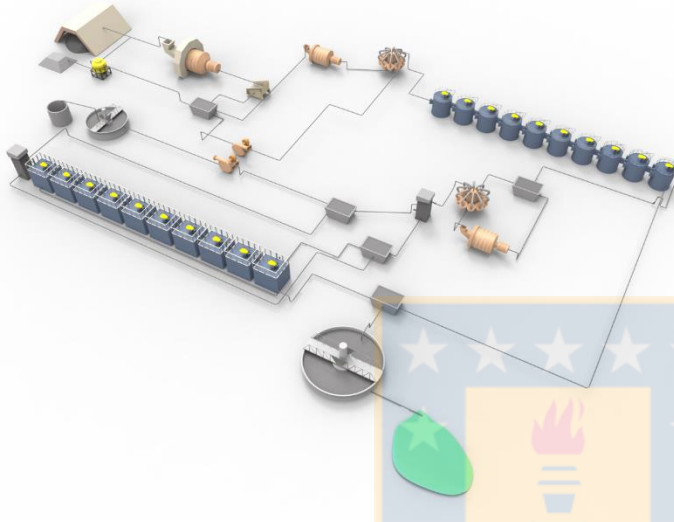


Figura 43.- Flowsheet Planta de Concentración Los Colorados. (Minera Escondida Limitada).

un stock pile de 420,000 [t] provenientes del rajo Escondida y lo alimenta a una primera etapa de molienda en dos molinos SAG de 28'x14' y uno de 36'x19'. El mineral conminuído es transferido a cicloneo donde el mineral es clasificado por diez baterías de 12 hidrociclones (26") y dos baterías de 14 hidrociclones (33") para obtener un P80 de 190 μ m. El producto grueso de clasificación alimenta un circuito de siete molinos de bolas (cuatro de 18'x24.5' dos de 20'x35' y uno de 24.4'x36'). El mineral reducido de tamaño alimenta el circuito de flotación Rougher con celdas Outotec y Outotec PIP (8 filas de 10 celdas cada fila con capacidad de 100m³ y 2 filas de 5 celdas cada una con capacidad de 300m³). El concentrado Rougher es alimentado a un proceso de clasificación (6 baterías de 18 hidrociclones de 15") y remolienda (3 molinos convencionales de 2,750kW) y luego transferido a una etapa de limpieza en columnas (10 celdas columnares). Las colas de la flotación cleaner van a flotación Scavenger (10 filas de 13 celdas cada una con capacidad de 44m³) alimentando con el concentrado una segunda flotación cleaner en columnas (4 columnas) para luego, ser espesado en 2 espesadores de 52m de diámetro y luego transportado mediante un mineroducto de alta presión de 170km de extensión hasta las instalaciones de Puerto Coloso, donde es secado y embarcado para su distribución. La línea concentradora tiene una potencia instalada de 121MW. (Instructivo Operacional MEL, 2016)

Laguna Seca también concentra sulfuros primarios mediante un circuito cerrado de flotación. El proceso se alimenta de un stock pile de 410,000 [t] provenientes de ambos rajos que envía a una primera etapa de molienda en un molino SAG de 38'x20', el producto de molienda SAG es clasificado en 4 baterías de 19 hidrociclones (33") para obtener un P80 de 145 μ m. El producto grueso de

ciclonaje alimenta a 4 molinos de bolas (tres de 25'x40' y 13,423kW y uno de 26'x41.5' y 15.660kW), El mineral es concentrado en primera instancia mediante flotación Rougher con celdas Wemco (9 filas de 8 celdas cada una con capacidad de 160m³). El concentrado Rougher es ingresado a un circuito cerrado de remolienda donde se clasifica mediante 4 baterías de 9 hidrociclones (20"). El mineral

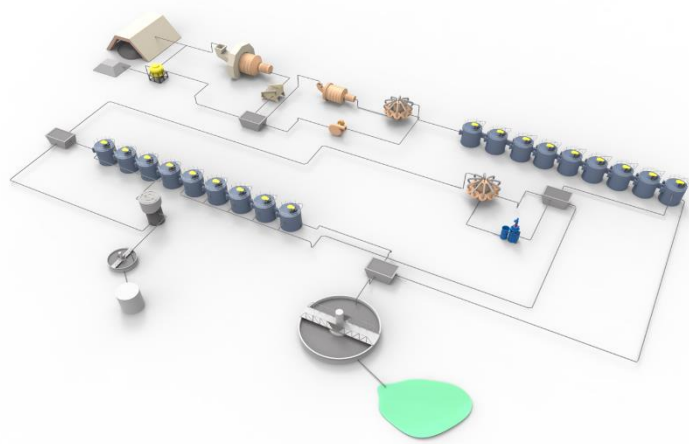


Figura 44.- Flowsheet Planta de Concentración Laguna Seca. (Minera Escondida Limitada).

reducido de tamaño alimenta una primera etapa de limpieza (4 filas de 9 celdas con capacidad de 160m³) de donde el concentrado alimenta una segunda etapa de limpieza en columnas (10 celdas columnares) y las colas alimentan una etapa de flotación Scavenger (5 filas de 5 celdas con capacidad de 160m³) desde donde se recircula el concentrado y se envían las colas a relaves. El concentrado de ambas etapas cleaner se espesan en 2 espesadores de 42.7m de diámetro. La planta tiene una potencia instalada de 125kW. (Laguna Seca Debottlenecking Project, 2011)

La última línea de concentración, OGP1, recientemente inaugurada (2016), alimenta el circuito de molienda SAG (1 molino) desde un stock pile de 297,000 [t] con mineral proveniente del

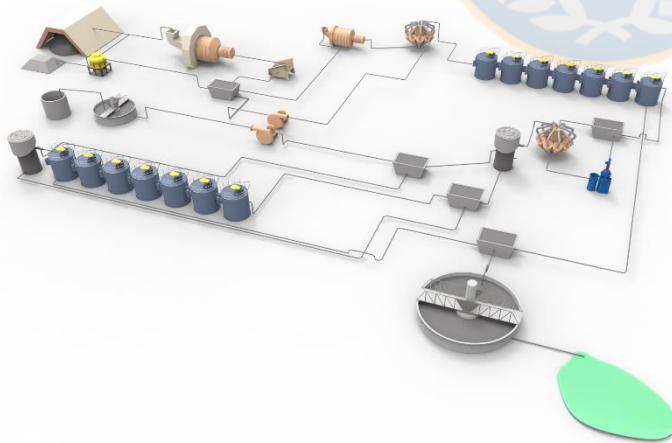


Figura 45.- Flowsheet Planta de Concentración OGP1. (Minera Escondida Limitada).

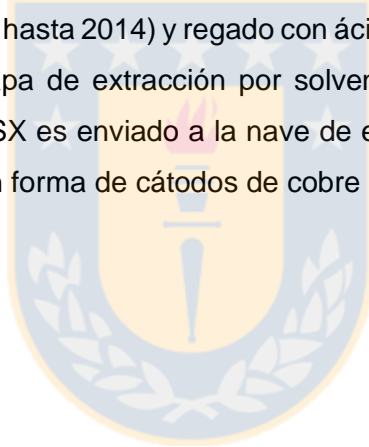
rajo original y del proyecto Escondida Norte, el producto de molienda SAG es clasificado en 4 baterías de 19 hidrociclones (33"). El producto fino de clasificación (P80 de 145µm) es enviado a flotación Rougher (7 filas de 7 celdas cada una con capacidad de 300m³), mientras que los gruesos son recirculados a un circuito cerrado de clasificación en 4 molinos de bolas de 26'x42.5'. El concentrado Rougher pasa a un circuito cerrado de remolienda (4 baterías de 16 hidrociclones (20") y 3 molinos verticales de 2,242kW. Luego, la corriente es alimentada a un proceso de limpieza en 6 columnas y el concentrado enviado a espesamiento. Las colas por otro lado son enviadas a un proceso de flotación Scavenger (3 filas de 7 celdas con

rajo original y del proyecto Escondida Norte, el producto de molienda SAG es clasificado en 4 baterías de 19 hidrociclones (33"). El producto fino de clasificación (P80 de 145µm) es enviado a flotación Rougher (7 filas de 7 celdas cada una con capacidad de 300m³), mientras que los gruesos son recirculados a un circuito cerrado de clasificación en 4 molinos de bolas de 26'x42.5'. El concentrado Rougher pasa a un circuito cerrado de remolienda (4

capacidad de $300m^3$ cada celda) y el concentrado Scavenger limpiado en una segunda etapa cleaner en 6 columnas. El concentrado es espesado en 2 espesadores de $42.7m$ de diámetro (OGP1 Design Criteria for Process, 2012).

El concentrado de estas últimas dos líneas, también es enviado al puerto de Coloso, al sur de Antofagasta, a través de un mineroducto de $170 [km]$, donde el concentrado es secado y embarcado para su comercialización. En el puerto de Coloso, se encuentra localizada también la planta desalinizadora de agua de mar que alimenta de agua fresca a todas las líneas de concentración.

Los óxidos de cobre son tratados por lixiviación, extracción por solventes y electrobtención. Un circuito cerrado de chancado primario y secundario procesan y clasifican $3,400 [t]$ por día entregando un producto fino bajo $19 [mm]$. Este producto es alimentado a tambores aglomeradores donde con ácido sulfúrico y agua se aglomera y curte el mineral. Este mineral es depositado en pilas de lixiviación dinámicas (estáticas hasta 2014) y regado con ácido sulfúrico, luego el PLS recolectado en piscinas y enviado a una etapa de extracción por solventes, posteriormente el electrolito de avance obtenido en la etapa de SX es enviado a la nave de electrobtención donde diariamente se cosechan $411 [t]$ de cobre fino en forma de cátodos de cobre clase A.



A.2. Sistema de aireación

Las salidas de cada soplador están conectadas a tuberías de HDPE corrugado de 24" de diámetro, 6.8 [m] de largo y separadas cada 5 [m]. Estas tuberías conducen el fluido (aire) hasta un manifold receptor de HDPE corrugado de 48" de diámetro, cerrado en ambos extremos y de aproximadamente 22 m de largo. En la configuración de los sopladores existe una quinta tubería de 24" sin conexión, la cual se conectará a un quinto soplador cuando se requiera. En ambos lados de la Pila (irrigación y colección), existe un manifold receptor con un arranque localizado en el centro de su longitud donde se conecta perpendicularmente una tubería de HDPE corrugado de 48" de diámetro y de aproximadamente 20 [m] de largo, que atraviesa las trincheras (de irrigación o colección) para conectarse perpendicularmente en el centro de un segundo manifold denominado de distribución, de HDPE corrugado, 48" de diámetro y 116 [m] de longitud.

El manifold de distribución en cada lado de la pila está formado por 8 segmentos de tubería de 12 m de largo cada uno y 2 segmento de 10 [m] (en los extremos). A lo largo de cada segmento se ubican distribuidas uniformemente 2 toberas de conexión para las tuberías interiores de la pila (distanciadas cada 6 [m], excepto en los extremos donde la separación es de 2.5 [m]).

Las toberas de conexión de ambos lados de la pila en el manifold de distribución, están conectadas con 21 tuberías perforadas de HDPE corrugadas de 10" de diámetro que distribuyen el aire al interior de la franja de la Pila. Existe una conexión justo en el centro del manifold de distribución donde se encuentra ubicada una de las tuberías de 10". Desde este punto, se distribuyen 10 tuberías por cada lado (en total 21 tuberías).

Desde el lado de irrigación, las tuberías perforadas tienen una extensión de 1.007 [m], llegando justo a la mitad de la longitud total de la franja. Existe un tramo de 24 [m] de tubería no perforada y 983 [m] de tubería perforada. Las perforaciones son de 4 [mm] de diámetro y están agrupadas en sectores a lo largo de la cañería. Los sectores con perforaciones están separados cada 6 [m] y se agrupan según la cantidad de orificios presentes. Cada cañería de 10" tiene 35 sectores con 8 perforaciones, 54 sectores con 11 perforaciones y 58 sectores con 15 perforaciones.

Desde el lado de colección o percolado la configuración es similar. Las tuberías de distribución de aire al interior de la franja de la pila también tienen una extensión total de 1.007 m, donde 24 [m] corresponden a tubería sin perforaciones y 983 [m] a tubería perforada. Las perforaciones son de 4 [mm] de diámetro y están agrupadas en sectores a lo largo de la cañería. Los sectores con perforaciones están separados cada 6 [m] y se agrupan según la cantidad de orificios presentes. Cada cañería de 10" tiene 35 sectores con 8 perforaciones, 54 sectores con 11 perforaciones y 58 sectores con 15 perforaciones.

El proyecto de expansión EBPE III considera una modificación del sistema de aireación para cubrir los requerimientos de aire de los pisos superiores al piso 3. El nuevo Sistema Intermedio de Aireación está basado en la configuración existente utilizada para la zona basal, aplicándose las siguientes modificaciones:

- De los 8 sopladores actuales que operan en el 1° piso, se utilizarán sólo 2 de ellos (uno por cada lado de la pila) para seguir manteniendo aireada la zona basal. Los otros 6 sopladores (3 por la zona de irrigación y 3 por la zona de colección) mantendrán su posición en las estructuras originales, pero se modificará la red de cañerías para que puedan abastecer de aire al piso 4 de la pila.
- De las 4 líneas de tuberías de 24" de diámetro que salen de los respectivos sopladores por cada lado de la franja (irrigación y colección), una de ellas será intervenida para aislarla de manera que pueda abastecer de aire a la zona basal a través del actual manifold de distribución ubicado en el 1° piso. La intervención implica cortar la cañería y ensamblarla a otra tubería de 24" que pasa por encima del manifold de recepción de aire y continúa hasta acoplarse al manifold principal.
- Las 3 tuberías de 24" de diámetro restantes que provienen de los sopladores (por cada lado de la franja) siguen conectadas al manifold de recepción original y transportan el flujo de aire a través de la matriz de 48" que atraviesa la respectiva trinchera (de irrigación y de colección).
- Esta matriz originalmente se conectaba al manifold principal de distribución, pero su trayecto se modifica ya que se corta en un tramo cercano al manifold para conectarse a otra tubería de 48" de diámetro que conduce el flujo de aire hasta los pisos superiores a través de los taludes de la pila, atravesando caminos de acceso en cada piso hasta llegar al piso 4.
- En el piso 4, las tuberías de 48" de diámetro ascendentes (por ambos lados de la pila), se conectan a un manifold de distribución ubicado en este piso que distribuye el aire al interior de las franjas a través de 21 tuberías perforadas de 10" de diámetro.
- En el lado de colección, en la ubicación de la franja *F402* existe una rampa de acceso de camiones por lo cual para esta zona la aireación sólo se realiza entre las franjas *F403* a la *F413*. Por el lado de irrigación, las franjas aireadas van de la *F402* a la *F413*.
- En el piso 4, la extensión de las tuberías de distribución de aire de 10" de diámetro para cada lado de la franja es de aproximadamente 834 [m], con un total de 1.668 [m] a lo largo de toda la Pila.
- Existe un tramo inicial equivalente a 12 [m] de las tuberías de distribución de 10" de diámetro que no está perforado. El resto de la longitud está perforado con distinta densidad de orificios.

A.3. Equipos de aireación

Los equipos de aireación, en adelante sopladores, son sopladores radiales en versión soldada y es, en estricto rigor, una turbo-máquina para el transporte de gases similares al aire o una mezcla de gases. Los sopladores radiales funcionan mediante la aplicación de fuerza centrífuga. El fluido, en este caso aire, ingresa al equipo de forma paralela al eje giratorio y es desviado en ángulo recto antes de la entrada a la paleta donde es lanzado hacia el manifold de recepción.

Por regla general, el soplador está formado por los siguientes componentes.

- Carcasa con abertura de aspiración y de presión.
- Rodete (eje giratorio)
- Motor

Los valores límite, con los que se ha de interrumpir la operación del soplador son.

Tabla 6.- Valores límite de los equipos de soplado. (Fuente: Instrucciones de servicio para soplador radial Piller)

| | | |
|---------------------------|-------------|-------------|
| Temperatura del cojinete | Alarma | 90°C |
| | Desconexión | 100°C |
| Vibraciones de la máquina | Alarma | 4.5 m/s |

En la actualidad se cuenta con una capacidad instalada de 96 sopladores lo que equivale a 12 franjas aireadas de forma simultánea. Al ser equipos móviles, el sistema de aireación es removido de las franjas en abandono e instalados en las franjas nuevas. Los equipos presentan las siguientes características operacionales.

Tabla 7.- Características operacionales de los equipos de soplado. (Fuente: Instrucciones de servicio para soplador radial Piller)

| | |
|-------------------------|-------------------------------|
| Flujo Volumétrico | 24,202 m³/h |
| Presión de Entrada | 683.32 mbar |
| Temperatura de Succión | 10.0 °C |
| Caída de Presión Total | 16.44 kPa |
| Eficiencia | 82.7% |
| Rendimiento | 123.8 kW |
| Temperatura de Descarga | 31.0°C |

B. CONDICIONES DE OPERACIÓN. PILA DE BIOLIXIVIACIÓN

B.1. Condiciones generales del sitio

Tabla 8.- Condiciones Generales del Sitio. Fuente: "BM-GTS-G-01", Condiciones del Sitio Minera Escondida Limitada

| Parámetros | Valores / Características |
|------------------------------|-------------------------------|
| Clima | Desértico |
| Topografía | Terreno con pendientes |
| Zona Sísmica | NCh 433 y NCh2369-2003 Zona 2 |
| Temperatura Ambiente | |
| - Máxima alta verano | 24.9°C |
| - Media anual | 9.8°C |
| - Mínima baja invierno | -5.6°C |
| Humedad Relativa del Aire | 20 a 50 % |
| Altura Geográfica | 3,050 – 3,350 m. s. n. m. |
| Presión Atmosférica del Aire | 73.7 kPa |
| Evaporación del Agua | |
| - Máxima en verano | 15.2 mm/d |
| - Media anual | 7.9 mm/d |
| Precipitaciones | |
| - Máximo en 24 horas | 55.8 mm/d |
| - Media anual | 7.2 mm/a |
| Profundidad de Heladas | 0.7 m |
| Condiciones del Viento | |
| - Dirección del viento | Predominante del Oeste |
| - Velocidad máxima | 14.3 m/s |
| - Velocidad media | 3.8 m/s |

B.2. Datos generales del proyecto Sulphyde Leach

Tabla 9.- Datos Generales del Proyecto Lixiviación de Óxidos. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Variable / Parámetro | Nominal | Diseño |
|--|---------------------------|----------------------|
| Tiempo de operación anual | - | 365 d/a |
| Turnos de operación diarios | - | 2 turno/d |
| Tiempo por turno | - | 12 h/turno |
| Utilización del Sistema de irrigación | - | 95 % |
| Flujo de mineral en riego en base seca | 230 kt/d | 276 kt/d |
| Taza de lixiviación | 3 – 10 L/h/m ² | 6 L/h/m ² |
| Humedad de operación de la pila | 11% | 12% |
| Consumo neto de ácido sulfúrico | 4 – 7 kg/t | 8 kg/t |
| Recuperación metalúrgica de cobre | - | 35-44 |

B.3. Ciclo de tiempo de la biolixiviación

Tabla 10.- Ciclo de tiempo de la biolixiviación. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Variable / Parámetro | Nominal | Diseño |
|------------------------------|--------------------|--------------|
| Armado de parrillas de riego | - | 10 d/franja |
| Ciclo de riego con refinado | 250 – 400 d/franja | 350 d/franja |
| Drenaje | - | 14 d/franja |
| Desarme de Parrillas | - | 10 d/franja |
| Preparación de la corona | - | 10 d/franja |
| Margen operacional | - | 30 d/franja |
| Tiempo mínimo de ciclo | - | 424 d/franja |

B.4. Características del mineral apilado

Tabla 11.- Características del mineral apilado. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Variable / Parámetro | Nominal | Diseño |
|-------------------------------|-------------|----------------------|
| Granulometría del mineral ROM | - | 8 – 12 in |
| Rango de ley de Cu | 0.5 – 0.7 % | 0.3 – 0.7 % |
| Humedad natural del mineral | 1.0 – 2.7 % | 3 % |
| Densidad aparente | - | 1.8 t/m ³ |
| Ángulo de reposo | - | 36° |

B.5. Construcción de la pila

Tabla 12.- Construcción de la pila. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem Pila | Nominal | Diseño |
|---------------------------------|--------------------------|---------|
| Franjas Cargadas para un año | 10 – 12 | 12 |
| Franjas en irrigación por ciclo | 10 – 11 | 11 |
| Cantidad de pisos | - | 7 |
| Altura un piso | - | 18 m |
| Pendiente de los taludes | - | 37° |
| Largo total de la pila | - | 2,000 m |
| Ancho total de la pila | 3,625 m | 4,900 m |
| Área basal total de la pila | 7,250,000 m ² | - |
| Ítem Franjas Basales 1° Piso | | |
| Ancho | - | 125 m |
| Largo | - | 2,000 m |
| Altura | - | 18 m |

B.6. Características del riego y operación

Tabla 13.- Características del riego y operación. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem | Nominal | Diseño |
|-------------------------------------|------------|--------------------------|
| Método de Irrigación | - | Goteo, Manto |
| Dimensiones Parrilla de irrigación | - | 55 x 55 m |
| Área total bajo irrigación | - | 2,590,000 m ² |
| Temperatura de la solución de riego | 15 – 30 °C | 50 °C |
| Materiales de piping | - | HDPE |

B.7. Características de la solución de riego (refino)

Tabla 14.- Características de la solución de riego. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem | Nominal | Diseño |
|---|-----------------------------------|--------------------------|
| Flujo de solución de refino | 14,500 – 16,500 m ³ /h | 16,500 m ³ /h |
| Tasa de riego | 3 – 6 L/h/m ² | 6 L/h/m ² |
| Concentración de cobre | 0.1 – 0.5 g/L | 0.5 g/L |
| Concentración de hierro | 1 – 3 g/L | 10 g/L |
| Concentración de H ₂ SO ₄ libre | 4 – 8 g/L | 8.5 g/L |
| Temperatura | 20 °C | 50 °C |
| pH | - | 1.8 |
| Potencial Redox | - | 600 – 850 mV/ENH |
| Densidad a 24°C | 1.05 t/m ³ | 1.12 t/m ³ |

B.8. Características de la solución de PLS

Tabla 15.- Características de la solución de PLS. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem | Nominal | Diseño |
|---|-----------------------------------|------------------------------|
| Flujo de solución a SX | 9,000 – 10,000 m ³ /h | 10,000 m ³ /h |
| Flujo de drenaje a pila | 13,050 – 14,850 m ³ /h | 14,850 m ³ /h |
| Concentración de cobre | 1.5 – 5.0 g/L | 5.0 g/L |
| Concentración de hierro | 0.9 – 3.0 g/L | 10.0 g/L |
| Concentración de H ₂ SO ₄ libre | 1.0 – 3.5 g/L | 2.0 – 3.5 g/L |
| Concentración de sulfato | 20.0 – 75.0 g/L | 100.0 g/L |
| Concentración de Cloro | 1.4 – 1.9 g/L | 3.0 g/L |
| Concentración de magnesio | 2.0 – 6.0 g/L | 8.0 g/L |
| Concentración de aluminio | 2.0 – 5.5 g/L | 8.5 g/L |
| Concentración de sílice | 0.05 – 0.33 g/L | 0.5 g/L |
| Temperatura | 20 °C | 50 °C (alta) 15 °C (baja) |
| pH | 1.6 – 2.0 | 1.6 – 2.0 |
| Potencial Redox | 770 – 846 mV | 600 – 850 mV |
| Densidad a 24°C | 1.05 t/m ³ | 1.12 t/m ³ |

B.9. Aireación

Tabla 16.- Parámetros de aireación. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem | Nominal | Diseño |
|---|------------|--------------------|
| Flujo de aire (1 franja y 8 sopladores) | - | 153,000 m^3/h |
| Tasa de aireación | - | 0.612 $Nm^3/h/m^2$ |
| Caída de presión del aire (soplador) | 15.5 kPa | - |
| Presión de descarga del soplador | 85.5 kPa | - |
| N° de sopladores por lado de franja | 2 – 4 | 4 |
| N° total de sopladores por franja | 4 – 8 | 8 |

B.10. Pérdidas de solución en la pila

Tabla 17.- Pérdidas de solución en la pila. Fuente: "Informe Técnico M40035-P-TREP-003"

| Ítem | Nominal | Diseño |
|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| Humedad residual en los ripios | 8.0 – 9.5 % | 9.5 % |
| Tasa de evaporación | 2.0 – 4.0 $L/m^2/d$ | 4.0 – 12.0 $L/m^2/d$ |



C. ESQUEMAS Y DIAGRAMAS

C.1. Pila de biolixiviación

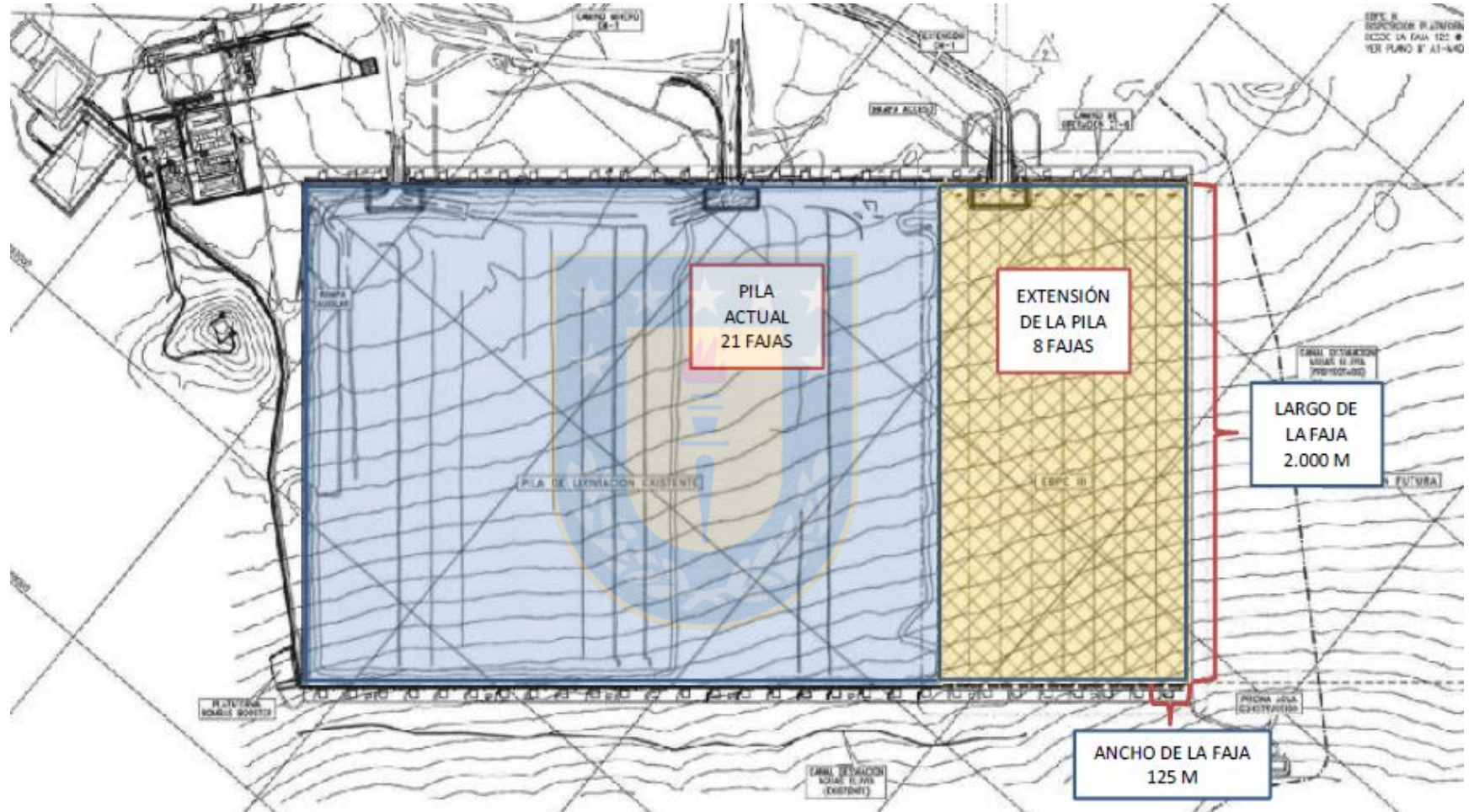


Figura 46.- Representación esquemática de pila de lixiviación de sulfuros de baja ley (Proyecto EVPE IV) (Informe Técnico M40035-P-TREP-003).

C.2. Red de aireación

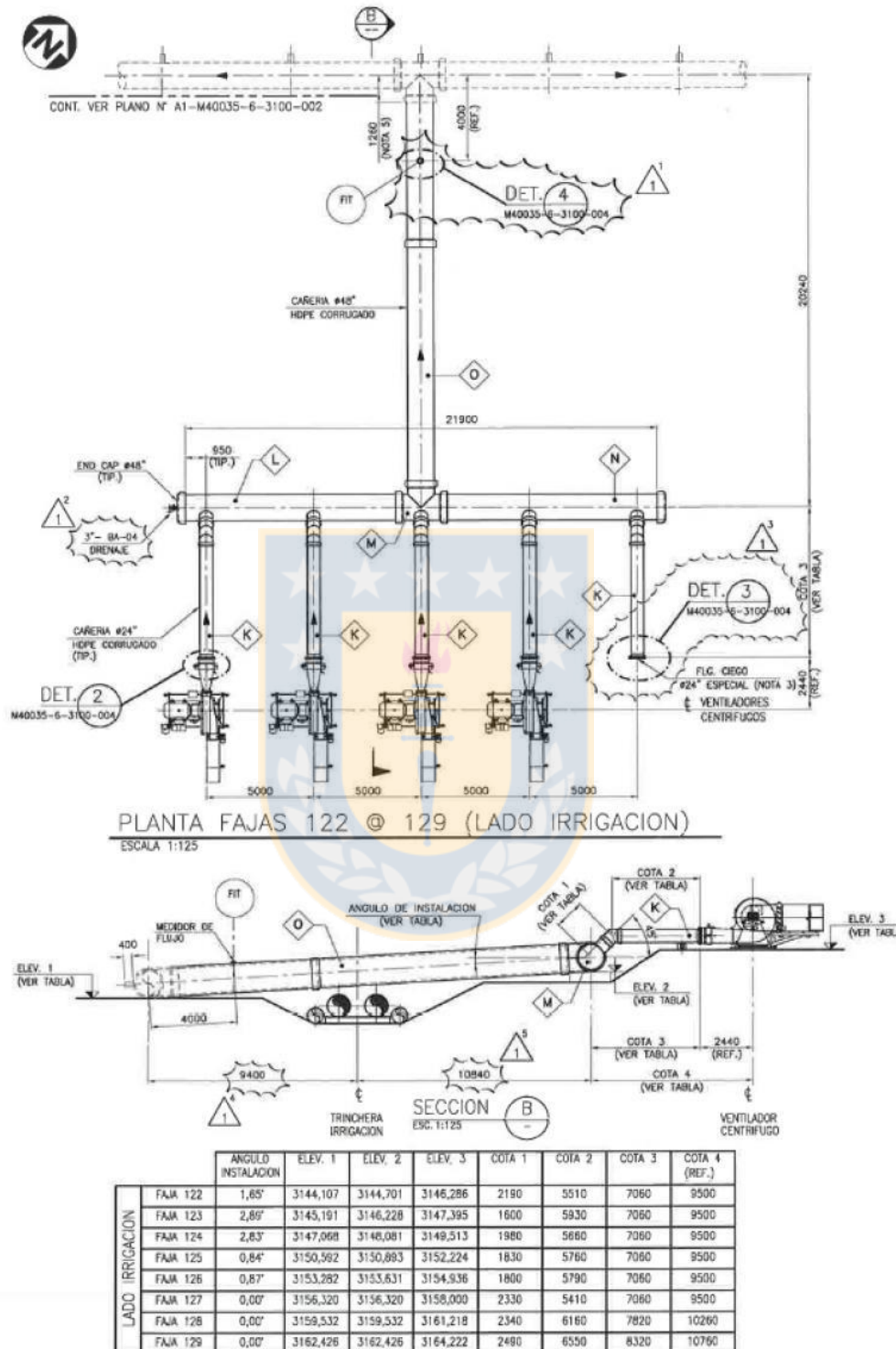


Figura 47.- Esquema del sistema de aireación basal (Informe Técnico M40035-P-TREP-003).

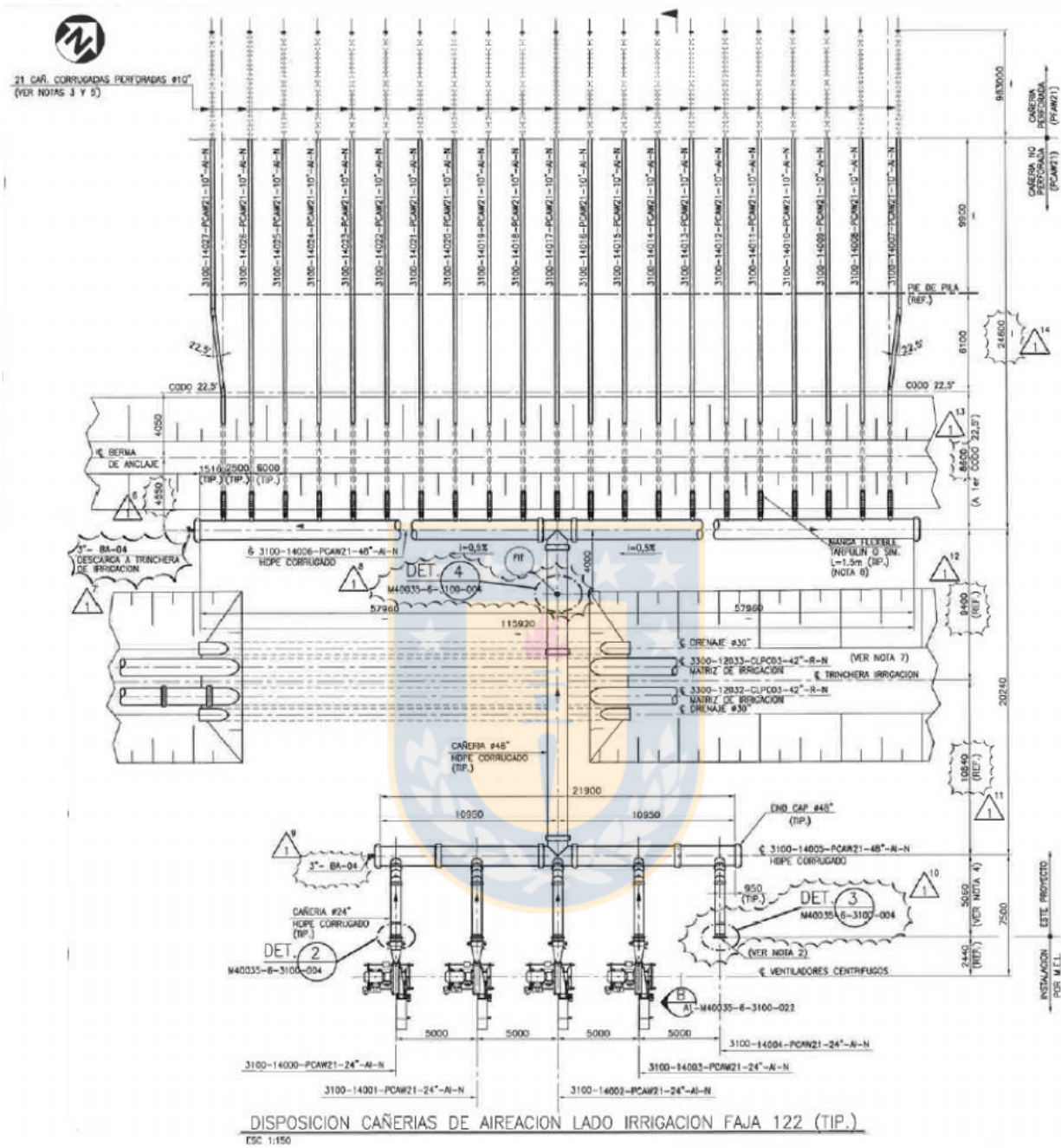


Figura 48.- Distribución de red de tuberías al interior de la pila (Informe Técnico M40035-P-TREP-003).

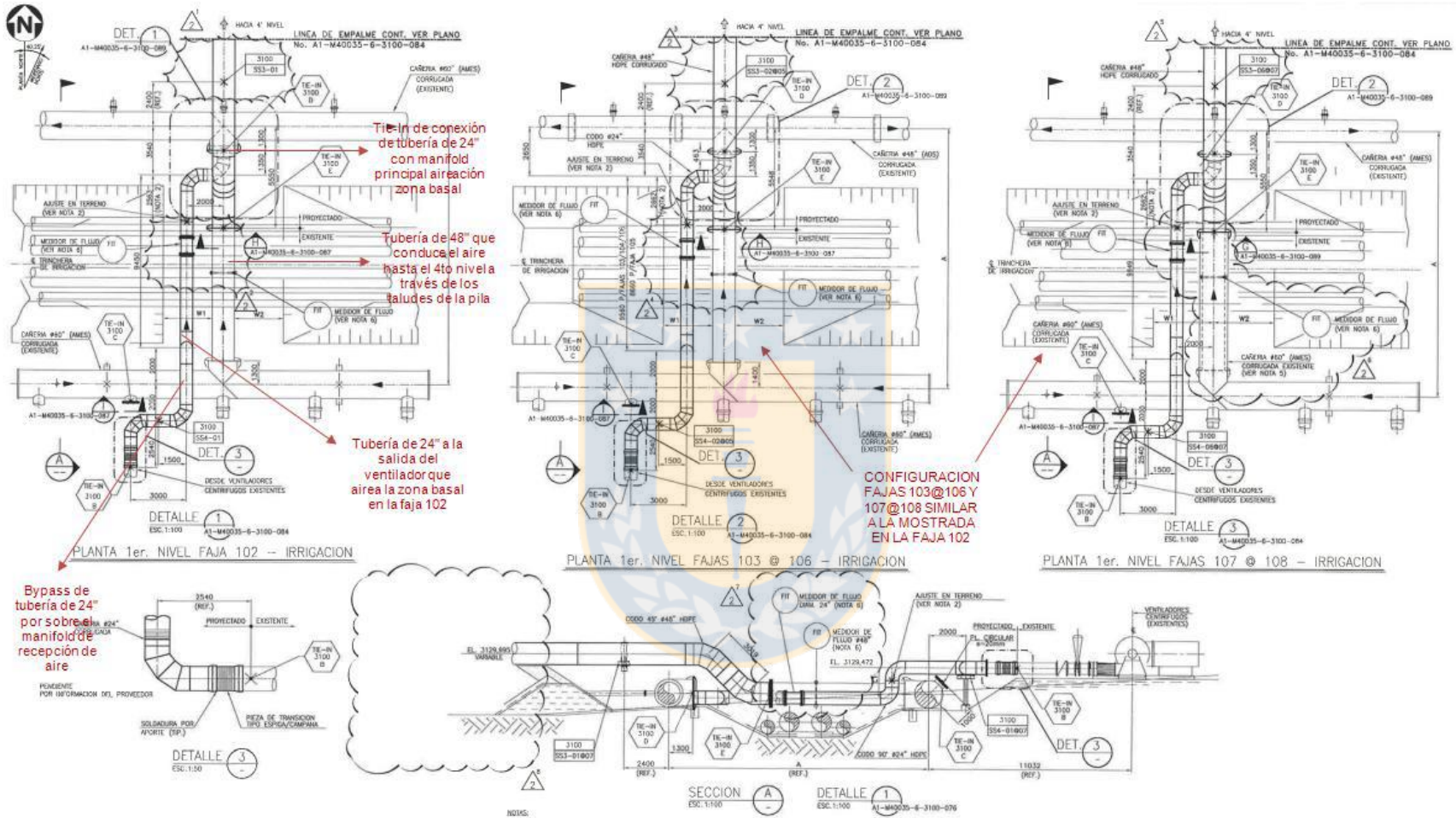


Figura 49.- Intervenciones en red de aireación basal para alimentación del piso 4 (Informe Técnico M40035-P-TREP-003).

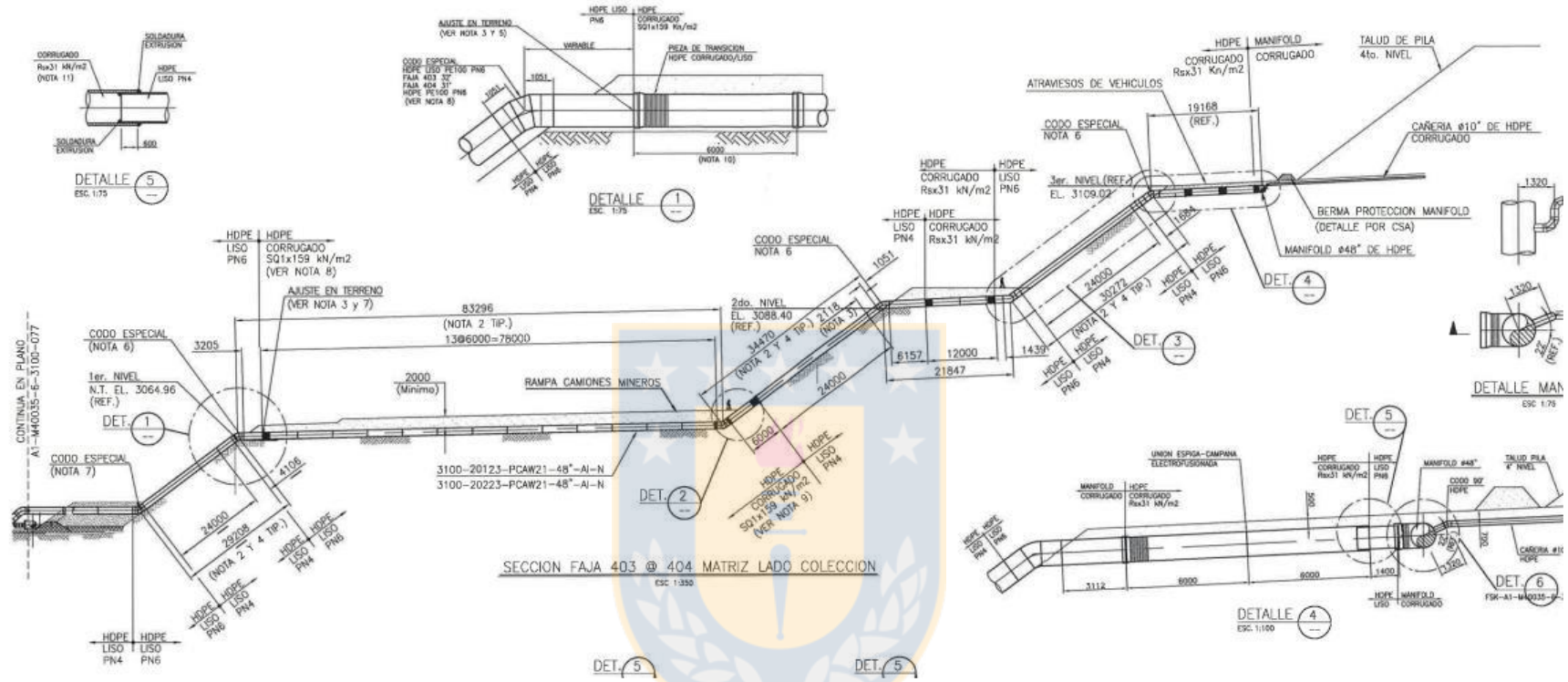


Figura 50.- Disposiciones de matrices de 48" aireación en el piso 4 (Informe Técnico M40035-P-TREP-003).

D. TABLAS

D.1. Clasificación de las bacterias según su modo de nutrirse

Tabla 18.- Clasificación de las bacterias según su forma de nutrirse

| Clasificación | Características |
|----------------|---|
| Autotróficas | Aquellas capaces de sintetizar todos los nutrientes (proteínas, lípidos y carbohidratos), a partir del dióxido de carbono |
| Heterotróficas | Aquellas que requieren carbohidratos como la glucosa para formar sus propios nutrientes |
| Mixotróficas | Aquellas que tienen la habilidad de formar sus propios nutrientes, a partir de dióxido de carbono y de carbohidratos |

D.2. Clasificación de las bacterias según su forma de respirar

Tabla 19.- Clasificación de las bacterias según su forma de respirar

| Clasificación | Características |
|---------------|---|
| Aeróbicas | Requieren oxígeno para su respiración |
| Anaeróbicas | Se desarrollan en medios exentos de oxígeno |
| Facultativas | Tienen la posibilidad de desarrollarse tanto en medios aeróbicos como anaeróbicos |

D.3. Clasificación de las bacterias según el rango de pH donde se desarrollan

Tabla 20.- Clasificación de las bacterias según el rango de pH óptimo donde se desarrollan

| Clasificación | Características |
|---------------|---|
| Acidofílicas | Se desarrollan favorablemente a un pH menor a 5 |
| Alcalofílicas | Se desarrollan favorablemente en un pH entre 9 y 12 |

D.4. Clasificación de las bacterias según su rango de temperatura óptimo

Tabla 21.- Clasificación de las bacterias según el rango de temperatura óptimo donde se desarrollan

| Clasificación | Características |
|---------------------------|---|
| Mesófilas | Se desarrollan bien a temperaturas próximas a la ambiental, entre 20 y 35°C y son las más habituales en las lixiviaciones de minerales. Pertenecen, generalmente, a los géneros Thiobacillus y Leptospirillum. |
| Moderadamente termófilas | Son aquellas cuyo comportamiento se da entre los 45 y 60°C, están presentes donde la temperatura aumenta gracias a las reacciones exotérmicas de sulfuros, en general, pertenecen a los géneros Sulfobacillus y Leptospirillum. |
| Extremadamente termófilas | Presentan un rango óptimo de temperatura entre los 60 y 80°C y raramente están presentes en operaciones de lixiviación natural. Pertenecen, generalmente, a los géneros Sulfolobus, Acidianus, Metallosphaera y Sulfurococcus. |

Tabla 23.- Resultados de reacción en cadena de polimerasa en tiempo real (parte 2)

| ID | Sulfobacillus thermosulfidooxidans | Sulfobacillus Sp. MAD | Archeas Totales | Ferroplasma acidiphilum | Sulfolobus metalicus | Ferroplasma Sp. JTC 1-2 | Thermoplasma |
|-----------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------|
| 132 | 2.24E6 | 2.40E4 | 1.18E5 | 2.16E5 | <1.00E2 | <1.00E2 | 1.67E4 |
| 133 | 2.06E6 | 4.35E4 | 1.69E5 | 3.02E5 | <1.00E2 | <1.00E2 | 1.11E4 |
| 134 | 3.29E6 | 2.34E5 | 2.13E5 | 2.34E5 | <1.00E2 | <1.00E2 | 1.41E4 |
| 135 | 7.90E5 | 1.25E4 | 8.58E3 | 2.40E3 | <1.00E2 | <1.00E2 | <1.00E2 |
| 322 | 1.28E6 | 6.33E5 | 7.55E4 | 7.43E4 | <1.00E2 | 2.08E4 | 1.70E5 |
| 323 | 8.95E5 | 9.10E4 | 8.63E3 | 1.50E4 | <1.00E2 | 2.12E3 | 4.00E4 |
| 324 | 7.38E5 | 8.28E3 | 1.36E3 | 2.71E3 | <1.00E2 | <1.00E2 | 6.23E3 |
| 325 | 9.50E5 | 3.81E4 | 1.43E4 | 3.86E4 | <1.00E2 | 1.93E3 | 9.23E4 |
| 326 | 8.80E5 | 3.81E4 | 2.83E4 | 3.28E4 | <1.00E2 | 2.61E4 | 1.08E5 |
| 327 | 1.42E6 | 6.03E4 | 7.08E4 | 7.25E4 | <1.00E2 | 8.03E4 | 2.08E5 |
| 410 | 9.83E5 | 4.54E4 | 1.82E4 | 2.99E4 | <1.00E2 | 1.42E3 | 4.99E4 |
| 411 | 1.26E6 | 1.05E5 | 1.77E4 | 2.89E4 | <1.00E2 | 4.98E3 | 7.93E4 |
| 412 | 1.32E6 | 6.18E4 | 2.73E4 | 5.60E4 | <1.00E2 | 1.23E3 | 4.69E4 |
| 413 | 1.42E6 | 6.09E4 | 2.85E4 | 4.82E4 | <1.00E2 | 1.91E3 | 4.77E4 |
| 414 | 1.26E6 | 1.76E5 | 8.68E4 | 4.73E4 | <1.00E2 | 3.18E4 | 1.38E5 |
| 415 | 7.50E5 | 5.14E4 | 2.24E4 | 1.61E4 | <1.00E2 | 8.73E3 | 3.91E4 |
| 416 | 1.68E6 | 1.00E6 | 2.16E5 | 1.12E5 | <1.00E2 | 1.06E5 | 3.28E5 |
| PLS Común | 2.18E6 | 1.37E5 | 2.07E4 | 1.35E5 | <1.00E2 | 8.00E4 | 1.73E5 |
| Refino | 8.20E5 | 1.75E4 | 2.56E3 | <1.00E2 | <1.00E2 | <1.00E2 | 2.56E3 |
| Refino E1 | 1.05E6 | 5.10E4 | 5.96E4 | 9.98E3 | <1.00E2 | 5.60E3 | 4.40E4 |
| Refino EP | 8.93E5 | 2.18E4 | 1.84E4 | 2.60E3 | <1.00E2 | 1.07E3 | 1.48E4 |

D.6. Mineralogía

Tabla 24.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de primer piso

| Franjas | Cc | Cv | Cpy | Ox |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| F101 | 54.58% | 5.72% | 20.72% | 18.99% |
| F102 | 53.63% | 5.80% | 21.37% | 19.21% |
| F103 | 54.34% | 5.90% | 20.37% | 19.39% |
| F104 | 56.64% | 5.83% | 20.41% | 17.11% |
| F105 | 54.81% | 5.66% | 24.13% | 15.41% |
| F106 | 52.61% | 6.25% | 30.35% | 10.79% |
| F107 | 49.83% | 6.42% | 31.68% | 12.06% |
| F108 | 49.04% | 7.08% | 32.33% | 11.56% |
| F109 | 51.03% | 7.18% | 30.95% | 10.84% |
| F110 | 52.31% | 6.49% | 27.50% | 13.69% |
| F111 | 50.88% | 6.84% | 29.60% | 12.68% |
| F112 | 50.93% | 6.85% | 29.46% | 12.76% |
| F113 | 50.78% | 6.75% | 29.79% | 12.68% |
| F114 | 50.91% | 6.78% | 29.43% | 12.88% |
| F115 | 50.82% | 6.77% | 29.58% | 12.82% |
| F116 | 50.75% | 6.72% | 29.84% | 12.69% |
| F117 | 47.01% | 7.03% | 20.21% | 25.75% |
| F118 | 51.05% | 5.72% | 25.94% | 17.29% |
| F119 | 52.00% | 5.38% | 26.07% | 16.55% |
| F120 | 52.64% | 5.41% | 26.66% | 15.29% |
| F121 | 53.02% | 6.08% | 26.24% | 14.66% |
| F122 | 73.06% | 5.94% | 11.88% | 9.12% |
| F123 | 69.15% | 6.47% | 13.28% | 11.10% |
| F124 | 64.62% | 6.70% | 12.68% | 16.01% |
| F125 | 52.53% | 13.35% | 15.42% | 18.70% |
| F126 | 59.47% | 9.72% | 18.78% | 12.03% |
| F127 | 64.89% | 8.51% | 18.50% | 8.09% |
| F128 | 62.63% | 12.19% | 15.40% | 9.79% |
| F129 | 30.90% | 22.30% | 46.80% | 0.00% |
| F130 | 36.43% | 20.51% | 43.07% | 0.00% |
| F131 | 36.89% | 7.39% | 54.59% | 1.13% |
| F132 | 35.46% | 8.07% | 54.79% | 1.68% |
| F133 | 18.86% | 6.80% | 73.89% | 0.44% |

Tabla 25.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 2 pisos.

| Franjas | Cc | Cv | Cpy | Ox |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| F201 | 63.67% | 5.47% | 15.76% | 15.11% |
| F202 | 62.88% | 5.90% | 16.74% | 14.48% |
| F203 | 54.39% | 6.50% | 24.74% | 14.37% |
| F204 | 50.83% | 6.99% | 26.66% | 15.52% |
| F205 | 48.55% | 7.12% | 32.99% | 11.34% |
| F206 | 50.81% | 6.63% | 31.08% | 11.49% |
| F207 | 45.19% | 5.93% | 35.11% | 13.78% |
| F208 | 48.08% | 6.09% | 37.02% | 8.81% |
| F209 | 50.98% | 5.56% | 36.11% | 7.35% |
| F210 | 51.84% | 5.60% | 37.44% | 5.12% |
| F211 | 41.46% | 7.63% | 37.65% | 13.27% |
| F212 | 41.91% | 7.50% | 37.45% | 13.14% |
| F213 | 41.64% | 7.75% | 37.52% | 13.09% |
| F214 | 41.74% | 7.99% | 37.98% | 13.29% |
| F215 | 41.70% | 7.61% | 37.13% | 13.57% |
| F216 | 41.92% | 7.78% | 37.05% | 13.25% |
| F217 | 45.29% | 11.66% | 30.34% | 12.71% |
| F218 | 45.40% | 12.88% | 23.19% | 18.53% |
| F219 | 29.70% | 16.27% | 38.21% | 15.82% |
| F220 | 45.54% | 21.39% | 22.37% | 10.70% |
| F221 | 60.98% | 9.12% | 17.58% | 12.32% |
| F222 | 54.02% | 11.26% | 16.76% | 17.96% |
| F223 | 50.30% | 11.85% | 23.52% | 14.34% |
| F224 | 57.57% | 10.93% | 22.87% | 8.62% |
| F225 | 64.20% | 8.50% | 16.16% | 11.14% |
| F226 | 35.08% | 11.99% | 45.17% | 7.75% |
| F227 | 23.92% | 12.55% | 58.03% | 5.50% |
| F228 | 35.02% | 15.81% | 44.62% | 4.55% |

Tabla 26.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 3 pisos.

| Franjas | Cc | Cv | Cpy | Ox |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| F302 | 61.99% | 8.14% | 20.81% | 9.05% |
| F303 | 59.51% | 10.12% | 21.32% | 9.05% |
| F304 | 37.04% | 19.40% | 33.51% | 10.05% |
| F305 | 47.63% | 10.47% | 26.54% | 15.35% |
| F306 | 42.62% | 10.15% | 28.75% | 18.49% |
| F307 | 42.41% | 6.72% | 40.00% | 10.86% |
| F308 | 56.85% | 5.75% | 26.73% | 10.66% |
| F309 | 56.61% | 5.61% | 19.49% | 18.29% |
| F310 | 56.44% | 5.93% | 18.56% | 19.07% |
| F311 | 67.69% | 7.20% | 13.63% | 11.49% |
| F312 | 67.62% | 7.12% | 13.56% | 11.70% |
| F313 | 67.69% | 7.30% | 13.31% | 11.69% |
| F314 | 67.34% | 7.29% | 13.54% | 11.84% |
| F315 | 67.48% | 7.31% | 13.28% | 11.93% |
| F316 | 67.58% | 7.11% | 13.42% | 11.88% |
| F317 | 55.50% | 10.05% | 19.94% | 14.51% |
| F318 | 59.27% | 7.83% | 18.21% | 14.70% |
| F319 | 56.06% | 9.09% | 22.73% | 12.12% |
| F320 | 25.19% | 8.64% | 64.79% | 1.38% |

Tabla 27.- Distribución mineralógica de mineral apilado en franjas de 4 pisos

| Franjas | Cc | Cv | Cpy | Ox |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| F402 | 66.25% | 9.71% | 13.87% | 10.17% |
| F403 | 65.03% | 10.96% | 15.83% | 8.18% |
| F404 | 61.19% | 12.43% | 17.22% | 9.15% |
| F405 | 59.08% | 10.98% | 18.49% | 11.45% |
| F406 | 56.73% | 11.35% | 24.03% | 7.89% |
| F407 | 47.36% | 11.16% | 35.47% | 6.00% |
| F408 | 39.48% | 12.14% | 44.98% | 3.40% |
| F409 | 46.30% | 13.29% | 37.73% | 2.68% |
| F410 | 42.28% | 15.71% | 40.23% | 1.78% |

D.7. Eficiencia del sistema de aireación.

Tabla 28.- Tasas de consumo de aire, tasa de aire suministrado, tasa de aireación de diseño y eficiencia del sistema de aireación para franjas de 1 piso

| Franja | Tasa de consumo | Tasa suministrada | Tasa Diseño | Eficiencia |
|--------|-----------------|-------------------|-------------|------------|
| F112 | 0.14 | 0.23 | 0.61 | 60.35% |
| F113 | 0.14 | 0.23 | 0.61 | 60.99% |
| F114 | 0.15 | 0.19 | 0.61 | 77.05% |
| F115 | 0.12 | 0.24 | 0.61 | 50.16% |
| F116 | 0.11 | 0.25 | 0.61 | 45.26% |
| F117 | 0.11 | 0.23 | 0.61 | 48.22% |
| F118 | 0.13 | 0.28 | 0.61 | 44.83% |
| F119 | 0.12 | 0.51 | 0.61 | 23.99% |
| F120 | 0.20 | 0.37 | 0.61 | 54.62% |
| F121 | 0.15 | 0.25 | 0.61 | 57.99% |
| F122 | 0.12 | 0.32 | 0.61 | 37.26% |
| F123 | 0.14 | 0.28 | 0.61 | 49.95% |
| F124 | 0.12 | 0.22 | 0.61 | 52.23% |
| F125 | 0.10 | 0.41 | 0.61 | 25.53% |
| F126 | 0.13 | 0.55 | 0.61 | 24.57% |
| F127 | 0.13 | 0.33 | 0.61 | 40.35% |
| F128 | 0.09 | 0.30 | 0.61 | 28.44% |
| F129 | 0.10 | 0.52 | 0.61 | 18.86% |
| F130 | 0.10 | 0.63 | 0.61 | 15.56% |
| F131 | 0.10 | 0.26 | 0.61 | 39.02% |
| F132 | 0.20 | 0.42 | 0.61 | 47.67% |
| F133 | 0.16 | 0.33 | 0.61 | 47.37% |

Tabla 29.- Tasas de consumo de aire, tasa de aire suministrado, tasa de aireación de diseño y eficiencia del sistema de aireación para franjas de 2 pisos

| Franja | Tasa de consumo | Tasa suministrada | Tasa Diseño | Eficiencia |
|--------|-----------------|-------------------|-------------|------------|
| F201 | 0.15 | 0.63 | 0.61 | 23.89% |
| F202 | 0.14 | 0.32 | 0.61 | 45.35% |
| F203 | 0.14 | 0.32 | 0.61 | 42.94% |
| F204 | 0.17 | 0.27 | 0.61 | 64.47% |
| F205 | 0.22 | 0.25 | 0.61 | 86.48% |
| F206 | 0.14 | 0.31 | 0.61 | 43.11% |
| F207 | 0.13 | 0.30 | 0.61 | 41.22% |
| F208 | 0.13 | 0.58 | 0.61 | 22.24% |
| F209 | 0.12 | 0.42 | 0.61 | 28.43% |
| F210 | 0.12 | 0.42 | 0.61 | 28.16% |
| F211 | 0.07 | 0.28 | 0.61 | 26.00% |
| F212 | 0.10 | 0.43 | 0.61 | 22.88% |

| | | | | |
|------|------|------|------|--------|
| F213 | 0.15 | 0.32 | 0.61 | 47.77% |
| F214 | 0.11 | 0.38 | 0.61 | 30.15% |
| F215 | 0.14 | 0.30 | 0.61 | 46.57% |
| F216 | 0.08 | 0.35 | 0.61 | 23.90% |
| F217 | 0.07 | 0.35 | 0.61 | 19.72% |
| F218 | 0.07 | 0.31 | 0.61 | 23.67% |
| F219 | 0.09 | 0.41 | 0.61 | 21.77% |
| F220 | 0.06 | 0.42 | 0.61 | 14.40% |
| F221 | 0.10 | 0.28 | 0.61 | 37.37% |
| F222 | 0.10 | 0.39 | 0.61 | 24.59% |
| F223 | 0.10 | 0.37 | 0.61 | 27.03% |
| F224 | 0.14 | 0.36 | 0.61 | 38.03% |
| F225 | 0.14 | 0.48 | 0.61 | 30.19% |
| F226 | 0.14 | 0.60 | 0.61 | 23.51% |
| F227 | 0.15 | 0.70 | 0.61 | 21.46% |
| F228 | 0.13 | 0.78 | 0.61 | 17.04% |

Tabla 30.- Tasas de consumo de aire, tasa de aire suministrado, tasa de aireación de diseño y eficiencia del sistema de aireación para franjas de 3 pisos

| Franja | Tasa de consumo | Tasa suministrada | Tasa Diseño | Eficiencia |
|--------|-----------------|-------------------|-------------|------------|
| F302 | 0.08 | 0.43 | 0.61 | 19.87% |
| F303 | 0.07 | 0.43 | 0.61 | 16.12% |
| F304 | 0.05 | 0.34 | 0.61 | 15.70% |
| F305 | 0.06 | 0.36 | 0.61 | 16.93% |
| F306 | 0.06 | 0.31 | 0.61 | 18.81% |
| F307 | 0.09 | 0.34 | 0.61 | 25.80% |
| F308 | 0.06 | 0.31 | 0.61 | 18.20% |
| F309 | 0.07 | 0.48 | 0.61 | 14.37% |
| F310 | 0.07 | 0.46 | 0.61 | 14.41% |
| F311 | 0.05 | 0.45 | 0.61 | 10.62% |
| F312 | 0.04 | 0.50 | 0.61 | 8.87% |
| F313 | 0.05 | 0.53 | 0.61 | 9.19% |
| F314 | 0.06 | 0.41 | 0.61 | 14.33% |
| F315 | 0.03 | 0.42 | 0.61 | 8.13% |
| F316 | 0.03 | 0.51 | 0.61 | 6.69% |
| F317 | 0.03 | 0.41 | 0.61 | 8.46% |
| F318 | 0.04 | 0.37 | 0.61 | 10.03% |
| F319 | 0.05 | 0.53 | 0.61 | 9.32% |
| F320 | 0.07 | 0.34 | 0.61 | 19.86% |

E. FIGURAS

E.1. Ciclo de vida de una colonia bacteriana

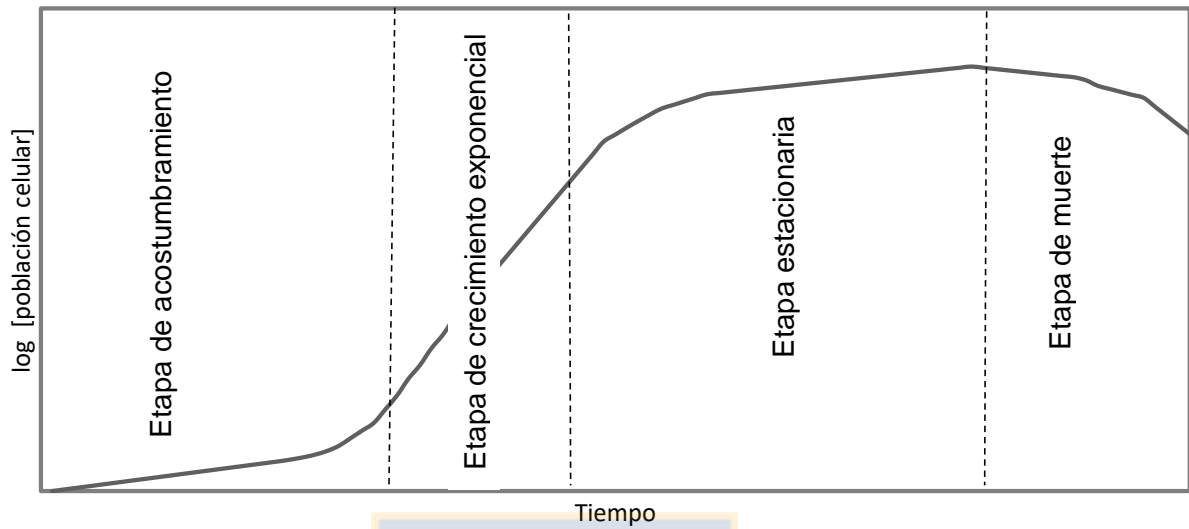


Figura 51.- Representación esquemática de las cuatro fases de un ciclo de la existencia de una colonia de bacterias (Hidrometalurgia, Domic, 2001).

En la Figura anterior se puede apreciar como varía la población de bacterias en función del tiempo. Las bacterias utilizadas en la oxidación de minerales sulfurados de cobre tienen un periodo de duplicación del orden de 20 a 70 horas [5].

E.2. Esquema del mecanismo de acción de una bacteria.

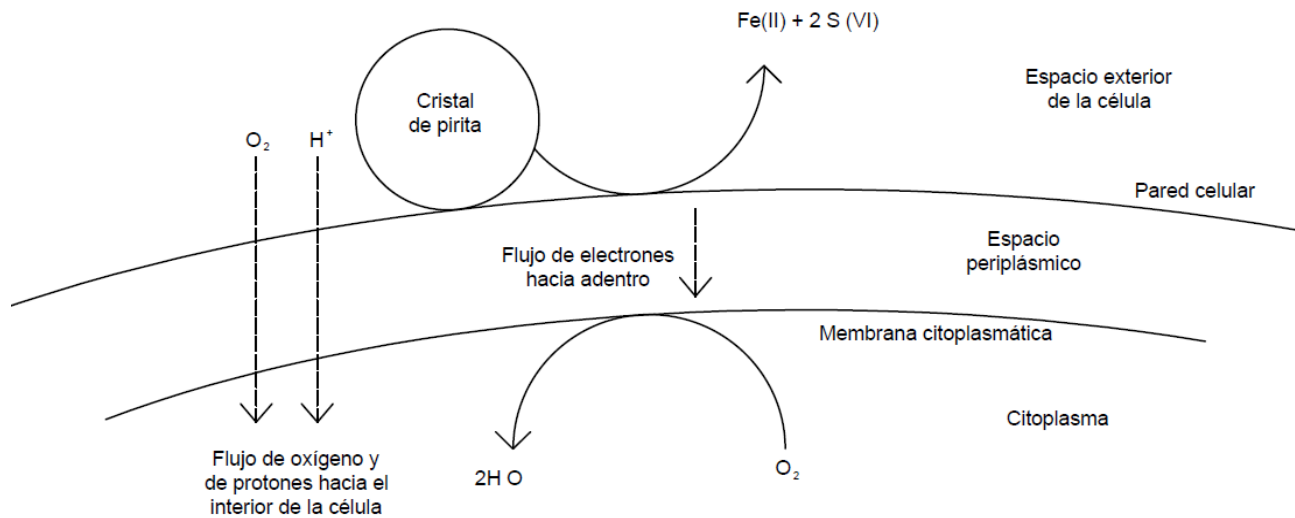


Figura 52.- Representación esquemática de la oxidación catalizada por bacterias, de un cristal de pirita en condiciones aeróbicas. (Elaboración propia).

La Figura 54, muestra esquemáticamente la oxidación de un cristal de pirita, catalizada por una bacteria. Se observa que existe un flujo electrónico hacia el interior del espacio periplásmico de la célula por donde además transita el oxígeno requerido por la bacteria anaeróbica para llevar a cabo la oxidación del mineral sulfurado.

E.3. Mineralogía

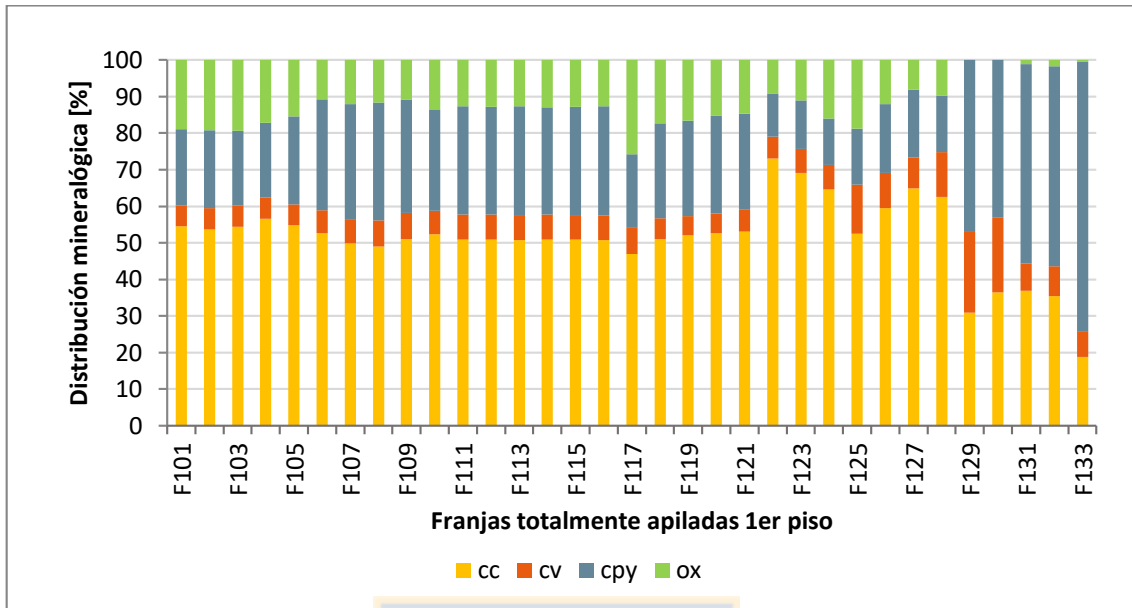


Figura 53.- Distribución mineralógica franjas de 1 piso (En columnas apiladas).

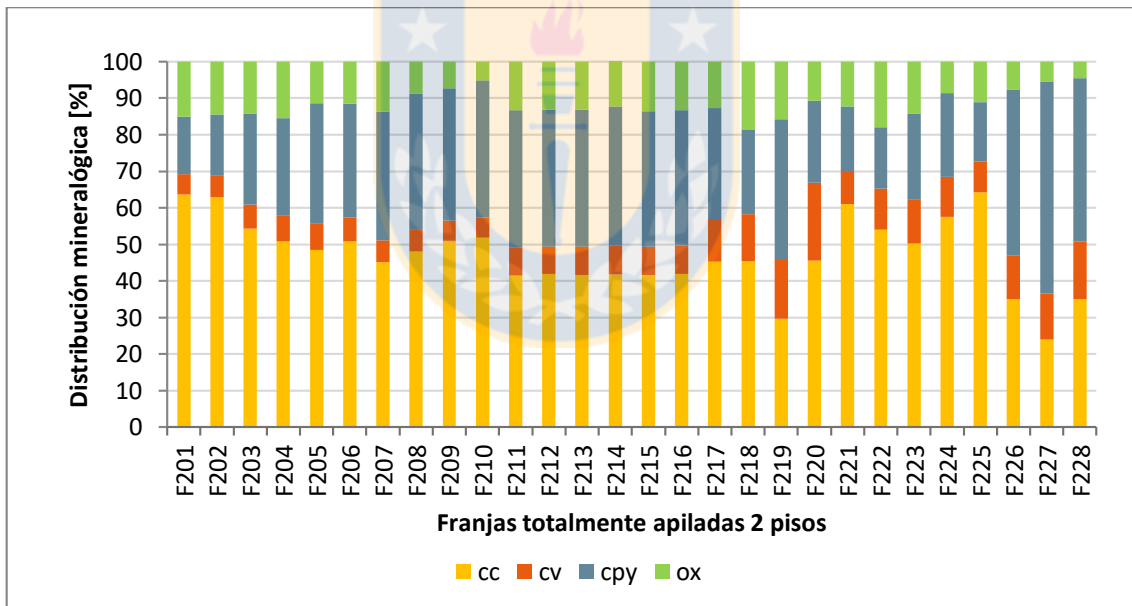


Figura 54.- Distribución mineralógica franjas de 2 pisos (En columnas apiladas).

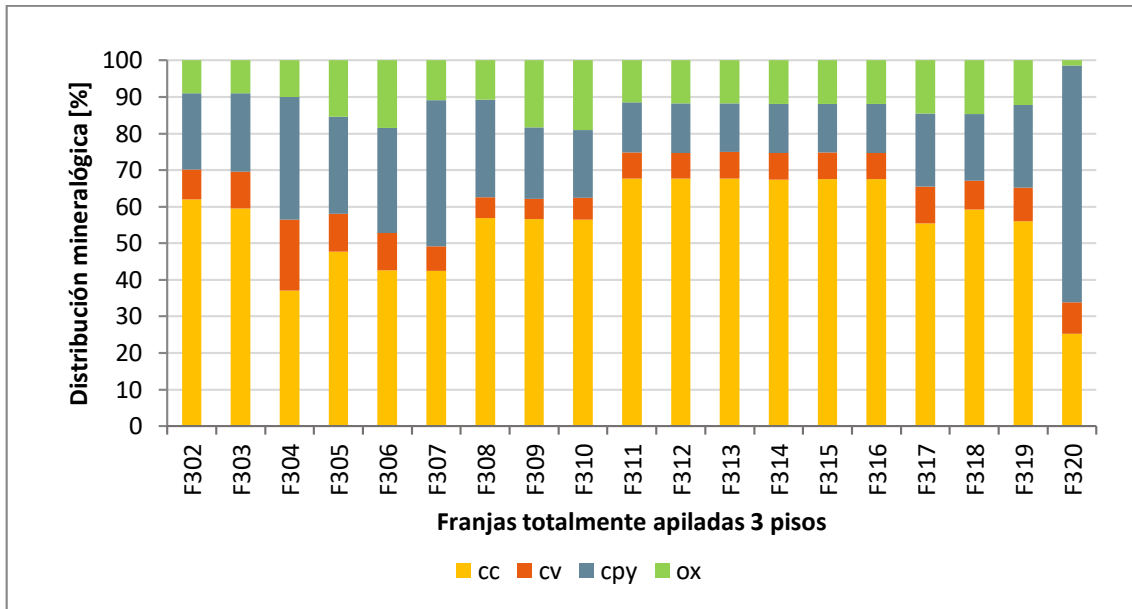


Figura 55.- Distribución mineralógica franjas de 3 pisos (En columnas apiladas).



E.4. Ajuste de la recuperación real al modelo predictivo para franjas de 2 y 3 pisos.

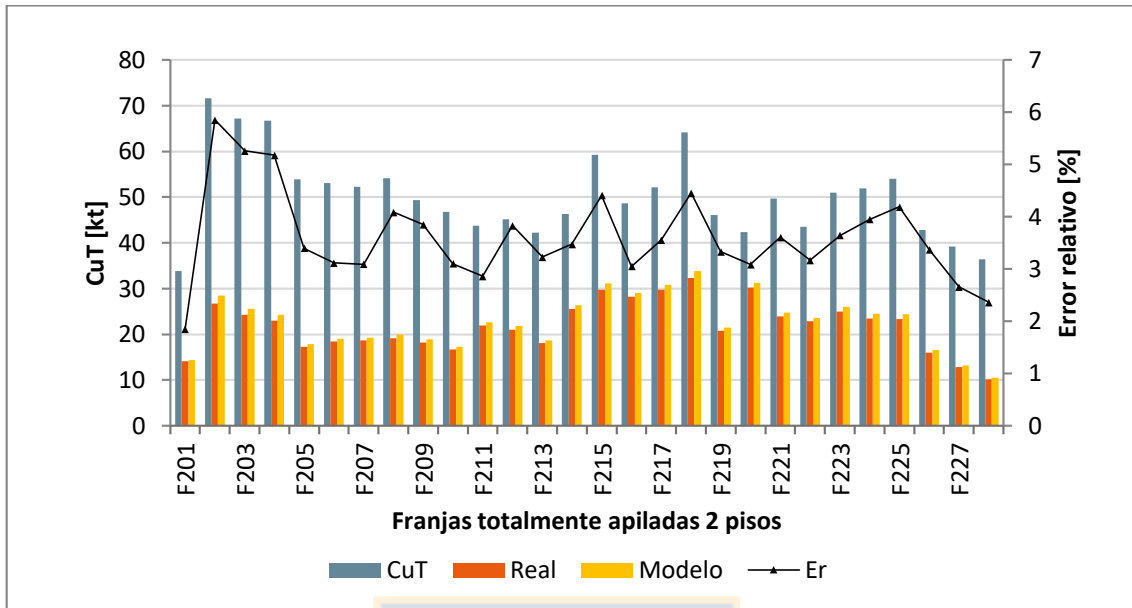


Figura 56.- Extracción de cobre real y modelada [kt]. CuT por franja y error relativo [%] del modelo predictivo, para franjas de 2 pisos.

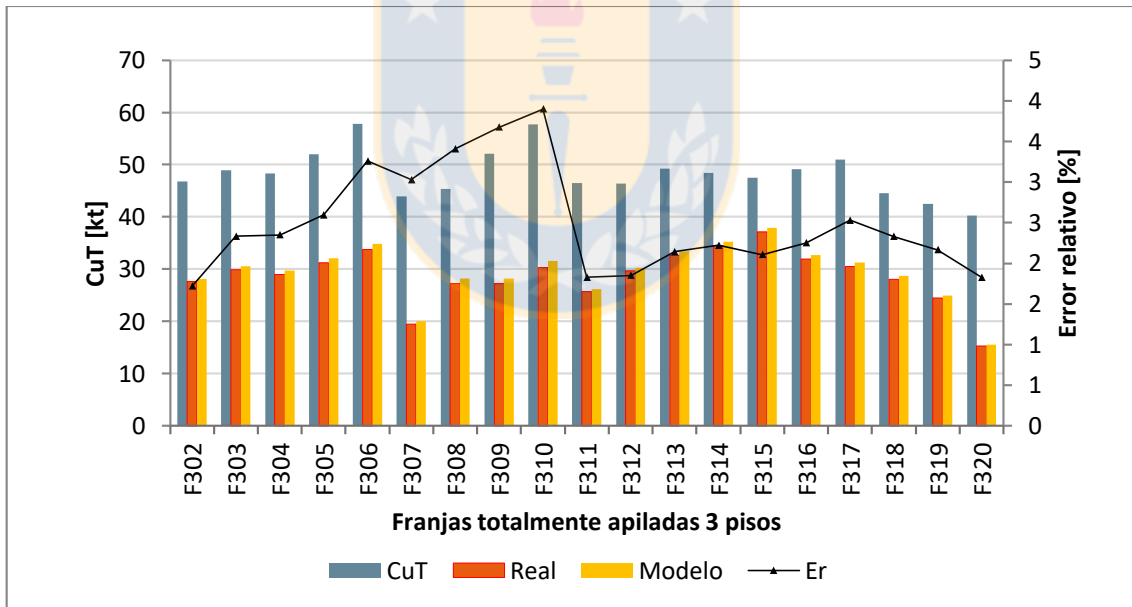


Figura 57.- Extracción de cobre real y modelada [kt]. CuT por franja y error relativo [%] del modelo predictivo, para franjas de 3 pisos.

E.5. Correlación del error del modelo predictivo y el CuT contenido.

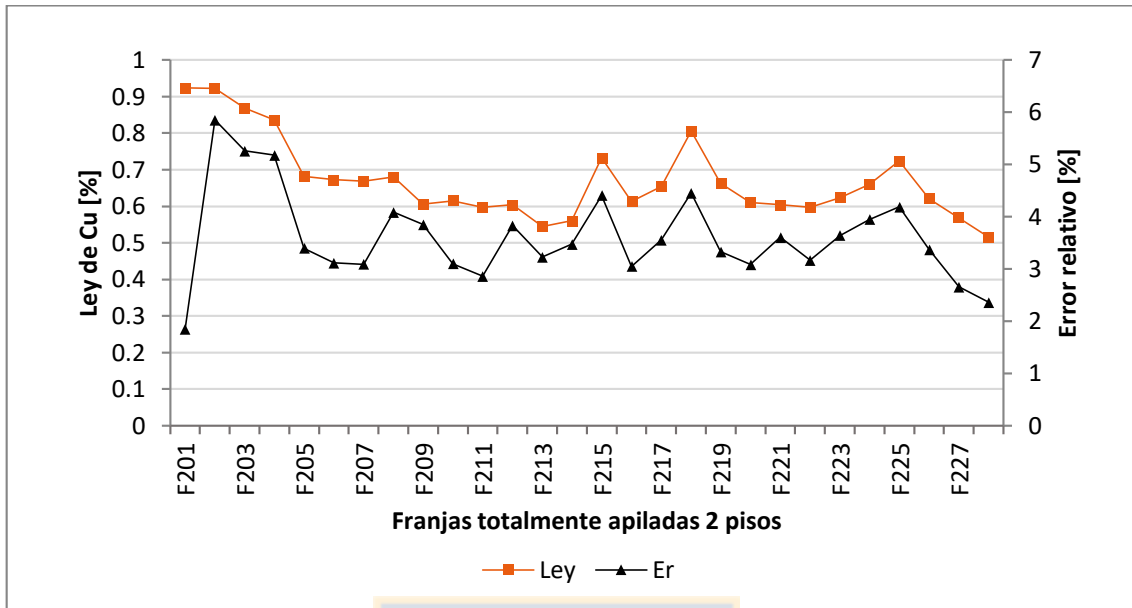


Figura 58.- Ley de Cu [%] y error relativo [%] de modelo predictivo para franjas de 2 pisos.

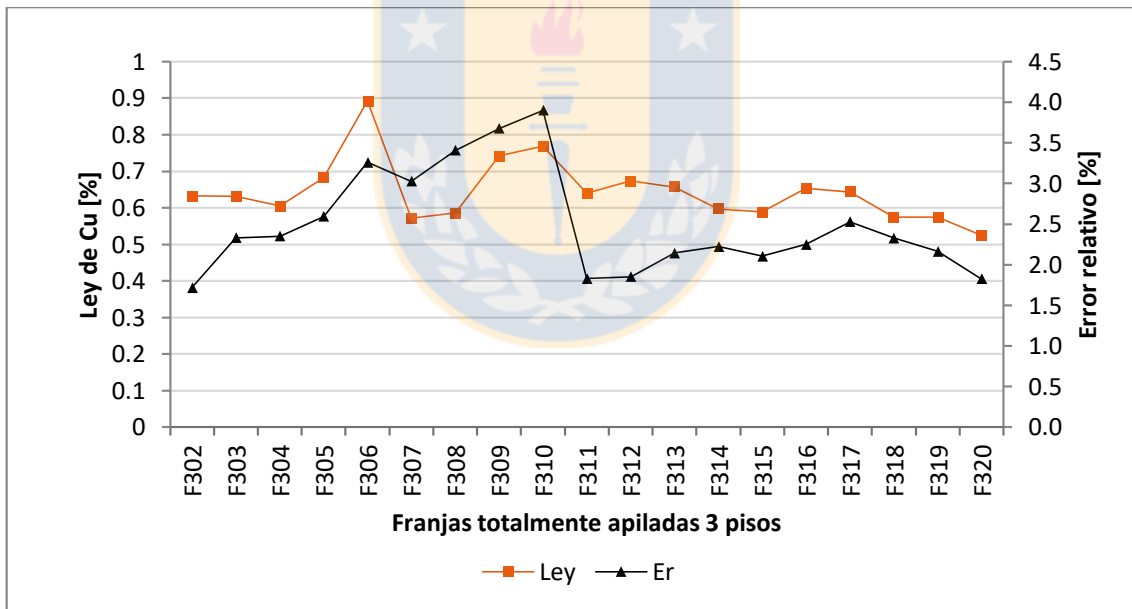


Figura 59.- Ley de Cu [%] y error relativo [%] de modelo predictivo para franjas de 3 pisos.

E.6. Distribución mineralógica de especies sulfuradas en [t] para franjas de 2 y 3 pisos.

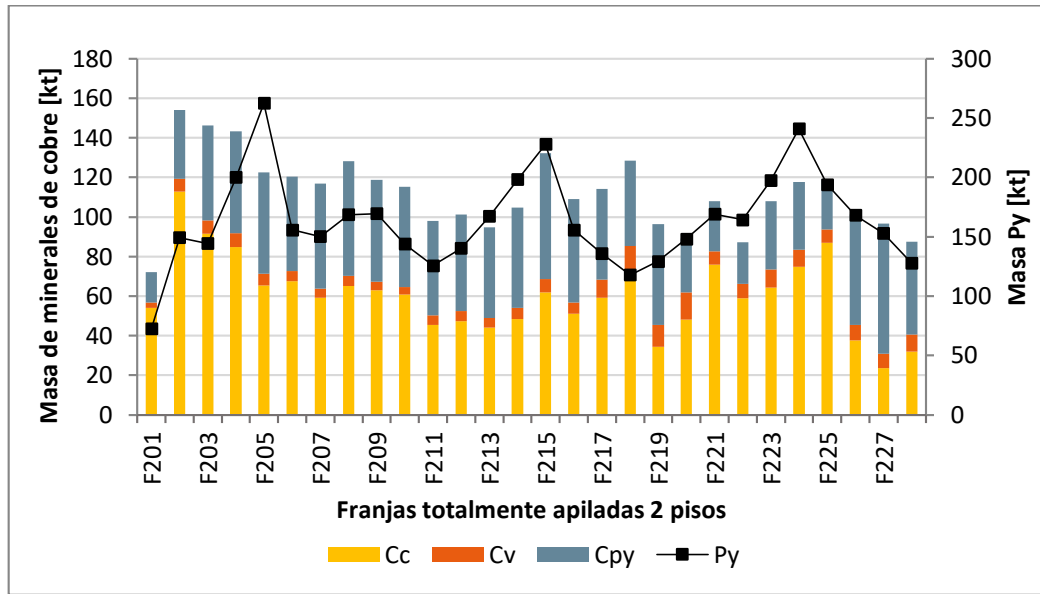


Figura 60.- Distribución mineralógica de especies sulfuradas [kt] para franjas de 2 pisos.

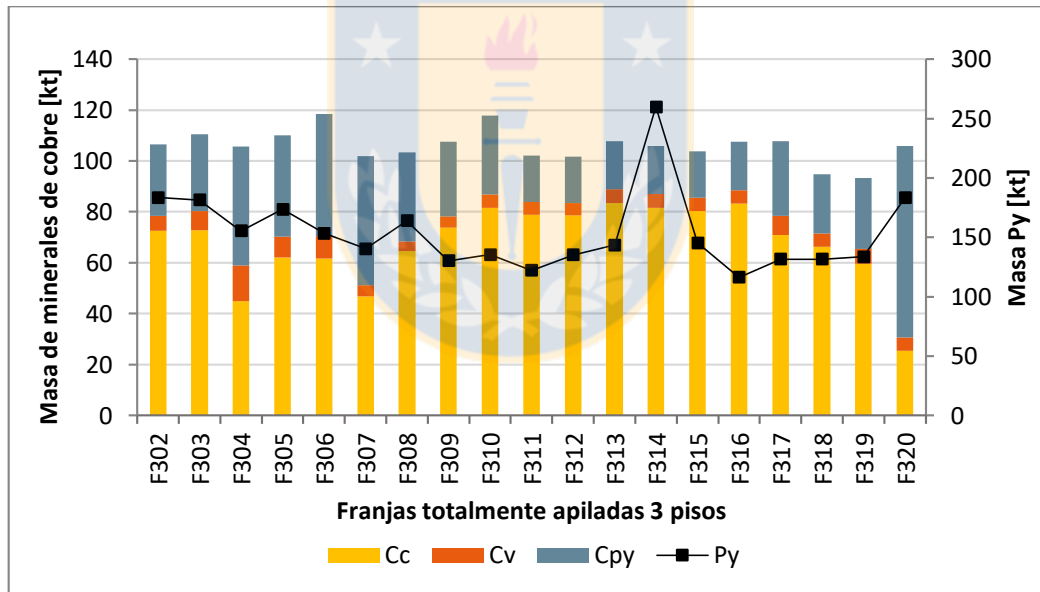


Figura 61.- Distribución mineralógica de especies sulfuradas [kt] para franjas de 3 pisos.

E.7. Distribución mineralógica de especies sulfuradas en [%] para franjas de 1, 2 y 3 pisos

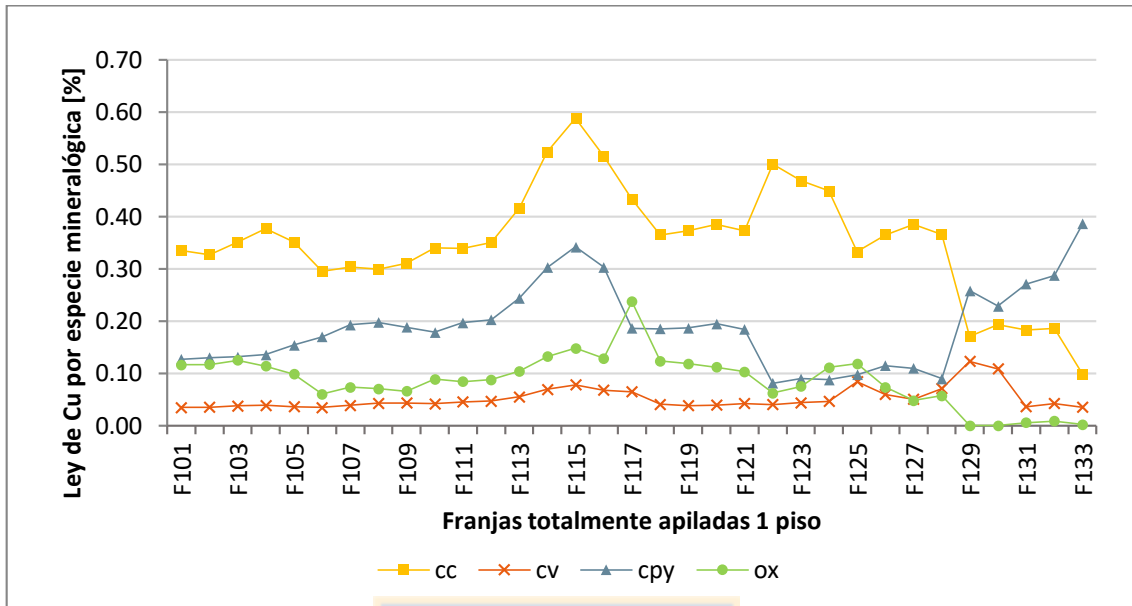


Figura 62.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 1 piso.

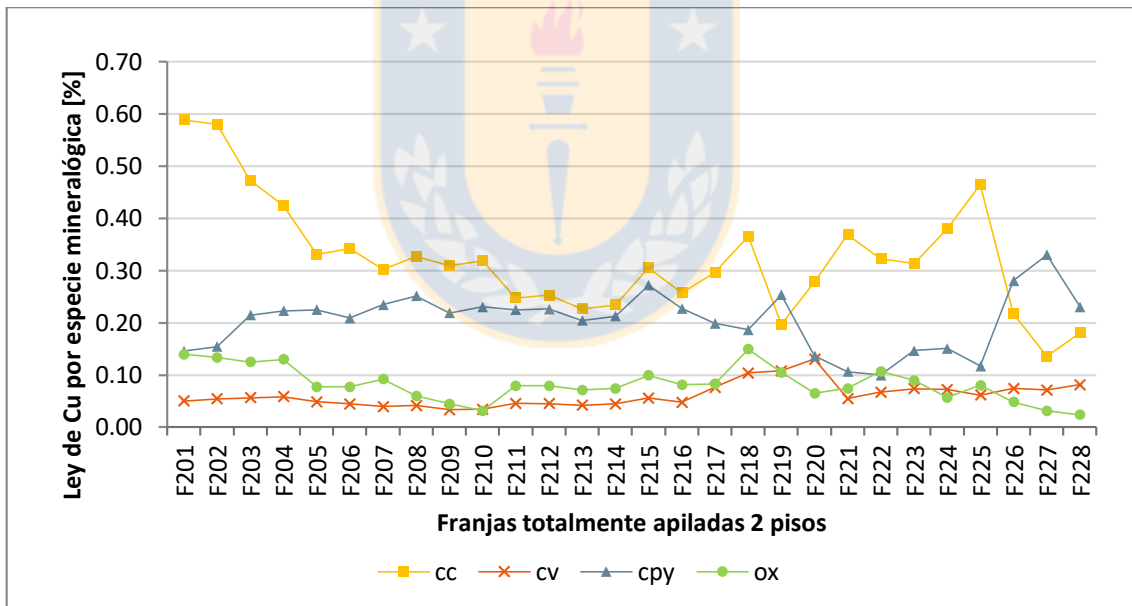


Figura 63.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 2 pisos.

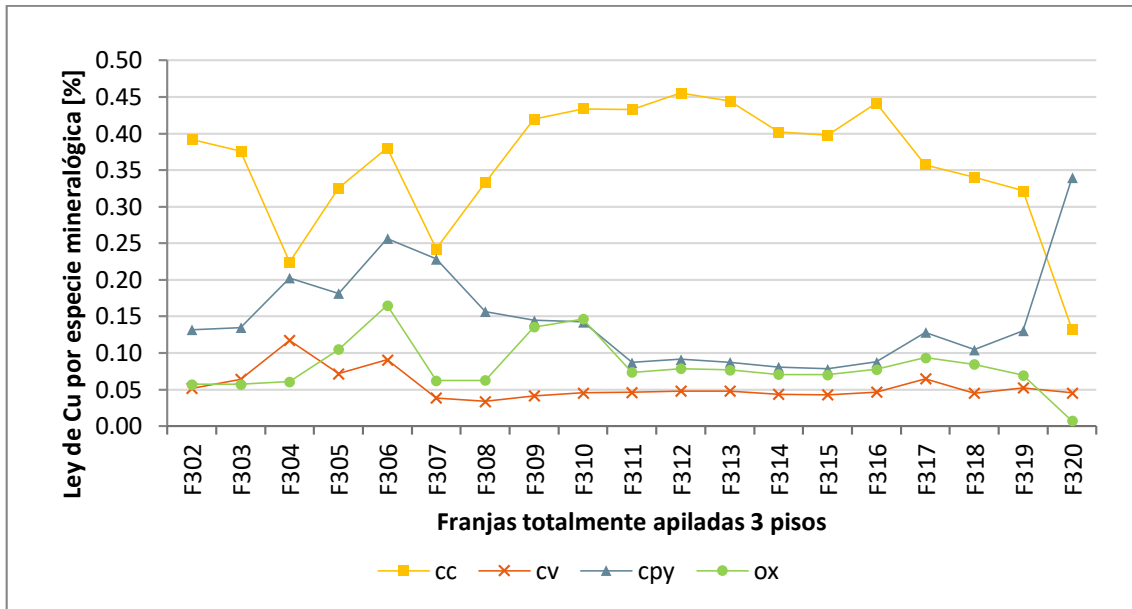


Figura 64.- Ley de cobre por especie mineralógica para franjas de 3 pisos.

