UNIVERSDIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y MATERIALES

Optimización de Malla de Riego en Pila de Lixiviación

Presentado por

DANIEL ANDRÉS REQUENA PRADO

Memoria de titulación para optar al título de

INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesora Guía:

DRA. FRANCISCA SAN MARTÍN

Profesor Co-referente:

ING. TOMÁS OLIVARES

SANTIAGO DE CHILE, SEPTIEMBRE 2021

Dedicatoria

Dedico este último trabajo de mi carrera universitaria a Dios, quien me acompañó y ayudó, a mis padres quienes fueron un apoyo incondicional y a mi amada novia que siempre estuvo ahí para darme ánimo y decirme que todo se puede lograr.

Agradecimientos

Le agradezco primeramente a Dios por darme la oportunidad de comenzar y terminar la carrera de ingeniería civil en minería, darme los recursos y las fuerzas para seguir adelante cuando todo se veía imposible.

Gracias a mis padres que me educaron y mostraron la forma correcta de vivir la vida.

Gracias a mi novia por ser mi apoyo incondicional y mi lugar feliz.

Gracias a mi profesora guía Dr. Francisca San Martin que siempre se mostró interesada en ayudarme y corregirme cuando fuese necesario.

Gracias a Tomás Olivares que sin interés alguno en recibir algo a cambio, siempre estuvo dispuesto a ayudarme.

Gracias a profesor Victor Encina por ayudarme a organizar mi plan de estudio y confiar en mi.

Resumen

Con el pasar de los años, la industria minera se ha visto confrontada por diferentes problemáticas, ya sean por falta de tecnología o por problemas ambientales, sin embargo, un factor fundamental que cada vez toma más fuerza es la baja de las leyes de cobre, sobre todo en los óxidos de cobre que son tratados mediante la hidrometalurgia. Esto genera la necesidad de obtener maquinarias y procesos optimizados que permitan una reducción del costo de producción, a fin de lograr beneficios. Dicho trabajo no es simple y requiere ser tratado con la mayor rapidez posible. Muchas veces al intentar cambiar a maquinaria más avanzada se incurre en costos elevados, por lo que, no todas las faenas mineras son capaces de solucionar esta problemática por ese rumbo, es por ese motivo que este trabajo de título se optimizó la malla de riego en relación con la distribución geométrica de los emisores dispuestos en la superficie de la pila, tomando en consideración como el área circular de riego afecta en la cantidad de mineral lixiviado.

Para lo anterior, se realizaron 48 simulaciones donde se ocupó la misma pila de lixiviación con dimensiones de corona de 1600 m x 350 m. Además, se diseñó un solo sistema de impulsión, el cual se utilizó a lo largo de todas las simulaciones. Con lo anterior definido, se utilizaron distintos diámetros de boquilla de aspersores de la marca Senninger del modelo MiniWobbler, debido a que, en el momento en que se varíen las geometrías de distribución de emisores, el caudal requerido por estos también lo hará, por lo cual, el aspersor debe cumplir con los requerimientos de estos nuevos valores de caudal.

Para la realización de las simulaciones se utilizaron los software Kypipe y EPANET, el primero se utilizó netamente para realizar el modelo y esquelitazación del sistema de riego y el segundo se ocupó para realizar los cálculos de caudal y presiones en cada emisor y tuberías relacionadas con el transporte de la solución lixiviante.

Para lograr generar una comparación que permitió determinar qué sistema de riego es el óptimo, se compararon 4 aspectos fundamentales los cuales son la uniformidad de riego, área regada, costo de implementación de malla de riego y el costo energético del sistema de impulsión. Además, para cuantificar estos criterios, se implementó un análisis económico, donde se maximizó la utilidad en función con los costos relacionados a la inversión inicial y al costo por términos energéticos.

Luego de concluir con las simulaciones y el análisis de los datos recopilados, se obtuvo que la geometría de distribución de emisores que mejores resultados presentó fue la cuadrada y para efectos de este trabajo de título, la malla de riego que obtuvo la mayor utilidad fue la simulación 28 que presentó 4.448 m^2 de área total regada, una utilidad de MMUS$ 986 y un coeficiente de uniformidad de 99,2%.

Abstract

Over the years, the mining industry has been confronted by different problems, either due to lack of technology or environmental problems, however, a fundamental factor that is becoming more and more important is the drop in copper grades, especially in copper oxides that are treated by hydrometallurgy. This generates the need to obtain optimized machinery and processes that allow a reduction in the cost of production, in order to achieve benefits. Such work is not simple and needs to be dealt with as quickly as possible. Many times when trying to change to more advanced machinery, high costs are incurred, so not all mining sites are able to solve this problem in this way, that is why this title work optimized the irrigation mesh in relation to the geometric distribution of the emitters arranged on the surface of the heap, taking into consideration how the circular irrigation area affects the amount of leached ore.

For this purpose, 48 simulations were carried out using the same heap leach pad with crown dimensions of 1600 m x 350 m. In addition, only one drive system was designed and used throughout all the simulations. With the above defined, different diameters of Senninger sprinkler nozzles of the MiniWobbler model were used, due to the fact that, at the moment in which the distribution geometries of the emitters vary, the flow required by them will also vary, therefore, the sprinkler must comply with the requirements of these new flow values.

Kypipe and EPANET software were used for the simulations, the former was used to model and model the irrigation system and the latter was used to calculate the flow rate and pressures in each emitter and piping related to the transport of the leaching solution.

In order to generate a comparison to determine which irrigation system is the optimal one, four fundamental aspects were compared, which are irrigation uniformity, irrigated area, cost of irrigation mesh implementation and the energy cost of the impulsion system. In addition, to quantify these criteria, an economic analysis was implemented, where the utility was maximized based on the costs related to the initial investment and the cost per energy terms.

After concluding with the simulations and the analysis of the data collected, it was obtained that the geometry of emitter distribution that presented the best results was the square geometry and for the purposes of this title work, the irrigation grid that obtained the highest utility was simulation 28, which presented 4,448 m^2 of total irrigated area, a utility of MMUS$ 986 and a uniformity coefficient of 99.2%.

Índice General

1 Capítulo I: Introducción 12

1.1 Introducción general 12

1.2 Definición de problema 13

1.3 Hipótesis 13

1.4 Objetivos 13

1.4.1 Objetivos generales: 13
1.4.2 Objetivos específicos: 13

1.5 Alcances 14

2 Capítulo II: Marco teórico 15

2.1 Antecedentes generales 15

2.2 Etapas generales del proceso hidrometalúrgico 15

2.2.1 Chancado y conminución 15
2.2.2 Aglomeración y curado 16
2.2.3 Lixiviación 17
2.2.4 Extracción por solvente 18
2.2.5 Electro-obtención 18

2.3 Lixiviación 19

2.3.1 Lixiviación en Botaderos 22
2.3.2 Lixiviación *In situ* 23
2.3.3 Lixiviación en Batea 24
2.3.4 Lixiviación en Pila 24

2.4 Parámetros relevantes para la lixiviación 28

2.4.1 Distribución granulometría 28
2.4.2 Permeabilidad 28
2.4.3 Altura de pila 28
2.4.4 Tasa de riego 29
2.4.5 Tiempo de lixiviación 29
2.4.6 Concentración de ácido en solución lixiviante 29

2.5 Soluciones acuosas presentes en el proceso de lixiviación 29

2.5.1 Intermediate Liquid Solution *(ILS)* 30
2.5.2 Pregnant Leaching Solution *(PLS)* 30
2.5.3 Refino 30

2.6 Dimensionamiento de pila de lixiviación 30

2.6.1 Criterios para el diseño y dimensionamiento de una pila de lixiviación 30
2.6.2 Cálculos para dimensionamiento geométrico de pila de lixiviación 31

2.7 Sistema de riego localizado de alta frecuencia RLAF 31

2.7.1 Descripción 31
2.7.2 Riego con utilización de goteros 32
2.7.3 Riego con utilización de microaspersores 32
2.7.4 Riego con utilización de miniaspersores 32
2.7.5 Instalación de sistema de riego localizado de alta frecuencia (RLAF) 33

2.8 Teoría hidráulica en tuberías 34
2.8.1 Caudal 34
2.8.2 Presión 35
2.8.3 Relación caudal y presión 35
2.8.4 Hidráulica en tuberías 38
2.8.5 Coeficiente de uniformidad 43

2.9 Componentes hidráulicos en el proceso de riego en lixiviación en pila 44
2.9.1 Bombas 44
2.9.2 Equipos de control y medición 45
2.9.3 Tuberías 46
2.9.4 Emisores 46

2.10 Recolección de soluciones finales del proceso 47

2.11 Dimensionamiento del sistema de impulsión 48
2.11.1 Descripción 48
2.11.2 Caudales por sección de trabajo 48
2.11.3 Número de Reynolds ($\boldsymbol{Re}$) 50
2.11.4 Cálculo de diámetro de tubería 51
2.11.5 Presión de trabajo 51
2.11.6 Dimensionamiento de tuberías 52
2.11.7 Dimensionamiento de bombas del sistema de impulsión 52

2.12 Funcionamiento de software EPANET 53

3 Capítulo III: Metodología 56

3.1 Descripción de metodología 56

3.2 Descripción de ejecución de simulaciones 62
3.2.1 Parámetros fijos para las simulaciones 62

3.3 Variables involucradas en el proceso de diseño 64
3.3.1 Variables de entrada 64
3.3.2 Variables de salida 64

3.4 Cálculos de parámetros estándar para las diferentes simulaciones 64
3.4.1 Diseño de pila de lixiviación 64

3.5 Simulaciones 68
3.5.1 Simulación con geometría cuadrada 69
3.5.2 Simulación con geometría triangular 74
3.5.3 Resumen de resultados obtenidos 77
3.5.4 Análisis económico 82

4 Capitulo IV: Análisis de resultados 85

4.1 Uniformidad de riego 87

4.2 Área regada 89

4.3 Costo de implementación de malla de riego 92

4.4 Análisis económico 92

5 Capitulo V: Conclusiones 94

6 Capitulo VI: Recomendaciones 95

7 Referencias 96

8 Anexo 98

8.1 Imágenes de interfaz de software 98

8.2 Esquemas representativos 99

Índice de figuras

Figura 1. Esquema explicativo del mecanismo mediante el cual se produce la alglomeración y curado del mineral (Miranda, 2012). 17

Figura 2. Esquema representativo de celda para lecho fluidizado (Hernández, 2006). 19

Figura 3. Esquema donde se muestran las 5 etapas del proceso de lixiviación de la solución en la partícula (Guiachetti, 2011). 22

Figura 4. Esquema representativo de lixiviación en botadero (Schulz, 2003). 23

Figura 5. Esquema representativo del método de lixiviación In Situ (Schulz, 2001). 24

Figura 6. Esquema de instalación del sistema de riego de alta frecuencia, donde se presentan los nombres de los componentes principales. 34

Figura 7. Curva de emisor donde en el Y se encuentra el caudal en (l/h) y el eje X la presión en (m). 37

Figuera 8. Elementos de conducción de fluido a través de una sección transversal uniforme (Retamal, 2008). 39

Figura 9. Abaco de Moody donde se relaciona el factor fricción con el número de Reynolds y la rugosidad relativa. 42

Figura 10. Esquema representativo de régimen laminar y turbulento según Reynolds. 50

Figura 11. Esquema de simulación con configuración de tuberías primaria, secundaria, laterales y emisores. 57

Figura 12. Modelo realizado en software Kpype e importado a EPANET del sistema de riego, con sistema de impulsión y demandas generales para módulos. 58

Figura 13. Ejemplo de geometría de trabajo cuadrada, la cual se muestra en color rojo y se forma desde la unión de cuatro centros de circunferencia de riego en color azul. 59

Figura 14. Ejemplo de geometría triangular de trabajo, la cual se muestra en color rosado y se forma desde la unión de tres centros de circunferencia de riego, en color azul se aprecia la circunferencia de alcance del emisor. 60

Figura 15. Esquema de circunferencia mojada por emisor en función del radio. 60

Figura 16. Esquema de disposición de tuberías en la pila de lixiviación. 63

Figura 17. Dimensiones de pila de lixiviación y la división en 20 módulos. 66

Figura 18. División de un módulo en submódulos. 66

Figura 19. Esquema de pendiente longitudinal en la pila de lixiviación. 67

Figura 20. Esquema de pendiente transversal en la pila de lixiviación. 67

Figura 21. Fotografía del mineral crisocola. 68

Figura 22. Esquema de disposición de impermeabilización en la base de la pila. 68

Figura 23. Esquema de distribución geométrica de emisores y las dimensiones de distancias. 69

Figura 24. Dimensiones de submódulo. 70

Figura 25. Esquema de distribución geométrica de emisores y las distancias entre centros de circunferencias. 74

Figura 26. Esquema de una Geometría triangular donde se muestra la distancia existente entre dos laterales. 75

Figura 27. Gráfico de coeficiente de uniformidad Vs diferencia de presión. 87

Figura 28. Esquema donde se muestra en color magenta el área no regada en función del radio de las circunferencias de riego. 90

Figura 29. Esquema de formación intercalada de emisores por unidad de lateral. 91

Figura 30. Gráfico de área total regada en función del radio de alcance de riego. 91

Figura 31. Gráfico de costo de implementación de malla de riego en función del radio de riego. 92

Figura 32. Interfaz de trabajo del software EPANET, donde se puede apreciar el modelo esqueletizado de la pila de lixiviación. 98

Figura 33. Interfaz de trabajo del software Kypipe. 98

Figura 34. Esquema representativo de una posible disposición del sistema de impulsión en la entrada de piscina de ILS. 99

Figura 35. Esquema representativo de disposición de tuberías y pila de lixiviación. 99

Figura 36. Esquema representativo de la disposición de aspersores en la pila. 100

Índice de tablas

Tabla 1. Cinética de reacción de minerales de cobre en presencia de solución acuosa en relación con el tiempo de exposición (Domic, 2001). 21

Tabla 2. Resumen de clasificación de tipos de riego según el caudal aplicado. 33

Tabla 3. Valores de parámetro x para distintitos tipos de emisores (Saldarriaga Valderrama, 2002) 38

Tabla 4. Valores de diámetro de aspersor con su respectivo caudal, presión y constante. . 61

Tabla 5. Propiedades físicas y entorno de comunes de localización. 67

Tabla 6. Valores obtenidos de caudales en la simulación. 72

Tabla 7. Valores obtenidos de presiones en la simulación 73

Tabla 8. Valor de coeficiente de uniformidad obtenido. 73

Tabla 9. Valores obtenidos de caudales en la simulación. 76

Tabla 10. Valores obtenidos de presiones en la simulación. 76

Tabla 11. Valor de coeficiente de uniformidad obtenido. 77

Tabla 12. Resumen de resultados obtenidos de cantidad de aspersores y área total regada. 77

Tabla 13. Resumen de resultados obtenidos de presiones. 79

Tabla 14. Resumen de resultados obtenidos de caudales y configuración de válvula reductora de presión. 80

Tabla 15. Resumen de resultados obtenidos de costos de implementación de malla de riego. 81

Tabla 16. Supuestos realizados y valores definidos para el costo energético por hora, recuperación de cobre, precio del cobre y valor del dólar. 82

Tabla 17. Valores de costos y utilidad de proceso de lixiviación estudiado. 83

Tabla 18. Resumen de los valores obtenidos para las simulaciones de número de aspersores, área total regada, coeficiente de uniformidad y utilidad. 85

Tabla 19. Resumen donde se presenta el coeficiente de uniformidad y diferencia de presión a lo largo de la malla de riego, asociado a una geometría de distribución de emisores. 87

Tabla 20. Resumen del área regada en función del radio de acción de los aspersores. 89

Tabla 21. Resumen de los valores obtenidos para la simulación 28. 92

1 Capítulo I: Introducción

1.1 Introducción general

Desde los comienzos de la extracción de mineral se ha buscado la forma de obtener la mayor recuperación posible y realizando gastos bajos que aseguren un beneficio razonable. Para lo anterior, existen principalmente dos caminos, la pirometalurgia, que utiliza altas temperaturas para lograr fundir los minerales y lograr separar la ganga de la mena, y por otro lado, la hidrometalurgia, la cual utiliza como agentes de acción para los procesos extractivos soluciones acuosas que permiten la extracción de metales (Schulz, 2003).

La lixiviación es un proceso que permite tratar minerales de baja ley con un costo relativamente bajo en comparación con la pirometalurgia, además de ser un proceso con menor impacto ambiental y que permite un grado alto de monitoreo y automatización (Schulz, 2003). La lixiviación es un proceso que busca extraer el metal del mineral utilizando soluciones acuosas, las cuales percolan a través de la pila de material a trabajar, para finalmente ser recolectados por medio de la disposición de geomembranas en los cimientos de la pila. Este proceso permite trabajar con leyes cada vez mas bajas (Domic, 2001).

Los beneficios de utilizar este proceso son que permite una gran selectividad y, en la actualidad, según los estudios realizados, es posible trabajar tanto óxidos de cobre como sulfuros de cobre primarios, por lo que, existe una gran oportunidad de trabajo, abriendo la posibilidad de trabajar con minerales que antes solo se podían tratar por la vía pirometalurgia (Arcos, 2019).

Por otra parte, al realizar una extrapolación del comportamiento de las leyes de óxido de cobre para un futuro, se puede apreciar que cada vez son más bajas (COCHILCO, 2017). Por este motivo es necesario optimizar el proceso de lixiviación. Para lo anterior, un punto a considerar es la disposición de la malla de riego, la cual puede ser optimizada, alcanzado valores de recuperación mayores.

En el presente trabajo se estudiará la optimización de la malla de riego de alta frecuencia, en relación con la distribución geométrica de los emisores dispersos por la parte superficial de la pila, con la finalidad de encontrar un riego homogéneo, el cual permita una mayor recuperación de mineral. Lo anterior, se realizará mediante simulaciones donde se variará la distribución geométrica de los emisores en la parte superficial de la pila, evaluando la mayor área regada por unidad de emisor y la menor diferencia de caudal y presión en la totalidad de la malla. Dichas simulaciones se realizarán utilizando un programa denominado Kypipe y EPANET, donde se recopilarán los datos de salida en cada terminal o emisor.

Es de gran importancia mencionar que esta optimización no tan solo propiciará una recuperación mayor en óxidos de cobre, sino que también para los sulfuros de cobre.

Lo anterior, tiene grandes repercusiones, debido a que solo bastaría hacer un estudio hidráulico de la solución lixiviante que se utiliza para el proceso y así poder encontrar una optimización de la malla de riego para este tipo de mineral.

1.2 Definición de problema

En la actualidad, la minería se enfrenta a minerales con leyes cada vez menores, por lo que la óptima utilización de los recursos de lixiviación es de gran necesidad. Por esta razón, el estudio del comportamiento de la recuperación de cobre en relación con la optimización de la malla de riego propone una idea de como poder trabajar niveles de leyes bajos para obtener la máxima recuperación posible.

Los principales parámetros que afectan la recuperación son la distribución de la malla de riego, la diferencia de presión y caudal entre los emisores, a eso se le suma los factores de evaporación de la solución lixiviante y los problemas de permeabilidad de la pila, dando como resultado un problema con una gran variedad de parámetros a controlar. Este trabajo optimizará el diseño de la malla de riego y la diferencia de presión y caudal entre los emisores para lograr un riego homogéneo que permita maximizar las recuperaciones.

1.3 Hipótesis

La optimización de la malla de riego en una pila de lixiviación tiene directa relación con la geometría de distribución de emisores y el radio de circunferencia de riego, por lo tanto, influye en la recuperación del metal de interés en términos de homogeneidad de riego.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales:

- Optimizar la configuración del sistema de riego en una pila de lixiviación.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Simular el proceso de lixiviación con diferentes configuraciones de malla de riego.
- Estudiar como es el tamaño de área regada en función a la cantidad de emisores.
- Analizar la variación del coeficiente de uniformidad en función de la diferencia de presión en aspersores.
- Definir una malla óptima en función de análisis económico.

1.5 Alcances

En el siguiente trabajo de título se estudiará la optimización de la malla de riego de pilas de lixiviación, considerando que se utilizará como material a lixiviar óxido de cobre, el cual será una constante, además, se supondrá una distribución homogénea del cobre en el material aglomerado y dispuesto en la pila.

Por otra parte, es importante mencionar que el estudio se concentrará en la optimización de la malla de riego, por lo tanto, se determinará una tasa de riego constante y se variará la disposición geométrica de los emisores a lo largo de toda la malla de riego. Juntamente con lo anterior, el tipo de pila a utilizar será la denominada pila estática, de la cual se fijarán las dimensiones que se utilizarán a lo largo de todas las simulaciones.

Para determinar un valor de homogeneidad, se utilizará un parámetro denominado "coeficiente de uniformidad", el cual será descrito más adelante. Dicho parámetro permitirá comparar las distintas homogeneidades y su relación con la geometría de disposición de emisores.

Con la finalidad de definir que sistema de riego es el óptimo, se realizará un análisis económico, donde se calculará una recuperación esperada a partir de la cantidad de caudal entregado a la pila de lixiviación completa, junto con considerar los costos de inversión en aspersores y el costo de consumo energético del sistema de impulsión.

2 Capítulo II: Marco teórico

2.1 Antecedentes generales

Como se ha mencionado anteriormente, a medida que transcurre el tiempo y se explotan yacimientos, las leyes bajan más y más, por lo que, es de gran necesidad optimizar el procesamiento de minerales. Un avance de esto se pudo observar entre los años 1990 y 1998 donde se pasó de procesar 708.000 toneladas a procesar 2.013.000 toneladas, lo que muestra un aumento de 46,7% de producción a nivel mundial. Dicho aumento es contabilizando solo el mineral procesado por hidrometalurgia. Lo anterior, presenta un gran argumento para realizar un estudio sobre la importancia de la geometría de emisores en la malla de riego (Beckel, 2000).

Es de gran necesidad seleccionar un buen diseño de malla de riego para alcanzar un riego uniforme y completo del mineral por medio de la percolación de la solución lixiviante entre los glómeros del mineral (Quispe, 2018).

Uno de los parámetros importantes dentro de la lixiviación corresponde a la permeabilidad de la pila, donde el pretratamiento denominado aglomeración y curado, toma gran importancia. Lo anterior, debido a que la mayor parte de los cambios globales de permeabilidad en la pila se producen por la migración de partículas que quedan dispuestas en planos que son comparativamente impermeables (López, 2012).

Para asegurar que se tiene una malla de riego óptima es necesario que todos los emisores controlados por una misma válvula proporcionen un caudal con la menor cantidad de diferencias posibles (Retamal, 2008).

2.2 Etapas generales del proceso hidrometalúrgico

Para lograr realizar el proceso de lixiviación, antes es necesario modificar la granulometría del mineral y así lograr la exposición de este para que entre en contacto con la solución lixiviante. Para lo anterior, el mineral a tratar debe pasar por los siguientes procesos que a continuación se describirán de forma general.

2.2.1 Chancado y conminución

El objetivo principal del proceso de chancado y conminución es preparar el mineral para sus siguientes etapas de procesamiento, para esto se reduce el tamaño de partículas del mineral. Existen diversas etapas de reducción de tamaño, sin embargo, la primera “conminución” se presenta en la perforación y tronadura, donde mediante el uso de explosivos el mineral es desprendido del macizo rocoso y presenta diversas granulometrías, posterior a esto el mineral es pasado por subdivisiones de chancados, es decir primaria, secundaria y terciaria.

Para el tratamiento de óxidos de cobre la conminución solo ocupa chancadores y harneros para clasificar el tamaño obtenido. De lo anterior, se obtienen tamaños que van desde los 100 cm a los 10 mm o menores (Rodríguez, 2015).

Los minerales están compuestos por estructuras cristalinas que se encuentran unidas por enlaces interatómicos, los cuales tienen una eficacia a corta distancia, por lo que, al aplicar la suficiente fuerza estos se rompen y permiten la ruptura del mineral. Para lograr esta separación de cristales existen 3 principales formas, las cuales son la fractura por abrasión, la fractura por impacto y el mecanismo de compresión. La fractura por abrasión consiste en la aplicación de fuerza en la superficie de forma focalizada, sin embargo, dicha fuerza no es la suficiente para permitir la ruptura de la partícula completa, por lo que se obtienen partículas finas y otra de un tamaño similar al original. La fractura por impacto consiste en la aplicación de fuerza excesivamente mayor a la necesitada para generar la fractura de la partícula y a una gran velocidad, por lo tanto, el mineral queda sobrecargado en ciertas zonas, generando partículas de diversos tamaños. Por último, el mecanismo de compresión consiste en la aplicación de fuerza con una velocidad relativamente baja, lo suficiente para generar la fractura del mineral. El resultado de esto es la generación de partículas de tamaños similares (Rodríguez, 2015).

2.2.2 Aglomeración y curado

Desde el proceso de chancado y conminución el mineral viene con diferentes granulometrías, por lo que, es necesario unificar las dimensiones. Este proceso consiste en unión de las partículas finas a las gruesas, haciendo un pre-tratamiento del mineral con ácido sulfúrico (H_2SO_4) o agua, esto dependerá netamente de la cantidad de finos presentes en el mineral. Este proceso es indispensable para la recuperación de cobre, debido a que desde la conminución se genera gran cantidad de polvos que contiene porcentaje mineral valioso. Lo anterior, es posible debido a que al humectar el mineral con la cantidad suficiente de líquido se alcanza la tensión superficial para que al momento de la colisión de las partículas entre sí, los finos se adhieran a las porciones gruesas del mineral (Miranda, 2012).

Las partículas se entrelazan mientras que el ácido sulfúrico reacciona con la superficie de estas, como muestra la Figura 1.

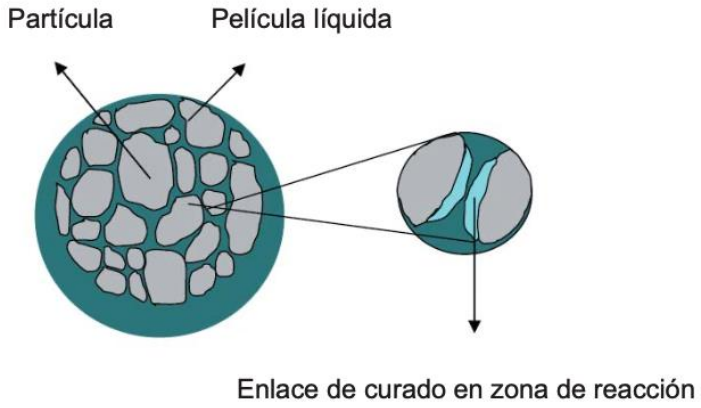


Figura 1. Esquema explicativo del mecanismo mediante el cual se produce la alglomeración y curado del mineral (Miranda, 2012).

Este proceso propicia un aumento en la rapidez de extracción de cobre, debido a que el ácido concentrado deja en la superficie de la partícula una película de sulfato de cobre ($CuSO_4$), lo que permite disolver gran parte del cobre.

Para poder efectuar este pretratamiento es necesario que el mineral cumpla con las siguientes condiciones:

- Ser apropiado química y físicamente
- Debe poseer la misma resistencia mecánica
- Debe poseer la misma densidad
- Debe poseer el mismo grado de porosidad

A continuación, se nombrarán los beneficios que se obtienen al realizar el proceso de aglomerado y curado al mineral a lixiviar:

- Propicia un transporte y almacenamiento de poco trabajo
- Se alcanza una mayor permeabilidad en la pila de lixiviación
- Permite una distribución homogénea de la solución lixiviante en la pila
- Proporciona mayor estabilidad de la pila
- Aumenta la cinética de extracción del mineral de valor.

2.2.3 Lixiviación

Este proceso corresponde a la operación unitaria fundamental de la hidrometalurgia y su objetivo principal es la disolución de forma parcial o total de un sólido, haciendo uso de soluciones acuosas para lograr recuperar los minerales de valor presentes en la roca (Schulz, 2003). Dichas soluciones acuosas son 3 y corresponden al refino, PLS e ILS, donde la primera corresponde a la solución que retorna de la planta de extracción por solvente, con la finalidad de reutilizar agua y ácido y así aprovechar al

máximo su capacidad de uso. El PLS corresponde a la solución final de la lixiviación y posee un porcentaje mayor de cobre y finalmente, el ILS corresponde a una solución intermedia que se obtiene al utilizar refino para regar las pilas con mineral recién aglomerado, sin embargo, no posee la concentración de cobre necesaria para ser mandada a planta de SX (Morales, 2016).

Existen 6 principales formas de llevar a cabo la lixiviación las cuales son:

- Lixiviación *in situ*
- Lixiviación en botadero
- Lixiviación en bateas
- Lixiviación por agitación
- Lixiviación a presión
- Lixiviación en pila

Es importante mencionar que la lixiviación en pila será la que se estudiará en esta memoria de trabajo y corresponde a la extracción de mineral que se encuentra apilado en forma rectangular, dicha forma rectangular se le denomina pila o lecho. Este lecho posee pendientes que permiten la recuperación de cobre. Primeramente, se aglomera el material a lixiviar y luego se deposita en una superficie previamente impermeabilizada y aplanada, para luego mediante un sistema de riego aplicar la solución lixiviante que reaccionará con el material. Por lo general, se utilizan aspersores o goteros para la realización del riego.

2.2.4 Extracción por solvente

La extracción por solvente es un método que busca la separación de una o más sustancias presentes en una mezcla haciendo uso de solventes. Para la extracción del cobre generalmente se utiliza una resina orgánica la cual está diluida en un solvente orgánico denominado parafina. Dicha solución se mezcla con el PLS que proviene desde la lixiviación. La función que cumple la resina es capturar el cobre disuelto en la solución de forma selectiva, dejando a un lado las impurezas como el hierro, aluminio, manganeso y otros metales que puedan estar presentes en la solución. Luego, la solución orgánica cargada es separada y dispuesta en otro estanque, donde se pone en contacto con un electrolito que posee alta acidez, lo que permite que el cobre se suelte del orgánico cargado y se transfiera a la solución electrolítica, obteniendo así la solución final del proceso.

2.2.5 Electro-obtención

Este proceso consiste en la recuperación del metal a partir de una solución (electrolito) proveniente del proceso extracción por solvente, luego por medio del proceso denominado electrólisis, el cobre presente en el electrolito se deposita en un cátodo. Para lograr lo anterior, en un estanque se disponen dos placas llamadas cátodo (carga negativa) y ánodo (carga positiva), sumergidas en el electrolito y conectadas mediante

un cable, por el cual se hace pasar corriente continua de baja intensidad. Los iones del metal de interés (cationes), son atraídos hacia el cátodo, depositándose sobre éste, por otra parte, las impurezas quedan disueltas en el electrolito o de otra forma precipitan en forma de barro anódicos (CODELCO, 2019a). Para la industria minera este proceso es de gran importancia, ya que, permite la obtención de diversos metales tales como el oro, la plata y el cobre.

Para lograr el proceso anteriormente mencionado, es de gran importancia contar con una configuración de circuito óptimo, para lo cual se utilizan rectificadores de corriente que permiten mantener constante las características del flujo eléctrico.

Existen 5 tipos de celdas de electroobtención en el presente que permiten trabajar en diferentes condiciones, las cuales son:

- Celdas para procesamiento de sales fundidas
- Celdas para lecho particulado fluidizado (Figura 2)
- Celda para producción directa de láminas de metal
- Celda cilíndrica para electroobtención de oro
- Celda convencional para electrólisis en medio acuoso

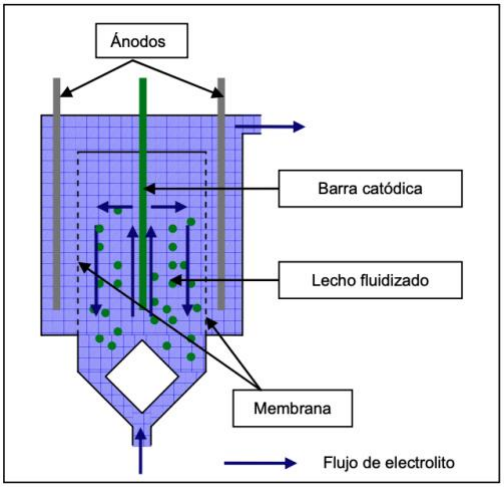


Figura 2. Esquema representativo de celda para lecho fluidizado (Hernández, 2006).

2.3 Lixiviación

La lixiviación de minerales con presencia de cobre se basa en la disolución del mineral de forma selectiva con la finalidad de obtener una solución acuosa que contiene una gran cantidad de metal valioso y residuos insolubles que en su mayoría tienen poco interés económico. Para llevar a cabo este proceso ocurren diversas reacciones que pueden ser del tipo físico, químico, electroquímico y electrolítico, donde la velocidad de reacción dependerá netamente del mineral a procesar y de sus características (Miranda, 2012).

En el proceso de lixiviación existen diversas reacciones químicas, las cuales dependerán del tipo de mineral a procesar. A continuación, se muestran algunas de las reacciones químicas que se pueden conseguir en el proceso:

- Disolución de sales: Este tipo especial de proceso se aplica en su mayoría a sales minerales que se disuelven con facilidad utilizando agua. Generalmente, es difícil encontrar minerales con estas características, sin embargo, es posible someterlos a procesos previos para que se transformen de minerales a sales solubles en agua, un gran ejemplo de esto son los productos provenientes de la tostación.

  Ejemplo:
  $$CuSO_{4_{(s)}} + nH_2O_{(aq)} \rightarrow CuSO_4 \cdot nH_2O_{(aq)}$$

- Disolución ácida: Se aplica a la mayoría de los óxidos de cobre presentes en la naturaleza y se utiliza principalmente ácido sulfúrico debido a su bajo costo y disponibilidad (Schulz, 2003).

- Disolución Alcalina: Se utiliza para menas que consuman ácido sulfúrico, como por ejemplo a menas que contengan carbonatos de calcio (Schulz, 2003).

- Disolución con formación de iones complejos: La formación de estos iones permite el aumento de la solubilidad de sales poco solubles. En la industria se aplica a concentrados de cobre sulfurados (Schulz, 2003).

- Lixiviación con oxidación: En este tipo de proceso se aplican agentes oxidantes tales como el Fe^{3+} y el O_2, generalmente se aplica para la lixiviación de sulfuros y otros metales (Schulz, 2003).

- Lixiviación con reducción: Esta clase de lixiviación se puede emplear en minerales que son más solubles en sus estados de valencia menores (Schulz, 2003).

Como anteriormente se mencionó, la rapidez de cinética de reacción depende mayoritariamente al tipo de mineral a tratar. En Tabla 1 se comparan diferentes tipos de minerales y sus cinéticas de reacción tomando en consideración el tiempo que toma su disolución.

Tabla 1. Cinética de reacción de minerales de cobre en presencia de solución acuosa en relación con el tiempo de exposición (Domic, 2001).

Cinética relativa	Tiempo de referencia	Minerales de cobre
Muy rápida (a Tº ambiente)	Segundos a minutos disolución completa	Carbonatos (malaquita, azurita) Sulfatos (Calcantita,Bronchantita y Antlerita) Cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas disolución completa	Óxidos cúpricos (tenorita) Silicatos (crisocola y dioptasa)
Moderada (requieren oxidante)	Días a semanas disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita y copper wad y copper pitch)
Lenta (requiere oxidante)	Semanas a meses disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
Muy lenta (requiere oxidante)	Años disolución incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita)

La velocidad de reacción que anteriormente se nombró entre una solución acuosa y un mineral, involucra diversas etapas que a continuación se mostrarán:

- El reactivo lixiviante difunde a través de la capa limite hasta llegar a la superficie de la partícula
- El reactivo difunde al interior de la partícula en dirección de la zona de reacción.
- Ocurre la reacción química entre el reactivo y la partícula, con lo cual se generan productos de la reacción.
- Los productos que se generaron difunden en el interior de la partícula hacia la superficie de esta.
- Los productos difunden por medio de la capa limita hacia la solución.

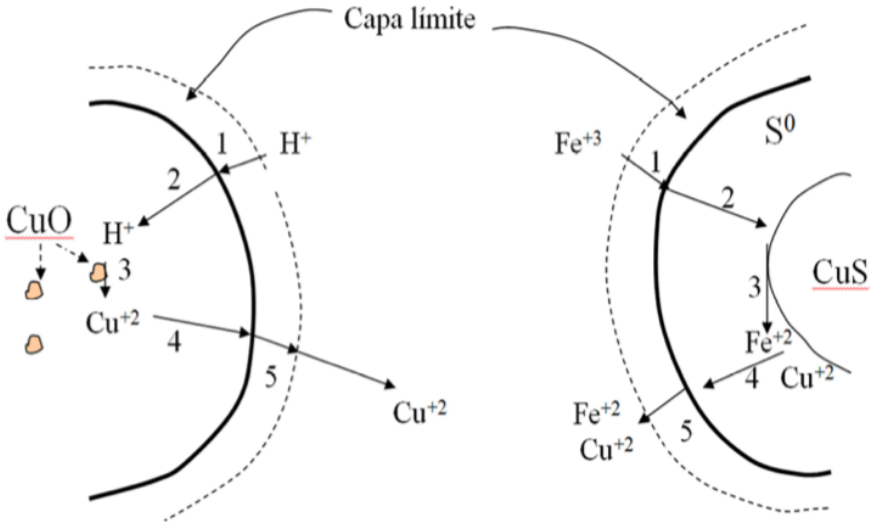


Figura 3. Esquema donde se muestran las 5 etapas del proceso de lixiviación de la solución en la partícula (Guiachetti, 2011).

Además, es importante mencionar que la cinética de reacción que se genera en los óxidos de cobre depende también de la actividad que tengan los iones de hidrógenos en el sistema acuoso, del área de la superficie donde se este efectuando la reacción, de la geometría de la partícula, tamaño de la partícula, entre otras.

Dicho lo anterior, los procesos de lixiviación se escogen dependiendo del tipo de mineral a procesar, la concentración y la ley a tratar, junto con las características fisicoquímicas que presente el mineral. No obstante, el parámetro que es realmente relevante e importantes es la forma en que el mineral se pone en contacto con la solución acuosa lixiviante. Por lo anterior existen diversas formas de lixiviación, las cuales se procederán a explicar a continuación.

2.3.1 Lixiviación en Botaderos

Este proceso de lixiviación consiste principalmente en lixiviar desmontes o sobrecarga de minas a rajo abierto, las cuales presentan leyes considerablemente bajas (menores a 0,4%), no pudiendo ser procesadas por otro tipo de métodos convencionales. Es importante mencionar que la construcción de este tipo de botaderos conlleva años de depositación de mineral a tasas de cientos de miles de toneladas al día. La importancia de este tipo de lixiviación recae en que no es necesario una inversión en mina ni tampoco costos relacionados con el transporte.

En términos de recuperación, es común encontrar recuperaciones entre 40 a 60% en un periodo de 3 años. En modo de ejemplificación, la Figura 4 muestra un esquema típico de este tipo de lixiviación. Es importante mencionar que la recolección del PLS

se hace por medio de la gravedad y las pendientes que presente el botadero en su parte basal.

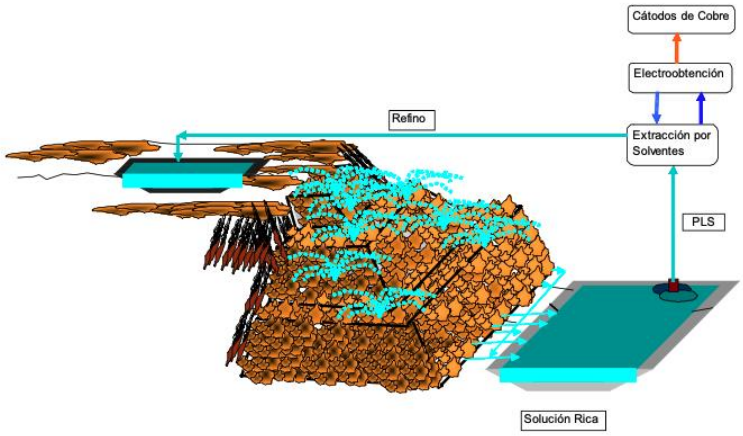


Figura 4. Esquema representativo de lixiviación en botadero (Schulz, 2003).

Como se puede apreciar en el esquema, las soluciones involucradas en el proceso son el refino y el PLS, donde el PLS corresponde a la solución final del proceso y el refino es la solución que proviene de la recirculación de solución desde el proceso de extracción por solvente.

2.3.2 Lixiviación *In situ*

Corresponde a la lixiviación de residuos que fueron fragmentados en minas abandonadas (*In Place Leaching*) o a la lixiviación de yacimientos que no permiten otro tipo de lixiviación convencional por motivos de índole económica o técnicos, por lo que, se realiza el riego el yacimiento en el mismo lugar para evitar costos relacionados con la extracción y transporte. Es por lo anterior, que este tipo de lixiviación se caracteriza por inversiones bajas y costos de operación reducidos. Sin embargo, antes de tomar la decisión de realizar este proceso, primero es necesario realizar un estudio geológico, hidrológicos y metalúrgicos, a fin de determinar la cantidad de reserva y leyes presentes en el yacimiento. Este proceso se llevará a cabo siempre y cuando las reservas sean superiores a los 100 millones de toneladas con una ley de 0,5%, con lo cual se obtiene una producción de aproximadamente 20.000 ton de cátodo al año, lo que significa una recuperación de un 50% en 12 años (Schulz, 2003). Es importante mencionar que la cinética de lixiviación es variable en este tipo de proceso y que puede ir desde varios meses a años (Miranda, 2012). La Figura 5 muestra un esquema representativo de como se presenta este tipo de lixiviación.

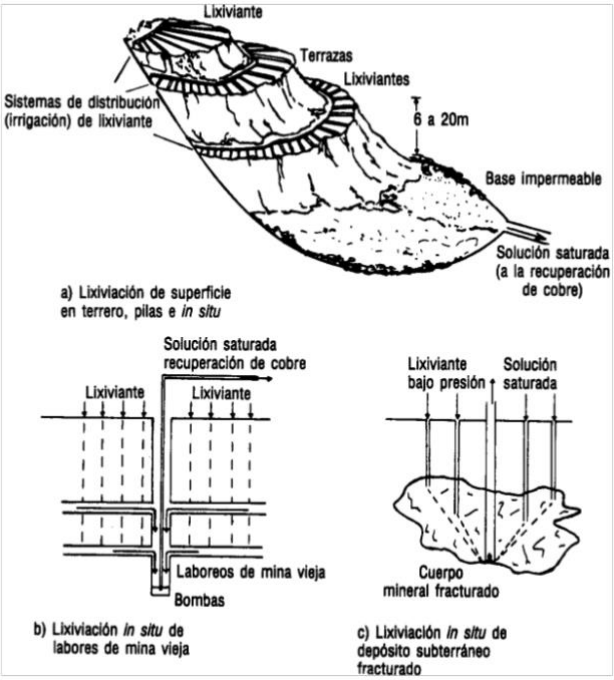


Figura 5. Esquema representativo del método de lixiviación In Situ (Schulz, 2001).

2.3.3 Lixiviación en Batea

La lixiviación en batea tiene como medio de trabajo "bateas" donde el mineral entra en contacto con la solución lixiviante, inundando el recipiente, el cual posee un fondo con una membrana filtrante. Este método principalmente sirve para minerales con alta ley y poco porcentaje de finos, junto con poseer una baja compactación. Esta lixiviación tiene un ciclo de días (Miranda, 2012).

2.3.4 Lixiviación en Pila

Este método de lixiviación se aplica principalmente en minerales con presencia de óxidos de cobre e incluso a minerales mixtos de cobre que posean baja ley y consiste en la extracción del metal valioso por medio de la percolación de solución lixiviante que se genera en la pila o lecho de lixiviación, donde se utiliza ácido sulfúrico, ILS (ver Sección 2.5.1) y/o refino. La solución final que se obtiene desde este método de lixiviación corresponde al PLS que además de poseer el metal de interés o de valor, posee metales que no tienen importancia económica para el negocio y que en los procesos siguientes son removidos. Para poder realizar este tipo de lixiviación es necesario disponer de mineral correctamente conminuido y posteriormente post-procesado por una aglomeración y curado, para finalmente disponerlo en una superficie impermeable en forma de "torta" con dimensiones que favorezcan el aumento de la recuperación final de cobre en el PLS.

A partir de los ochenta se ha incorporado al método de lixiviación el proceso previo de aglomeración y curado que permite aumentar la recuperación, debido a las repercusiones químicas en la superficie de las partículas, además se generan las siguientes ganancias:

- Uniformidad en el tamaño de las partículas, donde se unen las partículas más finas con las más gruesas, generando un aglomerado de tamaño óptimo, lo que evita el comportamiento irregular que genera tener una pila con un rango muy amplio de distribución granulométrica.
- Genera un aumento y homogeneidad en la porosidad de la pila.
- Optimiza la permeabilidad de la pila, lo que repercute en la correcta percolación de la solución lixiviante, evitando generar planos impermeables que dificulten la correcta recolección de PLS.
- Facilita el proceso mismo de lixiviación, disminuyendo los costos y tiempos de la operación.

El proceso de aglomeración y curado se lleva a cabo agregando al mineral conminuido agua o ácido, dependiendo del mineral, en un estanque rotatorio, donde la humectación de las partículas y el choque entre ellas permiten la adherencia de los finos a los gruesos, generando una partícula con un tamaño más homogéneo.

Los factores que tienen una gran repercusión en la calidad del proceso de aglomeración son los siguientes (Schulz, 2003):

- Distribución granulométrica que presenta el mineral a tratar.
- Composición química del sólido.
- Cantidad de arcillas y sales solubles.
- Porosidad de los sólidos.
- Tensión superficial y viscosidad del humectante.
- Reactividad del humectante con relación al contacto con el sólido.
- Cantidad de humectante adicionado en el estanque.
- Forma en que se realizó el mezclado del mineral con la solución humectante.
- Tiempo de residencia del mineral en el estanque de aglomeración y curado.

Como se mencionó anteriormente, el pre-tratar el mineral con este tipo de curado utilizando solución lixiviante tiene grandes repercusiones químicas en la superficie de la partícula, lo cual permite el inicio del ataque químico en la mena a tratar, por lo que, los objetivos de realizar este proceso de aglomeración y curado en términos de reacciones químicas utilizando humectantes ricos en ácido sulfúrico son:

- Lograr acondicionar la mena para generar mejores aptitudes de disolución
- Conseguir aprovechar las condiciones químicas que propician la solución lixiviante con una mayor concentración.

- Aumentar la cinética de lixiviación de los minerales.
- Flexibilizar la concentración y la calidad de las soluciones presentes en el proceso de lixiviación.
- Mejorar la calidad de los aglomerados que se generan en el estanque.
- Permitir sulfatar la mena de cobre, generando el afloramiento por capilaridad inversa.
- Favorecer el fracturamiento por acción química de la roca matriz generando más superficies de ataque y penetración.
- Aumentar la temperatura en el aglomerado, debido a las reacciones químicas exotérmicas y calor desprendido por dilución del ácido concentrado.
- Exhibir en la solución lixiviante un mayor potencial oxidante.

Para lo anterior, se utilizan concentraciones de ácido de solución humectante entre 200 a 1000 gpl con dosificaciones en el rango 30 a 80 kg de ácido por tonelada métrica de mineral (Schulz, 2003).

En la actualidad existe diversas formas y equipos de poder generar el proceso de aglomeración y curado, donde los más utilizados son:

- Tambor rotatorio
- Disco peletizador
- Correa transportadora
- Aglomerado manual

Sin embargo, le equipo que más eficiente hace el proceso es el tambor rotatorio con una inclinación óptima en el sentido del flujo de los sólidos. El proceso utilizando este equipo comienza cargando el mineral por la parte más alta del tambor de forma continua, luego el agua y ácido sulfúrico son agregados por chorros o duchas, lo cual se efectúa en la parte más alta del tambor, es decir, en la parte posterior. En la parte interna del tambor en forma longitudinal existen guías de fierro que permiten que el mineral no resbale mientras el tambor gira, permitiendo que el mineral se eleve a una altura y luego caiga chocando en la parte baja del tambor con otras partículas de mineral, generando así aglomerados de mayor tamaño. Para que este proceso entregue un producto de calidad es necesario controlar la humedad e inclinación del tambor, por lo que, se habla un porcentaje de humedad entre los 7 a 10% permite un aglomerado excelente con un tiempo de residencia entre 1 a 3 minutos. En caso de que el proceso de aglomeramiento y curado no sea eficiente es posible que se generen las siguientes problemáticas:

- Producción de caminos preferenciales del flujo por medio de la pila, lo que se traduce en que es posible que la solución lixiviante no toque a la mena en la totalidad de su recorrido.

- Existencia de zonas donde el humectante no reaccione con el mineral, por lo que la solución no se aprovecha y se pierde.
- Propagación de compactaciones en la pila de lixiviación, donde se generen planos impermeables, lo cuales impiden el avance correcto del fluido a través del lecho.

Por otra parte, en la lixiviación en pila existen diversas formas de realizar el proceso, y la determinación de realizar una o la otra, viene dada por estudios económicos y disponibilidad de terreno. De lo anterior, se pueden encontrar los siguientes tipos de pilas (Retamal, 2008):

- Pila estática: corresponde al proceso donde el mineral a tratar es sometido a todas las etapas del ciclo de tratamiento, es decir, curado, lixiviación, reposo y lavado, de forma simultánea. Por lo que, para este proceso es común tener velocidades de producción variables, por lo cual, es necesario combinar distintos ciclos de lixiviación para mantener a la planta de SX con los valores de caudal de PLS requeridos.

- Pila Dinámica: Este proceso se caracteriza por presentar materiales en distintas etapas del ciclo de tratamiento, lo cual, consiste en utilizar de forma continua el mismo pad o espacio destinado para el proceso, de donde el mineral que fue utilizado se retira y se dispone en el botadero, y se reemplaza con nuevo mineral. Un beneficio de este proceso es que se requiere poco espacio para lograr efectuarlo, sin embargo, es necesario que el mineral esté muy bien aglomerado, para que tenga una cohesión y compactación adecuada que entregue la resistencia suficiente para que permita el continuo movimiento de material.

Además de las configuraciones de pila anteriormente mencionada, es posible combinar con dos métodos de construcción que en la actualidad existen.

- Pila permanente: Consiste en la reutilización del piso de material tratado en primera instancia, por lo que, el “ripio” se mantiene en la misma posición generando una especie de base para el siguiente mineral que se tratará.

- Pila renovable: Este tipo de construcción de pila consiste en que, una vez utilizada y procesada la pila, esta es removida y llevada a un botadero y en su lugar se carga más mineral, donde se procederá a realizar el proceso completo otra vez.

2.4 Parámetros relevantes para la lixiviación

A continuación, se describirán los factores o parámetros más relevantes en el proceso de lixiviación, los cuales son necesarios definir realizando estudios en relación con el mineral a procesar.

2.4.1 Distribución granulometría

La distribución granulométrica del mineral a procesar marca un hito importante en la lixiviación. Esto se debe a que es necesario encontrar un tamaño óptimo de partícula que permita tanto la mayor recuperación posible, como también disminuir la cantidad de ácido utilizado y que facilite la propagación de la solución lixiviante por el lecho. Es por lo anterior, que se puede decir que, a menores tamaños de mineral, mayor será la recuperación del metal valioso, debido a la exposición que este podría llegar a tener, además de generar mayores superficies de acción por donde la solución lixiviante pueda reaccionar. Sin embargo, a pesar de que una granulometría menor aumenta la recuperación, también aumenta la probabilidad de disminuir la permeabilidad de la pila, generando planos impermeabilizados por donde se acumule la solución lixiviante. Para poder solucionar lo anterior y definir un tamaño adecuado de partícula se efectúa el pre-tratado del mineral mediante el proceso de aglomeración y curado.

2.4.2 Permeabilidad

La permeabilidad de la pila de lixiviación es un factor fundamental que tiene relación con la capacidad de permitir que un fluido pase a través de ella por “caminos” determinados por la distancia entre las partículas. Este factor queda determinado por la granulometría que se obtiene desde la conminución y aglomeración donde el principal problema recae en la existencia de partículas muy finas que promuevan la migración de estas, generando así planos donde exista compactación y disminución de permeabilidad, dificultando el paso de la solución con cobre, repercutiendo en menores recuperaciones y pérdidas de solución lixiviante (López, 2012).

2.4.3 Altura de pila

Este parámetro esta directamente relacionado con la permeabilidad que presenta el aglomerado y con la velocidad en que se genera la disolución del metal valioso. Debido a lo anterior, es recomendado encontrar un punto óptimo de altura de pila, ya que, a alturas de pila muy grandes, se propicia un aumento en la recuperación de cobre, debido a que, la solución lixiviante tendría mayor tiempo de residencia en la pila, por lo que, tendría mas contacto con partículas recolectando así mayor cantidad de cobre. No obstante, a mayores tiempos de residencia de solución lixiviante en la pila, mayor será la posibilidad de generar canalizaciones y planos impermeables que mermen la recuperación de cobre. Junto con lo anterior, el aumentar el tiempo de residencia de solución lixiviante, también aumentan las condiciones que propician la

posibilidad de disolver ganga, dando como resultado un mayor consumo de ácido (Schulz, 2003).

2.4.4 Tasa de riego

Este parámetro tiene una fuerte influencia en la velocidad de reacción entre la solución lixiviante y el mineral. Para poder encontrar una tasa de riego óptima es necesario tomar en consideración que se debe suministrar la cantidad necesaria de solución lixiviante tanto como para obtener concentraciones de cobre, como de impurezas, valores pre-establecidos para concentraciones de PLS final, junto con la determinación económica que la faena minera proponga en su estudio de factibilidad. Junto con lo anterior, es necesario considerar factores como canalizaciones, derrumbes de pila y apozamientos, factores que tienen una repercusión negativa para la recuperación de cobre (Guiachetti, 2011).

2.4.5 Tiempo de lixiviación

En lixiviación la ganancia viene dada por la cantidad de cobre recuperado desde el lecho de lixiviación, por lo que, el tiempo necesario para una disolución correcta toma un rol fundamental. Debido a esto, la cinética o velocidad de reacción determinará en gran parte el tiempo de lixiviación óptimo con la finalidad de crear una operación que sea rentable económicamente. Por otro lado, es importante mencionar que un tiempo de lixiviación corto no representa un objetivo económico, pero si representa un objetivo económico una mayor recuperación de cobre y un bajo gasto en consumo de solución lixiviante.

2.4.6 Concentración de ácido en solución lixiviante

Este parámetro en lixiviación es uno de los cuales hay que tener en constante monitoreo, además de haber realizado un estudio previo a la implementación del proceso, debido a que existen dos extremos que deben ser analizados. Por un lado, a mayor concentración de ácido es posible recuperar más cobre, lo cual trae consigo un consumo elevado de ácido neto, ya que, la ganga presente en el mineral comienza a reaccionar y consume parte del ácido, y por otra parte, si se trabaja con valores inferiores a lo necesario, la recuperación de cobre mermaría (Guiachetti, 2011).

2.5 Soluciones acuosas presentes en el proceso de lixiviación

A continuación, se presentarán las soluciones lixiviantes que están involucradas en el sistema de riego de una pila de lixiviación.

2.5.1 Intermediate Liquid Solution *(ILS)*

La solución lixiviante ILS es generada por el proceso de lixiviación parcial del cobre presente en el mineral a tratar en la pila de lixiviación y corresponde a una solución intermedia entre PLS y refino, la cual se genera por el enriquecimiento del refino la solución va por efectos de gravedad hacia la piscina de ILS, para luego ser ocupada nuevamente, de donde se genera el PLS con mayor cantidad de cobre disuelto. Es importante mencionar que esta solución tiene un pH aproximado de 1,2 (Morales, 2016).

2.5.2 Pregnant Leaching Solution *(PLS)*

Esta solución es la solución final del proceso de lixiviación, la cual es rica en cobre disuelto. Esta solución se envía hacia una piscina de PLS por medio de transporte por gravedad, para luego ser enviada al proceso de extracción por solvente SX (Morales, 2016).

2.5.3 Refino

La solución denominada refino proviene del proceso SX, de donde luego de ser procesado el PLS, se recupera el refino y se envía hacia una piscina de recolección (Morales, 2016).

2.6 Dimensionamiento de pila de lixiviación

En esta sección se describirá el proceso de dimensionamiento de la pila de lixiviación, donde es importante mencionar que, para efectos de este estudio, se implementará el dimensionamiento para una pila dinámica de un solo modulo operacional, con la finalidad de observar netamente el proceso de riego, ya que, es la base del estudio.

2.6.1 Criterios para el diseño y dimensionamiento de una pila de lixiviación

En el diseño y dimensionamiento geométrico de la pila de lixiviación dinámica, se utiliza una configuración rectangular en la base, es decir, con una relación de largo/ancho aproximadamente 2. Además, es importante destacar que este dimensionamiento se realizará considerando cumplir con el ciclo de lixiviación, espacios operacionales, ya sea, de carga y descarga de mineral, traslado de equipos en el proceso, junto con las tuberías necesarias para efectuar el proceso de lixiviación y franjas de seguridad (Aburto, 2016).

2.6.2 Cálculos para dimensionamiento geométrico de pila de lixiviación

Para el dimensionamiento de la pila de lixiviación, se trabajará con un área teórica que permita cumplir con ciclo de lixiviación, de lo cual se desprende la siguiente ecuación:

$$A_{cild} = \frac{T_m \times C_l}{\rho_{ma} \times H_n} \quad (1)$$

Donde:

A_{cild}: Área para ciclo de lixiviación en pila dinámica (m^2)
T_m: Tasa media de mineral a planta (t/d)
C_l: Ciclo de lixiviación (días)
ρ_{ma}: Densidad de mineral aglomerado (ton/m^3)
H_n: Altura de nivel de pila (m)

Una vez calculada el área para ciclo de lixiviación en pila dinámica, es necesario calcular el área basal de pila, para lo cual, se debe considerar la longitud de corona, ángulo de reposo de mineral aglomerado y altura de pila (Aburto, 2016).

$$L_{ba} = L_{ca} + 2 \times \frac{H_n}{\tan \alpha_{rma}} \quad (2)$$

Donde:

L_{ba}: Longitud basal de mineral apilado (m)
L_{ca}: Longitud de corona apilada (m)
H_n: Altura de nivel de pila (m)
$\tan \alpha_{rma}$: Ángulo de reposo de mineral aglomerado (º)

2.7 Sistema de riego localizado de alta frecuencia RLAF

En esta sección se describirá que son los riegos localizados de alta frecuencia y se definirán cuales son las características relevantes para considerar en el diseño de un sistema de riego no convencional. Es importante mencionar que el riego de una pila de lixiviación posee gran similitud con el riego agrícola, de donde se obtiene la mayor cantidad de información para lograr un riego uniforme, por lo que, la información en el presente trabajo se obtuvo del libro “Hidráulica de Tuberías” (Saldarriaga Valderrama, 2002).

2.7.1 Descripción

Internacionalmente los sistemas de riego se denominan como microirrigación, y consiste en la aplicación de fluidos a un suelo, no obstante, este riego permite la

aplicación de fluido en una zona restringida por el alcance del emisor. Por otra parte, como su nombre lo describe, en especifico los sistemas de riego de alta frecuencia se caracterizan por dos partes fundamentales que son la localización de los emisores de entrega fluidos y la frecuencia utilizada para realizar dicha entrega. Existen diferentes tipos de riegos que no se utilizan de forma localizada, sino que de forma general, como por ejemplo el riego de taludes mediante aspersores de alto caudal.

La localización toma en consideración que solo se humedece cierta cantidad de suelo correspondiente al área afectada por el emisor, por lo que, es de gran necesidad aplicar este riego a alta frecuencia, con la finalidad de conseguir humedecer la mayor cantidad de suelo.

Este sistema de riego se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Generalmente, este tipo de riego no moja la totalidad del suelo.
- Utilización de caudales y presiones relativamente bajos.
- Debido a que se reduce el volumen de suelo mojado por unidad de emisor, es necesario ocupar la frecuencia de riego necesaria para asegurar que el suelo pueda permanecer humectado lo suficiente para que el proceso se lleve a cabo.

Una vez conocidas las características generales del sistema de riego de alta frecuencia, es de gran importancia mencionar que en este trabajo de título se escogerán 1 de 3 tipos de emisores aplicadores de riego, el cual es el riego con aspersores y corresponde a microaspersión o miniarpersión, los cuales se clasifican según el caudal de trabajo que poseen, por lo que, los sistemas de riego convencionales como lo son la inundación o infiltración quedarán excluidos del estudio.

2.7.2 Riego con utilización de goteros

Este tipo de riego se caracteriza por utilizar emisores en forma de goteros o por metro lineal de manguera de gotero y se tiene la particular característica de que el caudal aplicado no debe superar los 16 l/h.

2.7.3 Riego con utilización de microaspersores

Este sistema de riego con microaspersores se caracteriza por la aplicación de caudales entre 16 a 150 l/h.

2.7.4 Riego con utilización de miniaspersores

Este riego se caracteriza por utilizar caudales entre 150 a 200 l/h. Por lo anterior se tiene la clasificación que se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de clasificación de tipos de riego según el caudal aplicado.

Bajo caudal =<16 (l/h)	Caudal medio 16 – 150 (l/h)	Alto caudal 150 – 200 (l/h)
Goteo	Microaspersión	Miniaspersión

2.7.5 Instalación de sistema de riego localizado de alta frecuencia (RLAF)

A continuación, se presentarán los componentes hidráulicos que permiten el correcto diseño de un sistema de riego de alta frecuencia.

2.7.5.1 Componentes

Estación de riego: Corresponde al conjunto de equipos y elementos que proporcionan lo necesario para la realización del bombeo de la solución a regar.

Tubería primaria: Se denomina tubería primaria a la tubería que sale directamente desde la estación de riego y llega a todos los módulos de riego.

Tubería secundaria: Corresponde a la tubería que parte de la tubería principal y que entrega el fluido a uno solo de los submódulos presentes en el pad de riego.

Laterales de riego: estas tuberías corresponden a las últimas de las tuberías presentes en el circuito de riego, donde se conectan los emisores que se encargan de entregar el fluido al pad de riego.

Regulador de caudal: Corresponde al monitoreo y control del caudal que entra en la tubería secundaria. Es importante mencionar que la superficie que controla este regulador se llama módulo de riego.

Regulador de presión: Por lo general este tipo de regulador se dispone en la partida de cada tubería secundaria con la finalidad de poder controlar la presión de entrada a las laterales de riego e inmediatamente después aguas abajo se dispone de un manómetro para medir la presión de entrada.

Unidad operacional de riego: Se denomina unidad operacional de riego al conjunto de módulos regados por la misma estación de riego.

Submódulo: Corresponde a la sección del pad que es regada por la misma tubería secundaria.

Módulo: Corresponde al conjunto de submódulos.

Ruta crítica: Esta ruta corresponde a la ruta desde la estación de riego hasta el módulo que genera la mayor pérdida de energía hidráulica, lo que significa que

presenta la mayor pérdida de energía considerando las pérdidas por fricción y singulares.

En la Figura 6 se presenta un esquema representativo de la instalación del sistema de riego de alta frecuencia. No obstante, la disposición de tuberías en el pad de lixiviación puede variar y no siempre ser de la misma forma.

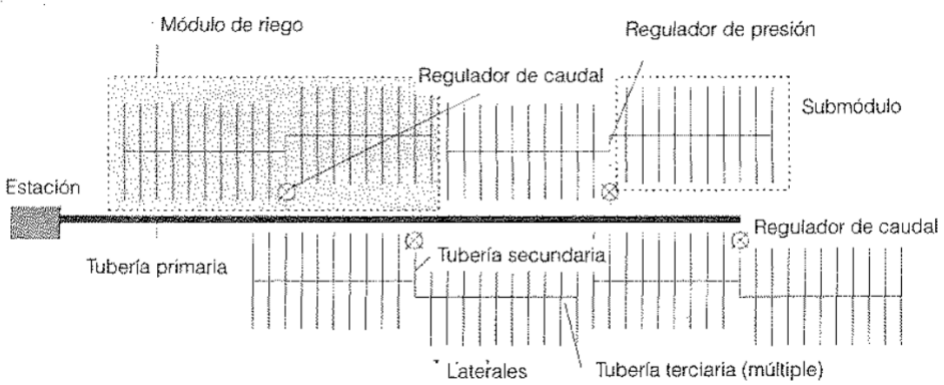


Figura 6. Esquema de instalación del sistema de riego de alta frecuencia, donde se presentan los nombres de los componentes principales.

2.8 Teoría hidráulica en tuberías

Antes de que el fluido pase por los emisores finales del circuito de riego, este pasa por una serie de tuberías y componentes que poseen diferentes características y diámetros, por lo que, el comportamiento que tenga el fluido en el emisor estará directamente relacionado con todo el recorrido configurado. De lo anterior se obtienen las siguientes conjeturas:

2.8.1 Caudal

Corresponde a la cantidad de solución (volumen) que pasa avanza en una unidad de tiempo determinado y en hidráulica el caudal se mide de la siguiente forma (Jara et al., 2000):

$$Q = V \times A \tag{3}$$

Donde:

Q: Caudal
V: Velocidad
A: Área transversal

Las unidades que generalmente se utilizan son las siguientes:

- l/seg

- l/h
- m^3/h
- l/min

2.8.2 Presión

Corresponde a una magnitud física que mide la fuerza ejercida por unidad de área. En términos hidráulicos, es la fuerza necesaria para transportar la solución por una tubería o dispositivo hidráulico que posee una sección transversal determinada.

$$P = F/A \tag{4}$$

Donde:

P: Presión
F: Fuerza
A: Área

La presión se mide en distintas unidades, sin embargo, en hidráulica de tuberías se ocupan generalmente las siguientes:

- Mcf
- Bar
- PSI
- KPa
- m.c.a

2.8.3 Relación caudal y presión

El caudal presente en la salida del emisor esta directamente relacionado con la presión hidráulica de entrada al mismo. Dicha relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$Q = K \times H^x \tag{5}$$

Donde:

Q: Caudal de emisor (l/h)
K: Constante o coeficiente de descarga único del emisor utilizado, equivalente al caudal proporcionado a 1 (mca) de presión.
H: Presión hidráulica a la entrada en el emisor (mca) o (KPa)
x: Exponente de descarga, caracterizado por el régimen del fluido en el emisor.

Es importante mencionar que el parámetro "x" toma valores entre 0 y 1, de donde para flujos laminares posee un valor de 1 y para flujo turbulento x < 1, y en especifico para x = 0, se obtendría que

$$Q = K \tag{6}$$

Para sistemas de riego de alta frecuencia es de gran importancia contar con un régimen turbulento al interior de las tuberías, debido a los siguientes problemas presentados por regímenes laminares:

- Según Darcy – Weisbach, en flujo laminar las pérdidas por fricción son función de la viscosidad del fluido, como se aprecia en la Ecuación 7:

$$h_f = f \times \frac{l}{d} \times \frac{V^2}{2g} \tag{7}$$

  Por otra parte, el factor de fricción es inversamente proporcional al número de Reynolds, como se describe en la Ecuación 8:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \longrightarrow \quad f = F_1(Re) = F_2(\mu) \tag{8}$$

$$h_f = F_3(\mu) \tag{9}$$

  Finalmente, como la viscosidad es función de la temperatura a la cual se encuentre el fluido, se tiene que el caudal de salida es función de la temperatura, de lo que se obtiene lo siguiente:

$$Q = F_4(T) \tag{10}$$

  En definitiva, debido a que los sistemas de riego localizado de alta frecuencia generalmente se encuentran expuestos al sol, las temperaturas que pueden alcanzar las tuberías son un factor por considerar en el transporte de fluidos, ya que, si se tiene un trasporte variable debido a las temperaturas, también se tendrán caudales variables, lo cual es lo que se desea eliminar.

- Como se observa en la Ecuación 5, para flujos laminares existe una mayor dependencia del caudal en función de la presión en el emisor de salida, por lo que, se generaría menor uniformidad en el riego en caso de existir variaciones en las presiones de los emisores.

- Para flujos laminares, se tienen un área de salida mayor, lo que a su vez genera menor posibilidad de taponamientos por impurezas en el fluido, sin embargo,

también se generan menores velocidades al interior de la tubería, por lo que, se podrían generar sedimentaciones de impurezas, de donde se ha comprobado empíricamente que el problema de sedimentación en los sistemas de riego de alta frecuencia es un factor importante para considerar. Es por lo anterior que se sugiere trabajar con velocidad no menores a 2 m/s en el sistema de tuberías.

Luego desde la Ecuación 5 que describe el comportamiento del caudal de salida en el emisor dependiendo de la presión a la cual se exponga, se tiene que para lograr crear un diseño hidráulico óptimo de sistema de riego es necesario considerar dicha curva (véase Figura 7).

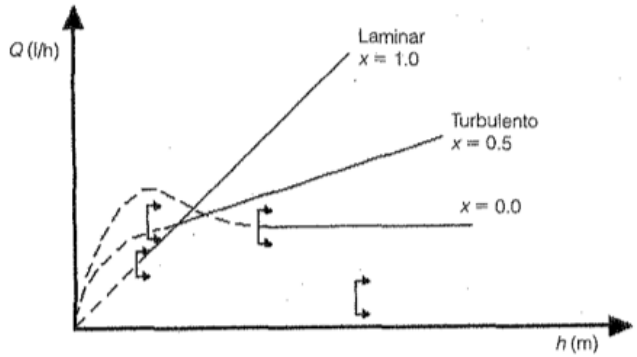


Figura 7. Curva de emisor donde en el Y se encuentra el caudal en (l/h) y el eje X la presión en (m).

Es importante mencionar que dicha curva debe ser suministrada por el fabricante de los emisores, sin embargo, existen ocasiones donde esa curva no es entregada y es necesario calcularla en forma empírica, por lo que, en este estudio se sugiere una forma de calcular, con la finalidad de obtener mejores resultados (Saldarriaga Valderrama, 2002).

Para lo anterior, es necesario contar con dos puntos de trabajo de caudal y presión los cuales se denominarán (h_1, Q_1) y (h_2, Q_2), de lo que se obtiene lo siguiente:

$$Q_1 = kh_1^x \tag{11}$$

$$Q_2 = kh_2^x \tag{12}$$

Luego realizando la división de estas ecuaciones, se obtiene:

$$\frac{Q_1}{Q_1} = \frac{kh_1^x}{kh_2^x} = \frac{h_1^x}{h_2^x} \tag{13}$$

De lo cual si se realiza el despeje de el parámetro x se obtiene:

$$x = \frac{ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)} \tag{14}$$

Por último, al realizar el despeje del parámetro K de la Ecuación 11, se obtiene:

$$k = \frac{Q_1}{h_1^x} \tag{15}$$

Finalmente, a partir de la Ecuación (14) y Ecuación (15), es posible encontrar la curva característica para el emisor medido, de donde el parámetro x corresponde a la sensibilidad del emisor respecto a la presión en el emisor.
Por otra parte, es común encontrar valores de x en diferentes tipos de emisores como los que se presentan en Tabla 3.

Tabla 3. Valores de parámetro x para distintitos tipos de emisores (Saldarriaga Valderrama, 2002)

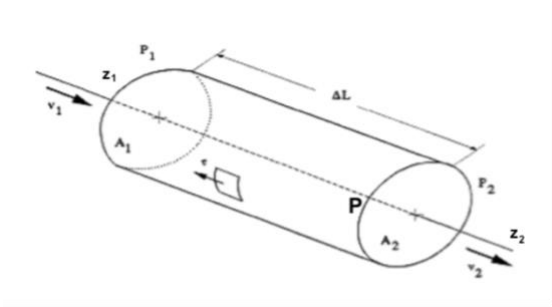
Emisor	x
Flujo laminar	1.00
Microtubos	0.75
Helicoidal	0.65
Régimen turbulento (orificio, laberinto)	0.50
Vórtice	0.40
Autocompensante	0.00 – 0.40
Teórico autocompensante	0.00

2.8.4 Hidráulica en tuberías

A lo largo de un circuito de riego de alta frecuencia, existen pérdidas de energía relacionadas con la utilización de distintos tipos de tuberías y elementos disipativos singulares.

2.8.4.1 Pérdidas de cargas friccionales

Para las pérdidas de energías existe una ecuación fundamental que está definida para una conducción en régimen permanente y uniforme. Dicha ecuación se logra deducir desde la ecuación de cantidad de movimiento en un tramo determinado de tubería en posición horizontal, como se puede apreciar a en la Figura 8.



Figuera 8. Elementos de conducción de fluido a través de una sección transversal uniforme (Retamal, 2008).

A partir de la Figura 8, se puede apreciar que P_1 y P_2 corresponde a la presión de entrada y salida respectivamente, A_1 y A_2 son las secciones transversales en cada extremo por donde el fluido pasa, z_1 y z_2 corresponden a las alturas topográficas en los puntos extremos, v_1 y v_2 corresponden a las velocidades en los puntos extremos de la sección estudiada, P corresponde al perímetro de sección de conducción, L se asocia a la longitud de la tubería o tramo a estudiar y finalmente τ es la tensión tangencial en las paredes interiores de la tubería producto del paso del fluido.

Por otra parte, si A_1 y A_2 son iguales y suponiendo una densidad del fluido constante, esto implicaría que las velocidades en ambos puntos a considerar son iguales ($v_1 = v_2$). Además, considerando condiciones utópicamente uniformes, el valor de la tensión tangencial seria constante a través de todo el trayecto recorrido, por lo que, al aplicar la ecuación de cantidad de movimiento se obtiene lo siguiente:

$$B_1 = B_2 + h_f \dot{\rightarrow} \left[\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right] = \left[\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right] + h_f \dot{\rightarrow} \left[\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}\right] + [z_1 - z_2] \qquad (16)$$

También es importante mencionar que las pérdidas de energía por unidad de longitud se definen también como pendiente hidráulica y es equivalente a:

$$J = \frac{h_f}{L} \qquad (17)$$

En términos de pérdidas de carga, este ha sido un factor sumamente complicado de trabajar y modelar a lo largo de los años, debido a su alta variación no lineal respecto al diámetro y el caudal, por lo que, Chezy (1965) concretó la siguiente ecuación donde se relacionan el caudal y las pérdidas de carga:

$$[p_1 - P_2] \times A + \gamma \times A \times [z_1 - z_2] = \tau \times P \times \triangle L \qquad (18)$$

Luego, para transporte de fluidos en una sección transversal circular con diámetro D, se tiene lo siguiente:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \tag{19}$$

$$P = \pi \times D \tag{20}$$

$$R_h = \frac{D}{4} \tag{21}$$

Sustituyendo los términos anteriores en la Ecuación 18 se tiene que:

$$h_f = \left[\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}\right] + [z_1 - z_2] = \frac{\tau}{\gamma} \times \frac{P}{A} \times L = \frac{4\tau}{\gamma} \times \frac{L}{D} \tag{22}$$

Además, si $\tau = \lambda \rho v^2$, reemplazando en la Ecuación 22 se tiene lo siguiente:

$$h_f = \frac{4\lambda}{g} \times \frac{L \times v^2}{D} = 8\lambda \left[\frac{L \times v^2}{D \times 2g}\right] \dot{\rightarrow} J = 8\lambda \times \frac{v^2}{2Dg} \tag{23}$$

Sin embargo, después del paso de los años esta ecuación no consiguió modelar de forma exacta las pérdidas de carga, debido a que la tensión tangencial no es proporcional a la v^2, junto con que el material de la tubería y el diámetro juegan un rol fundamental e influente sobre la tensión tangencial. Debido a lo anterior, Streeter y Wylie definieron las pérdidas de carga de la siguiente forma:

$$\emptyset(D, \varepsilon, \varepsilon', m, v, \tau, \rho, \nu) = 0 \tag{24}$$

Donde:

D: Diámetro de sección transversal.
ε: Rugosidad de las paredes, tamaño promedio de las irregularidades presentes en el material.
ε': Separación promedio de las irregularidades.
m: Factor de forma de irregularidades (adimensional)
v: Velocidad del fluido
τ: Tensión tangencial en las paredes
ν: Viscosidad cinemática del fluido al interior de la tubería.

Luego, al expresar la función en términos adimensionales se tiene que:

$$\varphi \times \left(\frac{v \times D}{\nu}, \frac{\rho \times v^2}{\tau}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\varepsilon'}{D}, m\right) = 0 \tag{25}$$

Es importante considerar que en términos prácticos los parámetros ε' y m poseen una dificultad elevada para ser estimados, por lo que, generalmente la ecuación anterior se trabaja de la siguiente forma:

$$\frac{\tau}{\rho \times v^2} = \varphi \times \left(\frac{v \times D}{v}, \frac{\varepsilon}{D}\right) = \varphi \times (R_e, \varepsilon_r) \tag{26}$$

Donde: Re corresponde al número de Reynolds y ε_r a la rugosidad relativa y ambos son adimensionales:

$$Re = \frac{v \times D}{v} \tag{27}$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D} \tag{28}$$

Con lo anterior, reemplazando en la Ecuación (23) se obtiene una expresión para la pendiente hidráulica en una tubería circular y de diámetro D. Dicha ecuación se asocia los autores Darcy- Weisbach.

$$J = \varphi' \times (R_e, \varepsilon_r) \times \frac{8}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} = f \times (R_e, \varepsilon_r) \times \frac{1}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} \tag{29}$$

Finalmente, al describir la ecuación anterior en términos de pérdidas de carga, se tiene lo siguiente:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g} = \left[\frac{8 \times f \times L}{\pi^2 \times g \times D^5} Q^2\right] \tag{30}$$

Es importante mencionar que el parámetro f encontrado en la ecuación anterior, corresponde al factor de fricción. A través de los años este factor de fricción a sido estudiado y se ha logrado llegar a distintas formas de calcularlo, con la complejidad de que algunas fórmulas son para régimen turbulento o y otras para régimen laminar, de lo cual se tienen las siguientes ecuaciones:

- Blasius (1911) propone la siguiente ecuación de f en tubería lisas, la cual es válida solo para número de Reynolds $Re = \left(\frac{3-10^3}{10^5}\right)$:

$$f = 0{,}3164 \times Re^{-0{,}25} \tag{31}$$

- Von Karman y Prandtl (1930) proponen la siguiente ecuación implícita para la obtención de f, la cual tiene una validés en Re mayores:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times Log_{10}\left[\frac{2{,}51}{R_e \times \sqrt{f}}\right] \tag{32}$$

- Nikuradse (1993) por medio de distintos ensayos propuso la siguiente ecuación, la cual tiene valides para tubos rugosos en régimen turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times Log_{10}\left[\frac{\varepsilon}{3{,}7 \times D}\right] \tag{33}$$

- Colebrook (1938) presentó una ecuación que se ajustaba en gran medida a los materiales comerciales que se utilizaban en ese momento, sin embargo, también posee valides solo para régimen turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times Log_{10}\left[\frac{\varepsilon}{3{,}7 \times D} + \frac{2{,}51}{R_e \times \sqrt{f}}\right] \tag{34}$$

- Moody (1944) publicó un estudio realizado donde en forma gráfica proporciona un Abaco, donde se gráfica el factor de fricción con relación al número de Reynolds. Dicho Abaco permite obtener el valor de factor de fricción desde los valores de rugosidad relativa y número de Reynolds (ver Figura 9).

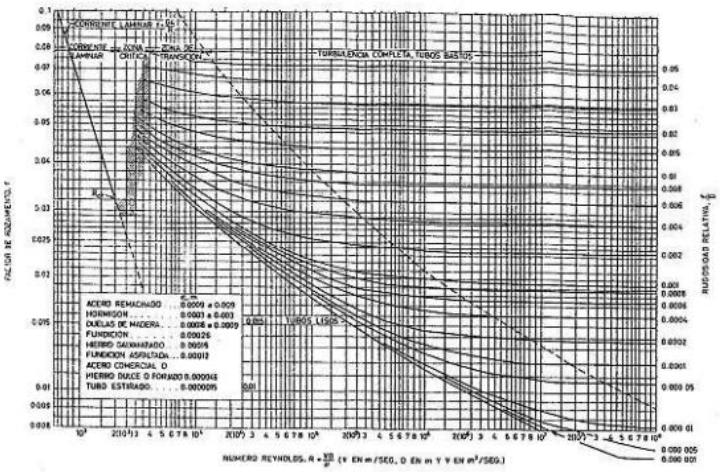


Figura 9. Abaco de Moody donde se relaciona el factor fricción con el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

2.8.4.2 Pérdidas de carga singulares

Finalmente, para lograr obtener todas las pérdidas de cargas en el circuito de tuberías es necesario considerar las pérdidas de cargas producto de los componentes singulares entre los cuales se tienen a los componentes que permiten la unión de distintas tuberías, es decir, codos, juntas, T, uniones en Y, entre otros, además de las válvulas de control de flujo. Para lograr determinar estas pérdidas se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$h = k \times \frac{v^2}{2 \times g} = \left[\frac{8 \times k}{\pi^2 \times g \times D^4} q^2\right] \tag{35}$$

Por otra parte, estas pérdidas localizadas o singulares se pueden asociar a una longitud equivalente de tubería, la cual se define como la longitud de tubería que generaría la misma pérdida de carga (Le), de lo que se obtiene lo siguiente:

$$L_e = k \times \frac{D}{f} \tag{36}$$

2.8.5 Coeficiente de uniformidad

Es un índice que permite estimar la variabilidad que pueden tener los emisores, se mide en porcentaje y mientras menos variable sea el caudal, mayor será el valor de uniformidad. Por otra parte, la descarga o el caudal entregado por un emisor queda representado por la Ecuación 5, y para términos de este estudio, el promedio de descarga de emisores corresponderá a la descarga que efectúan todos los emisores conectados a un lateral, además de considerar que la descarga total o máxima se efectúa a la entrada de la lateral. De lo anterior se tiene lo siguiente:

- Q_m: caudal promedio
- $Q_{máx}$: caudal máximo
- Q_{lavg}: caudal promedio total
- H_{lavg}: presión promedio total
- Q_n: caudal nominal

Estos parámetros se asocian de la siguiente forma:

$$Q_{máx} = V_{lmáx} \times A \tag{37}$$

$$Q_{avg} = N^{o}emisores \times Q_n \tag{38}$$

$$Q_{lavg} = \frac{\sum qi}{N^{o}emisores\ totales} \tag{39}$$

$$H_{lavg} = \frac{\sum Hi}{N^{o}emisores\ totales} \tag{40}$$

Luego, obteniendo la desviación estándar de los caudales y presiones presentes en el sistema de riego de alta frecuencia, se obtiene lo siguiente:

$$CV = \frac{\sigma}{Q_m} \tag{41}$$

Donde:

CV: Coeficiente de variación por fabricación
σ: Desviación estándar de todos los emisores a estudiar

Q_m: caudal promedio del sistema de riego

Según el procedimiento descrito por Saldarriaga Valderrama (2002), para calcular el valor de coeficiente de variación por fabricación es necesario contar con un mínimo de 25 emisores finales, desde donde es posible separar el coeficiente en dos clasificaciones:

- Clasificación A: Corresponden a emisores de alta uniformidad con CV< 0,05.
- Clasificación B: Corresponden a emisores de baja uniformidad con 0,05 ≤ CV <0,1.

Por otra parte, el coeficiente de uniformidad se calcula tomando en consideración el total de las mediciones de caudal y promediando los 3 menores caudales obtenidos.

Luego, el coeficiente de uniformidad queda expresado de la siguiente forma:

$$CU = \frac{Promedio\ entre\ 3\ menores\ caudales}{Caudal\ promedio\ del\ total\ de\ mediciones} \quad (42)$$

2.9 Componentes hidráulicos en el proceso de riego en lixiviación en pila

Los componentes que a continuación se mencionarán favorecen los siguientes puntos:

- Permiten suministrar mediante sistema de impulsión las soluciones lixiviantes tales como el ILS y el refino de forma dirigida al aglomerado en el pad de lixiviación.
- Por medio de una red de tuberías las soluciones son conducidas, alcanzando así la mayor área posible.
- En el pad de lixiviación, la solución fluye formando un bulbo de mojado, donde el tamaño y la forma dependen del tipo de mineral a procesar, el caudal que el emisor entrega, tiempo de riego, la distancia entre emisores y más.

Como se mencionó anteriormente, la estación de riego corresponde al conjunto de elementos de riego que permiten darle energía al transporte de solución, controlando así las presiones y caudales de esta.

2.9.1 Bombas

Por lo general, las estaciones de riego se conforman por una serie de bombas, las cuales permiten entregar energía al transporte de la solución a través de las tuberías desde una piscina donde se encuentra el fluido estático, hasta los emisores, los cuales presentarán un buen funcionamiento si el circuito y la impulsión está bien diseñado. Algunos aspectos claves del diseño de la estación de bombeo son:

- Cuando es necesario aumentar la presión del sistema, es posible diseñar una estación de bombeo con bombas dispuestas en serie, por otra parte, si es necesario aumentar el caudal, las bombas tendrán que disponerse en paralelo.

- Para que el diseño del sistema de bombeo y la adecuada selección de la bomba se lleve a cabo, es necesario definir primeramente los requerimientos de caudal y presión del sistema completo.

2.9.2 Equipos de control y medición

2.9.2.1 Manómetro

Los manómetros permiten medir la presión dentro de una tubería, lo cual es muy necesario en los riegos donde la tubería se encuentra presurizada, por esto, la estación de bombeo debe poseer un manómetro en la salida de esta.

2.9.2.2 Flujómetro

Los flujómetros permiten medir el caudal presente en la tubería, el cual es un parámetro necesario, con la finalidad de llevar un monitoreo constante. Es necesario instalarlos en lugares específicos como a la salida de la estación de bombeo y a la entrada de las tuberías secundarias.

2.9.2.3 Válvula de corte

Este tipo de válvula tiene como función principal cerrar o abrir el paso del fluido según los requerimientos de la operación a ejecutar. Generalmente este tipo de válvulas es de mariposa.

2.9.2.4 Válvula reguladora de presión

Este tipo de válvula dentro del sistema de riego cumple la función de mantener una presión constante en la descarga, aunque aguas arriba exista variación de la presión. Esta válvula permite asegurar que el riego sea homogéneo, operando la mayor parte del tiempo a la presión establecida en el diseño.

2.9.2.5 Válvula de aire (ventosa)

Este tipo de válvula es de gran importancia en los sistemas de transporte de soluciones en tuberías presurizadas, esto debido a que permiten mantener un control adecuado de la cantidad de aire dentro de la tubería.

Cuando el fluido entra en la tubería, este empuja al aire al interior de esta y es enviada a los lugares más altos o al término de la tubería misma, en esos lugares el

aire puede generar bolsones que propician graves problemas de pérdidas de carga o de otra forma generar sobrepresiones que eventualmente generarían rupturas de la tubería. Por otro lado, en tuberías presurizadas se genera otro fenómeno desfavorable para el transporte de fluidos el cual se conoce por cavitación. Dicho fenómeno se presenta cuando el transporte de fluido ya entra en régimen y por eventos aleatorios el flujo se corta y genera succiones al interior de la tubería o succión del mineral por medio de los goteros, por lo que, es necesario ingresar aire para que la presión al interior se normalice y no se generen rupturas de tuberías.

Existen tres tipos principales de ventosas en el mercado, las cuales son:

- Ventosa automática: La cual evacua en forma continua y en pequeñas cantidades el aire en el interior de la tubería en forma de burbujas.

- Ventosa cinética y anti vacío: Cuando el transporte de solución no está en régimen y el fluido entra y sale, la ventosa permite la entrada y salida de aire en grandes cantidades.

- Ventosa de doble propósito: Este tipo de ventosa posee las dos cualidades de las dos ventosas anteriormente mencionadas.

2.9.3 Tuberías

En el sistema de riego de alta frecuencia la red de distribución de la solución está compuesta por tuberías que se diferencian según su función, de donde se tiene las tuberías de conducción, las cuales llevan la solución hacia las tuberías o líneas de emisores. Para este trabajo de titulo trabajara con HDPE (polietileno de alta densidad) para las tuberías de conducción y PVC minero para las tuberías de emisores.

2.9.4 Emisores

Los emisores son los equipos o dispositivos que controlan y permiten la salida de la solución desde las tuberías laterales y tienen las siguientes características:

- Reducen la presión hasta aproximadamente 0 mca.
- Necesitan un caudal relativamente bajo, sin embargo, este debe ser constante y uniforme, por lo que son poco sensibles a los cambios de presiones.
- Requieren un diámetro y velocidad de paso de solución suficiente para propiciar la no obturación del dispositivo.
- Poseen una fabricación robusta y poco costosa.
- Poseen buena uniformidad de fabricación.
- Son resistentes a la agresividad química y ambiental.
- En su vida útil presentan una estabilidad en la relación de caudal y presión.
- Poseen una reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.

2.9.4.1 Goteros

Para los sistemas de riego que hacen el uso de este tipo de dispositivo, consisten en la aplicación de la solución en forma de gota con una distribución en la pila en forma de bulbo. Los goteros son un emisor de riego localizado que permiten suministrar caudal en diferentes rangos y en específico en este trabajo de título se trabajará con un gotero del tipo de laberinto, en el cual se genera una reducción de la presión de la solución en el laberinto, por lo que, este sale en forma de gota.

2.9.4.2 Aspersores

Para los sistemas de riego que hacen uso de este tipo de dispositivos, consisten en la aplicación de la solución en forma de riego como lluvia de gotas, las cuales poseen baja altura y una distribución de superficie afectada amplia. Este tipo de dispositivo posee elementos giratorios que permiten un riego circular y los rangos de caudales varían entre los 90 y los 1500 l/h, el cual está determinado por el diámetro de la boquilla y la presión a la cual se esté trabajando.

2.10 Recolección de soluciones finales del proceso

Esta parte del proceso de lixiviación es de gran importancia, ya que, se debe asegurar un ambiente impermeable para no incurrir en pérdidas de solución. Para lo anterior, se realizan diversas estructuras que permitan la recolección. Con la finalidad de obtener un terreno apto para la recolección de las soluciones, primeramente, es necesario compactarlo y eliminar los elementos punzantes que pudiesen rasgar la membrana impermeable, además, es necesario diseñar la base con una pendiente entre 3 a 4% en dirección a la canaleta de recolección. Es importante tener una base impermeable debido a que la filtración de solución hacia el medio ambiente puede generar un daño ambiental muy desfavorable. Típicamente, la geomembrana utilizada es de HDPE, LDPE o PVC, con espesores entre los 1 a 2 mm, la cual se dispone sobre una capa de arcilla compactada con un espesor entre los 0,1 a 0,5 m y la primera capa es de material chancado con un diámetro menor a 2 cm (Ahumada, 2019). A un costado de la pila (lado para donde se direcciona la pendiente), se instalan canaletas recolectoras de solución, las cuales se encuentran divididas en dos secciones.

Una vez en estas canaletas, se llevan a piscinas desarenadoras, con la finalidad de clarificar y desde ahí se direccionan hacia las piscinas establecidas según la calidad de la solución, como se vio anteriormente, pueden ser solución final o intermedia (PLS o ILS). Para poder diseñar de forma correcta esta sección de la pila de lixiviación es necesario considerar en el diseño factores como la durabilidad, picado, la resistencia a la corrosión junto con otras condiciones ambientales presentes en la faena (CODELCO, 2019b)

2.11 Dimensionamiento del sistema de impulsión

2.11.1 Descripción

Una parte fundamental del diseño de una malla de riego es el sistema de impulsión, el cual se encarga de entregar el caudal suficiente a una presión determinada, a fin de cumplir con los requerimientos dictados por la planta de extracción por solvente. Es por dicha razón que, para este estudio se definirán dos sistemas de impulsión, uno se utilizará para las simulaciones con emisores del tipo goteros y el otro para la utilización de aspersores.

El sistema de impulsión se compone por la zona de bombeo, donde se consideran bombas dispuestas, ya sea en serie o en paralelo dependiendo de lo que se requiera y todos los componentes necesarios para el accionar seguro del sistema, ya sean válvulas de cierre, válvulas check, entre otras.

2.11.2 Caudales por sección de trabajo

Para lograr dimensionar el sistema de impulsión, primeramente, es necesario contar con la tasa de riego necesaria para cumplir con los requerimientos definidos por la planta, la cual se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{Q_e}{A_{cr}} \tag{43}$$

Donde:

T_r: Tasa riego $(\mathrm{l/h/m^2})$
Q_e: Caudal de un emisor $(\mathrm{l/h})$
A_{cr}: Área de circunferencia de riego $(\mathrm{m^2})$

Luego, es necesario determinar los caudales en cada sección de trabajo, es decir, se requieren los caudales que cubren los laterales, el caudal que pasa por las tuberías secundarias y primarias. Dichos caudales se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{tst} = \frac{A_{Sm} \times T_r}{60} \tag{44}$$

Donde:

Q_{tst}: Caudal teórico total que pasa por tubería secundaria $(\mathrm{l/min})$
A_{Sm} : Área de Submódulo $(\mathrm{m^2})$
T_r : Tasa de riego nominal máxima $(\mathrm{l/h/m^2})$

De otra forma, es posible calcular el caudal que pasa por la tubería secundaria de la siguiente manera:

$$Q_{ts} = Q_e \times N^{\underline{o}}\ emisores\ por\ lateral \times N^{\underline{o}}\ emisores \quad (45)$$

$$Q_{tm} = Q_{ts} \times n^{\underline{o}}\ módulos \quad (46)$$

Donde:
Q_{tm}: Caudal total en módulo (l/min)

$$Q_{tp} = Q_{ts} \times n^{\underline{o}}\ de\ submódulos \times n^{\underline{o}}\ módulos \quad (47)$$

Donde:

Q_{tp}: Caudal que pasa por tubería primaria (m^3/h)

Además, la cantidad de emisores por laterales y cantidad de laterales se calculan de la siguiente forma:

$$N^{\underline{o}}\ emisores\ por\ lateral = \frac{Ancho\ de\ subfranja}{Distancia\ entre\ emisores} \quad (48)$$

$$N^{\underline{o}}\ laterales = \frac{Largo\ de\ subfranja}{Distancia\ entre\ laterales} \quad (49)$$

Con lo cual, el caudal en las laterales se expresa de la siguiente forma:

$$Q_l = Q_e \times N^{\underline{o}}\ emisores\ por\ lateral \quad (50)$$

Por otra parte, un parámetro importante por analizar en este trabajo es el área regada total por el sistema de riego. Dicho parámetro se calcula de la siguiente forma:

$$A_{tr} = A_e \times N^{\underline{o}}\ de\ emisores \quad (51)$$

Donde:

A_{tr}: Área total regada (m^2)
A_e: Área de emisor (m^2)

Una vez conocidos los caudales que pasan por cada tubería, es necesario definir la velocidad a la cual el fluido se transportará a través de esta.

Para lo anterior, es necesario conocer acerca del número de Reynolds y la influencia que tiene en el régimen de movimiento que posee el fluido en la tubería.

2.11.3 Número de Reynolds (R_e)

El número de Reynolds corresponde a un número adimensional y permite caracterizar en 2 tipos de flujo que posee un fluido en movimiento. Estas categorías son (Díaz & Bañol, 2015):

- Flujo Laminar: Es cuando un liquido fluye a través de una tubería en líneas paralelas al eje de esta y con velocidad baja.

- Flujo turbulento: Es cuando la velocidad de un fluido que pasa a través de una tubería es considerablemente alta, generando una corriente en forma de torbellino.

Estos tipos de flujos se pueden ver en la Figura 10.

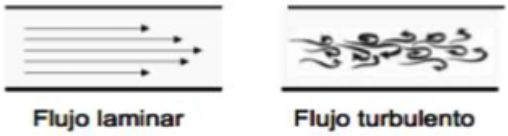


Figura 10. Esquema representativo de régimen laminar y turbulento según Reynolds.

Para poder determinar en qué régimen de flujo se está trabajando, el número de Reynolds propuso límites en los cuales se pasaría de un régimen a otro, por lo que, para de $R_e \leq 2000$ el flujo se considera laminar, para $2000 \leq R_e \geq 4000$ régimen de transición y para $R_e \geq 4000$ se considera régimen turbulento.
Por otra parte, el número de Reynolds se define como:

$$R_e = \frac{d \times v \times \rho}{\mu} \tag{52}$$

Donde:

d: Diámetro de tubería (m)
v: Velocidad del fluido $(\mathrm{m/s})$
ρ: $Densidad\ del\ fluido$ $(\mathrm{Kg/m^3})$
μ: Viscosidad dinámica del fluido $(\mathrm{Pa} \times \mathrm{s})$

Una vez conocido los alcances del R_e, para el presente trabajo de título es necesario considerar un R_e en el rango turbulento, esto con la finalidad de impedir la sedimentación de partículas presentes en el fluido, además asegurar el no taponamiento de emisores. Es debido a lo anterior, que es necesario definir una velocidad tal que permita asegurar un régimen turbulento en la mayor cantidad de tuberías.

Luego, despejando la velocidad desde la Ecuación (52), se obtiene:

$$v = \frac{\mu \times R_e}{d \times \rho} \tag{53}$$

Finalmente, solo será necesario reemplazar los valores de viscosidad dinámica, densidad del fluido, diámetro de tubería y número de Reynolds para lograr calcular la velocidad necesaria para alcanzar un régimen turbulento. Por otra parte, es necesario considerar que, para velocidades mayores, también se obtienen mayores pérdidas de carga, por lo que, será necesario utilizar la menor velocidad que asegure el régimen turbulento, lo que, en otras palabras, significa ocupar $R_e = 4.000$.

2.11.4 Cálculo de diámetro de tubería

Para realizar el dimensionamiento del diámetro de tubería, primeramente, es posible realizar un cálculo tentativo que mostrará un valor cercano a lo que debería se debería escoger, dicho cálculo se hace mediante la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{Q}{3600\, x\, v} \times \frac{4}{\pi}} \tag{54}$$

Donde:

d: Diámetro (m)
Q: Caudal que pasa por la tubería (m^3/h)
v: Velocidad de fluido (m/s)

2.11.5 Presión de trabajo

Otro factor por considerar para el diseño del sistema de impulsión es la presión a la cual la bomba y tuberías deben trabajar, lo cual se puede obtener de la siguiente forma:

$$TDH = \left[(z_1 - z_2) + h_f + h_s + h_d\right] \times FS_{hc} \tag{55}$$

Donde:

TDH: Altura de carga total requerida (m)
z_1: Altura en punto inicial de tubería (m)
z_2: Altura en punto final de tubería (m)
h_f: Pérdidas de carga por fricción (m)
h_s: Pérdidas de carga singulares (m)
h_v: Altura de presión requerida de descarga (m)
FS_{hc}: Factor de seguridad de altura de carga

2.11.6 Dimensionamiento de tuberías

Para el dimensionamiento de las tuberías es necesario definir el caudal que pasará por estas y la velocidad a la cual se transportará el fluido. Una vez definidos estos valores, es posible definir el diámetro de tuberías, sin embargo, las tuberías se definen no tan solo por el diámetro y el largo, sino que también por la presión que son capaces de soportar, a lo cual se le denomina clase o presión nominal (PN). Es debido a lo anterior, que para el diseño de las tuberías será necesario buscar en una base de datos de tuberías comerciales un diámetro inmediatamente superior al diámetro calculado con la velocidad y caudal. Por otra parte, con el valor de TDH calculado se debe elegir la presión nominal (PN) de la tubería.

2.11.7 Dimensionamiento de bombas del sistema de impulsión

El dimensionamiento de la bomba es posible realizarlo una vez conocido el punto de operación, el cual hace referencia al caudal y presión que debe trabajar para lograr cumplir con el riego total de la pila.

Para definir que tipo de bomba se debe implementar para cada sistema de impulsión es necesario calcular la potencia mecánica de la bomba, junto con la potencia eléctrica del motor. Dichos valores se obtienen de la siguiente forma:

$$P_{mb} = \frac{\rho_f \times Q_t \times g \times TDH}{\eta_b} \tag{56}$$

Donde:

P_{mb}: Potencia mecánica de bomba (kW)
ρ_f: Densidad de fluido $(\mathrm{Kg/m^3})$
g: Aceleración de gravedad $(\mathrm{m/s^2})$
η_b: Eficiencia de bomba

$$P_{em} = \frac{P_{mb}}{\eta_m} \tag{57}$$

Donde:

P_{em}: Potencia eléctrica de motor (kW)
η_m: Eficiencia de motor

2.12 Funcionamiento de software EPANET

El software EPANET fue diseñado por La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos y es un programa que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico del agua en redes que presentan una distribución y una presión determinada.

Para la realización de las simulaciones, el software ocupa un método de resolución de ecuaciones de continuidad y de pérdidas mediante el "Método del Gradiente". Luego suponiendo que la red a estudiar corresponde a un sistema de tuberías con N conexiones representadas por nudos y NF nudos fijos que hacen referencia a tanques y depósitos, se presentan las siguientes ecuaciones de pérdidas-caudal en las tuberías en los nudos i y j como se muestra a continuación:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \tag{58}$$

Donde:

H: Altura en nudo
h: Pérdidas
r: coeficiente de resistencia
Q: Caudal
n: Exponente del caudal
m: Coeficiente de pérdidas menores

Es importante mencionar, que el valor correspondiente al coeficiente de pérdidas dependerá netamente de la ecuación de pérdidas que el usuario determine. En especifico, para la ecuación de Darcy-Weisbach, el factor de fricción f se calcula mediante las siguientes ecuaciones dependiendo del número de Reynolds para el caudal en la tubería:

Para Re < 2.000 se utiliza la ecuación de Hagen – Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re} \tag{59}$$

Para Re > 4.000 se utiliza la aproximación de Swamee y Jain a la ecuación de Colebrook - White:

$$f = \frac{0.25}{\left[Ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \tag{60}$$

Para valores de número de Reynolds entre 2.000 < Re < 4.000 se utiliza la interpolación cúbica del ábaco de Moody:

$$f = -0.86859 Ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \quad (61)$$

Donde:
ε: Rugosidad de tubería
d: Diámetro de tubería

Por otra parte, para el cálculo de pérdidas en bombas se puede representar con la siguiente ecuación:

$$h_{ij} = -\omega^2(h_0 - r(Q_{ij}/\omega)^n) \quad (62)$$

Donde:

h_0: Altura de corte para bomba
ω: Velocidad relativa
$r\ y\ n$: Coeficientes de la curva característica de bomba

Luego, el software satisface las ecuaciones de continuidad para todos los nudos en el sistema de tuberías, de lo que se tiene lo siguiente:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \qquad \text{Con i = 1,…N.} \quad (63)$$

Donde corresponde a la demanda de caudal del nudo i y por una convención en la implementación del software, el caudal que entra en un nudo es positivo. Es importante mencionar que, para alturas determinadas para nudos fijos, se buscarán las soluciones de las H_i y Q_{ij} que cumplan con las Ecuaciones 62 y 63.

Para la ejecución del método del Gradiente primeramente se comienza con un valor estimado inicial de caudales para cada una de las tuberías presentes en el sistema, las cuales no tienen necesidad de cumplir con las ecuaciones de continuidad. Para lo anterior, por cada iteración realizada del método se encontrarán nuevas alturas para los nudos, de donde se resolverá la siguiente ecuación matricial.

$$AH = F \quad (64)$$

Donde:

A: Matriz Jacobiana (MxN)
H: Vector de alturas incógnita en nudos (Nx1)
F: Vector de términos del lado derecho de ecuación

Finalmente, después de calculadas las alturas mediante la Ecuación 64, los nuevos caudales se calculan de la siguiente forma:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij}(H_i - H_j)) \tag{65}$$

Luego, si la diferencia existente entre la suma de los caudales absolutos y el caudal total en cada una de las tuberías es mayor que la tolerancia fijada, las Ecuaciones 63 y 64 se vuelven a calcular una vez más.

Por otro lado, la simulación de emisores en el software se realiza modelándolos como tuberías ficticias entre la conexión y el depósito ficticio, donde se tiene que los parámetros de pérdidas en tuberías son:

$$n = (1/\gamma) \tag{66}$$

$$r = (1/C)^n \tag{67}$$

Donde C corresponde al coeficiente de descarga del emisor y γ al exponente de su presión, además, la altura en el depósito ficticio corresponde a la cota de la conexión. Es por todo lo anterior, que el caudal calculado para las tuberías ficticia se transforma en el caudal que se asocia al emisor. Es importante mencionar que, las pérdidas de carga menores son nulas en estas tuberías ficticias.

3 Capítulo III: Metodología

3.1 Descripción de metodología

En la siguiente sección, se describirá la metodología a utilizar para llevar a cabo la optimización de la malla de riego en una pila de lixiviación a partir de simulaciones computacionales. Por una parte, se nombrarán las variables de entrada y de salida, junto con el camino a seguir para lograr diseñar el sistema de impulsión, la geometría de la malla, diámetro y largo de tuberías y cantidad de emisores a utilizar.

Para la realización del presente trabajo se contempló una lixiviación de óxido de cobre y el dimensionamiento de la pila se llevó a cabo tomando en consideración el tiempo de ciclo de riego y requerimientos de la planta de extracción por solvente. La pila de lixiviación se dividió en módulos y estos a su vez en submódulos. De lo anterior, se analizó la distribución geométrica de los emisores y los cambios en el comportamiento de caudal, presión y coeficiente de uniformidad por solo una subfranja, dejando todos los otros módulos resumidos en una sola demanda de caudal, que será el total requerido por módulo (véase Figura 12).

Por otra parte, se utilizaron distintos tipos de emisores dependiendo del caudal necesario por unidad de riego. Los aspersores que se utilizaron son de la marca Senninger, modelo MiniWobbler, que posee una amplia gama de aspersores en función del caudal a emitir.

Para desarrollar las simulaciones, se utilizó el Software Kypipe y EPANET, los cuales entregan los caudales y presiones teóricas de los emisores finales, tomando en consideración la curva de estos (caudal vs presión), los diámetros, celeridades y rugosidades de las tuberías. El software Kypipe se utilizó para realizar el modelo geométrico del sistema de impulsión, tuberías y emisores, y el Software EPANET, se utilizó para realizar las simulaciones.

La razón por la cual el trabajo de título se centró en un solo submódulo, principalmente es debido a que el software Kypipe permite la implementación de 1.000 tuberías y dada la gran cantidad de emisores, es necesario acotar el trabajo. Sin embargo, a pesar de que se restringió el estudio a un solo submódulo, es importante mencionar que diseñando un submódulo y agregando una válvula reguladora de presión al inicio de la tubería secundaria, fue posible replicar el diseño y obtener un resultado homogéneo a lo largo de toda la pila.

Es importante hacer énfasis en que en este trabajo de título se realizaron dos vías de estudio, una fue el estudio del comportamiento del área total de riego en función de la cantidad de aspersores, el radio de alcance de estos y la distribución espacial de los emisores y la otra fue el estudio del comportamiento de la uniformidad de riego en función de la distribución de emisores. Para esta última se implementaron las simulaciones a fin de obtener valores teóricos que permitan analizar la situación planteada.

Por todo lo anteriormente mencionado, se realizó una sola configuración de tuberías primarias y secundarias con la utilización de aspersores, para luego solo variar la distribución geométrica de los emisores dispuestos en la superficie de la pila y de ser necesario el tipo de aspersor, según las necesidades de caudal que se presentaron.

Luego, con las simulaciones terminadas, se realizó un análisis económico que involucró la recuperación de cobre en función de la cantidad de solución lixiviante que se utilizó para el riego de la pila, además se consideraron los costos involucrados en el proceso, los cuales son de inversión para la implementación de sistema de riego y el costo asociado al consumo energético que presenta el sistema de impulsión.

En la Figura 11 se pueden apreciar los componentes principales de la simulación. Es importante mencionar que en las figuras que más adelante se mostrarán, la tubería primaria y secundaria tendrán la misma disposición.

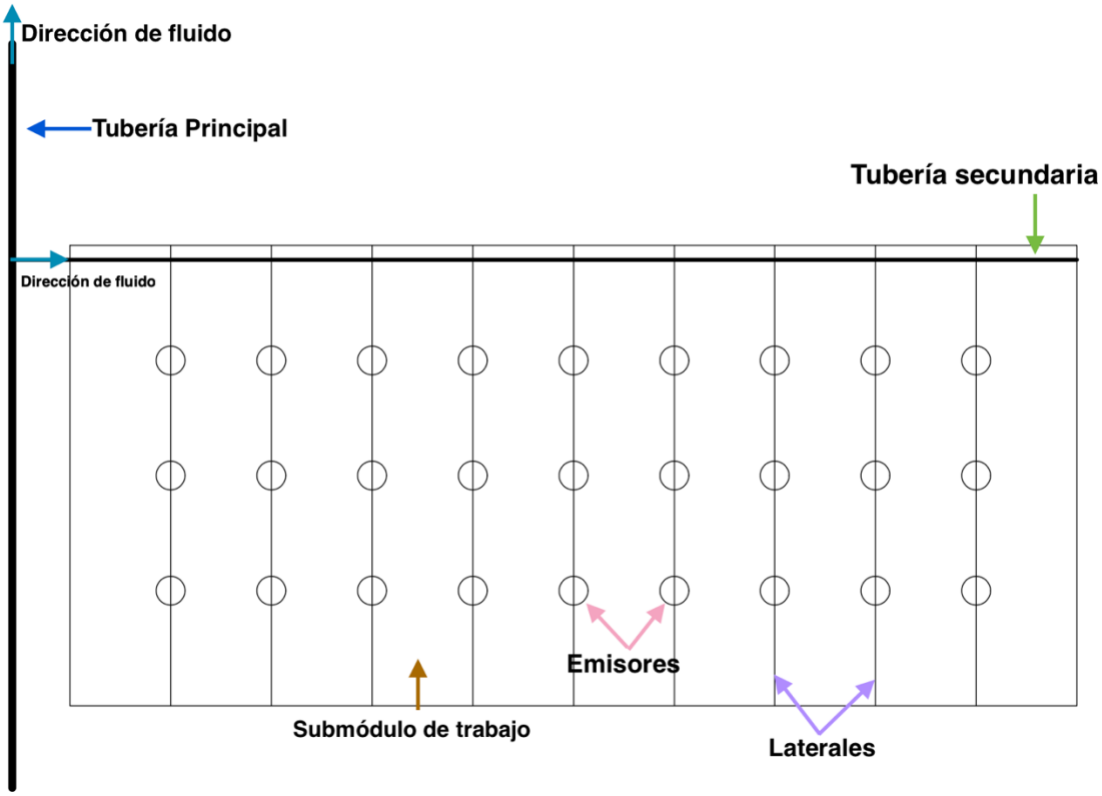


Figura 11. Esquema de simulación con configuración de tuberías primaria, secundaria, laterales y emisores.

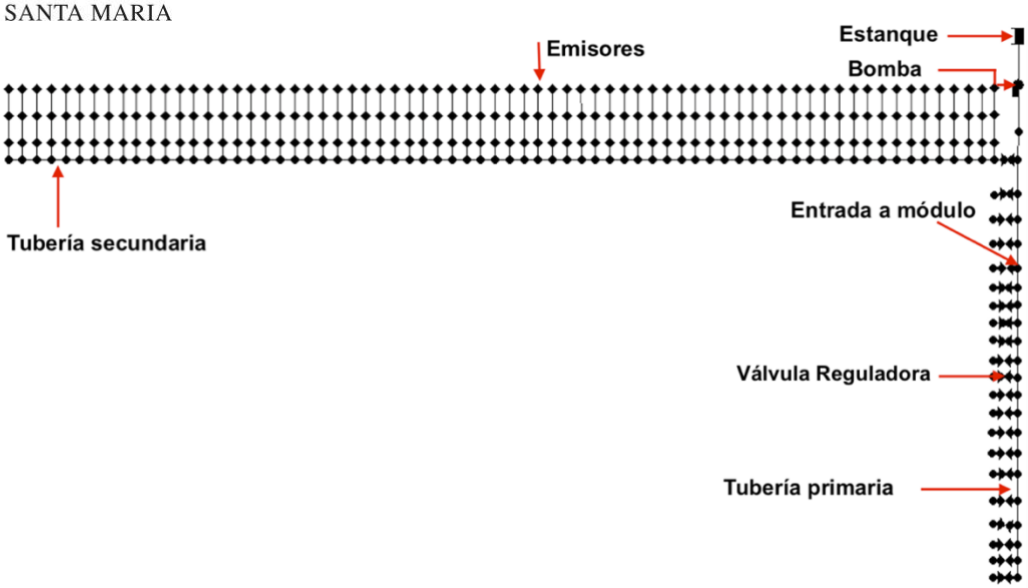


Figura 12. Modelo realizado en software Kpype e importado a EPANET del sistema de riego, con sistema de impulsión y demandas generales para módulos.

Por otra parte, para lograr definir cual sistema de riego es el óptimo, se efectuaron 4 tipos de comparaciones, las cuales son las siguientes:

- **Uniformidad de riego:** El primer punto de comparación a obtener es la uniformidad de riego, por lo que, se implementó un parámetro denominado coeficiente de uniformidad, el cual muestra que tan uniforme es el módulo de riego en términos de caudal y presión.

- **Área regada:** El segundo punto de comparación es el área regada por los emisores. El cálculo de este factor se realizó de forma geométrica, donde se tomó el área completa del módulo de riego, junto con el área que cada emisor cubre, luego se contó la cantidad de emisores y su disposición, para finalmente obtener el valor de área regada. Para lograr lo anterior, se mostró en un esquema el área total a regar y el área cubierta por el riego.

- **Costo de implementación de malla de riego**: Debido a que cada configuración de malla de riego, poseen distintas cantidades de aspersores, se calculó el costo de implementación de malla de riego, donde se consideró solo la cantidad de aspersores, por lo que, en definitiva, el valor real de implementación es mucho mayor. No obstante, el conocer el costo por la totalidad de aspersores a utilizar, es un punto base para determinar que malla es la óptima.

- **Costo de sistema de impulsión**: Para estas simulaciones se consideró 1 solo tipo de sistema de impulsión, sin embargo, debido a que existían variaciones en los caudales requeridos, se analizó cuanta diferencia existe entre simulaciones en términos de costo energético.

El argumento del por qué se decidió considerar este factor para determinar el sistema de riego óptimo, es por la sencilla razón de que un sistema con poca eficiencia necesita un mayor consumo de energía, lo que en términos monetarios se traduce en un mayor costo y como la finalidad de este trabajo de título es entregar un diseño de riego que sea de beneficio para la faena minera, fue necesario considerarlo.

Al concluir con todas las simulaciones, se encontró una geometría de emisores y un sistema de tuberías e impulsión óptimo, que entregaba el riego con porcentaje de uniformidad alto, mayor área regada y la mayor utilidad.

Por otra parte, para las simulaciones que se realizaron, se tendrán 2 tipos de geometrías de distribución de emisores, las cuales son cuadradas y triangulares. Dicha forma geométrica se genera al unir los centros de cada circunferencia de emisor, como se aprecia en las Figuras 13 y 14.

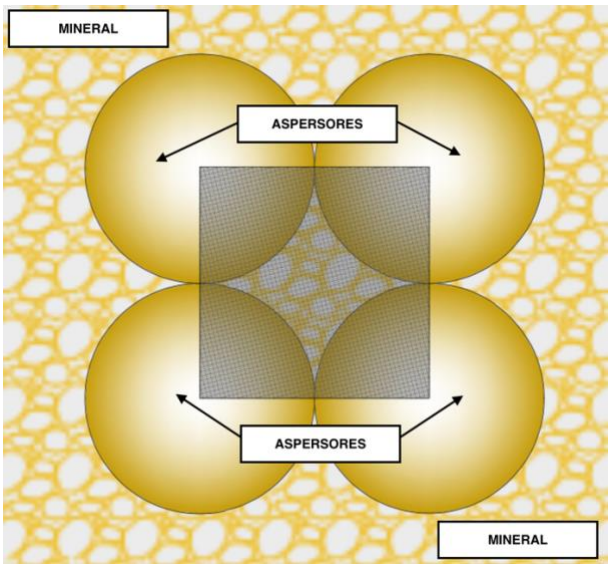


Figura 13. Ejemplo de geometría de trabajo cuadrada, la cual se muestra en color rojo y se forma desde la unión de cuatro centros de circunferencia de riego en color azul.

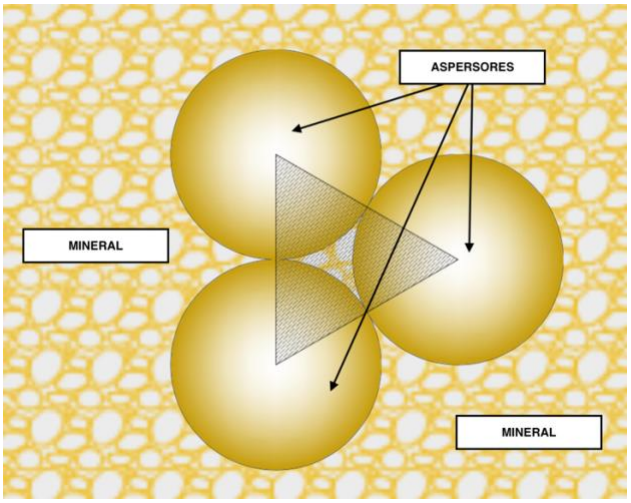


Figura 14. Ejemplo de geometría triangular de trabajo, la cual se muestra en color rosado y se forma desde la unión de tres centros de circunferencia de riego, en color azul se aprecia la circunferencia de alcance del emisor.

Cabe mencionar, que estas geometrías de trabajo solo muestran la distribución de emisores a través de la malla de riego, por lo tanto, los cálculos que se puedan realizar con estas geometrías tendrán relación con las distancias entre laterales y entre emisores. Por el contrario, para realizar los cálculos de caudales por emisor se utilizó el área circular que teóricamente mojarían a cierta tasa de riego en función del radio (véase Figura 15).

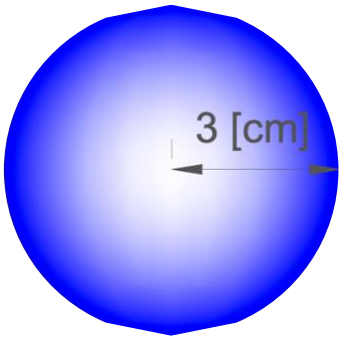


Figura 15. Esquema de circunferencia mojada por emisor en función del radio.

Para llevar a cabo este trabajo de título, se implementó el siguiente orden de cálculos a fin de organizar la información y que quede claro el procedimiento para realizar las simulaciones.

- Tipo de geometría de distribución y radio de acción de emisores: En esta sección se definió el tipo de geometría a utilizar y se calculó el área de alcance de riego por emisor.

- Cálculo de caudal por emisor: Para comenzar con los cálculos de caudales, primeramente, fue necesario conocer cuanto caudal es el que cada emisor tuvo, por lo que, en esta sección se calculó dicho valor.

- Elección de diámetro de aspersor: La empresa Senninger, proveedora de aspersores, entrega en su catálogo el diámetro de boquilla de aspersor, el cual tiene asociados caudales, presiones y constante de emisor, con esto es posible decidir que tipo de aspersor utilizar. En esta sección se determinó que diámetro de boquilla cumple con los requerimientos de caudal y que constante tiene asociada.

  Dichos valores se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de diámetro de aspersor con su respectivo caudal, presión y constante.

Diámetro boquilla (mm)	Q (l/min)	P (mcf)	K
1,59	1,60	9,37	0,52
1,59	1,90	12,56	0,54
1,59	2,10	15,65	0,53
1,98	2,40	9,37	0,79
1,98	2,80	12,56	0,80
1,98	3,20	15,65	0,80
2,38	3,60	9,37	1,18
2,38	4,20	12,56	1,18
2,38	4,70	15,65	1,20
2,78	4,90	9,37	1,61
2,78	5,70	12,56	1,61
2,78	6,40	15,65	1,62

- Cálculo de cantidad de emisores y laterales: Utilizando el radio de alcance de los emisores, junto con el área total que se debe regar por submódulo, se calculó la cantidad de emisores y laterales que se dispusieron a lo largo del submódulo.

- Cálculo de área total regada: Una vez obtenido el valor de cantidad de emisores que se podrán disponer en el submódulo, se calculó cuanta área es regada con esa geometría de distribución y radio de alcance de riego.

- Cálculo de caudales en tubería secundaria y módulos: En esta sección se calcularon los caudales presentes en las tuberías secundarias y módulos.

- Caudales obtenidos en emisores: Una vez efectuada cada simulación se rescataron los valores de caudales por emisor para su eventual análisis.

- Presiones obtenidas en emisores: Al igual que en la sección anterior, en este inciso se mostraron los valores de presiones obtenidos para cada emisor, a fin de realizar un eventual análisis.

- Coeficiente de uniformidad: En esta sección se presentó el resultado de coeficiente de uniformidad obtenido para cada geometría de distribución de emisores. Es importante mencionar que no se mostrará el procedimiento realizado, debido a que la gran cantidad de emisores, sin embargo, es importante mencionar que los cálculos se efectuaron en Excel y se utilizó la totalidad de emisores y a partir de ellos se buscaron los 3 caudales menores.

- Cálculo de costo de implementación: Luego de determinada la cantidad de emisores a utilizar, se procedió a calcular el costo que supondría el implementar dicha malla de riego.

- Calculó de costo energético de sistema de impulsión: Luego de la realización de las simulaciones, el software entregó un informe completo desde donde se extrajo el valor de consumo eléctrico hora por metro cúbico.

3.2 Descripción de ejecución de simulaciones

3.2.1 Parámetros fijos para las simulaciones

Primeramente, para lograr desarrollar las simulaciones fue necesario contar con valores de entrada, los cuales fueron fijos a través de todas las simulaciones, dichos parámetros fueron:

- Viscosidad cinemática $= 1{,}02\ x\ 10^{-6}(\mathrm{m}^2/\mathrm{s})$ (Navarro et al., 2018)
- Densidad $= 1{,}025\ (\mathrm{g/ml})$ (Navarro et al., 2018)
- Ecuación para perdidas de carga: Darcy - Weisbach
- Unidad de Presión: (mcf)
- Unidad de Caudal: $(\mathrm{l/min})$
- Unidad para diámetro de tuberías: (mm)
- Unidad para longitud de tuberías: (m)

Luego, la metodología utilizada para la realización de las simulaciones fue la siguiente:

Primeramente, en el software Kypipe se realizó el modelo o esqueletización del sistema de riego. Como se mencionó anteriormente, se le dio énfasis al diseño de un submódulo, por lo cual, se dispusieron todos los emisores con su respectiva geometría y distancias establecidas, luego a fin de cumplir con los requerimientos de caudal en el sistema de riego completo, fue necesario poner a continuación 20 demandas, las cuales representan la entrada de caudal al módulo completo. Es necesario mencionar que la primera demanda sucesiva al primer submódulo cumple con el requerimiento

restante del caudal del módulo completo, en otras palabras, al total del caudal del módulo se le restó el caudal que entra en el primer submódulo. Luego, con la finalidad de regular la presión de entrada a cada tubería secundaria, se dispuso una válvula reductora de presión al inicio de estas. Con lo anterior, se dispuso la bomba en línea recta con la tubería principal que une a todas las tuberías secundarias. Dicha bomba se conectó a un estanque o poso de fluido del cual se extrae la solución lixiviante, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Esquema de disposición de tuberías en la pila de lixiviación.

Debido a que existen diferencias de altura entre la tubería primaria, secundaria y laterales, fue necesario proporcionar la cota donde cada una se ubicaría. Luego, con los cálculos hechos de caudales, se procedió a agregar los diámetros y longitudes a cada una de las tuberías. Con lo anterior, para poder comenzar la simulación fue necesario antes agregar la constante del emisor, la cual permite que el programa calcule cuanto caudal puede entregar este a una presión determinada. Luego se realizó la simulación y se compararon con los resultados obtenidos con los valores calculados previamente y si la comparación mostraba que los caudales eran los requeridos, se exportaba el informe completo de la simulación, en el caso contrario, si la cantidad de caudal obtenido en el aspersor más lejano al inicio de la tubería secundaria no era consistente con el requerimiento, se modificaba la configuración de la válvula reductora de presión, donde se cambiaba la presión de salida de esta. Luego se realizaban iteraciones hasta conseguir el valor de caudal necesario para el riego de la pila. Es importante mencionar que el resultado final de la simulación se determinó en función del último aspersor, debido a que dicho aspersor corresponde al emisor que mayor pérdida de carga presenta, ya que, el fluido debe recorrer una mayor longitud.

Como se mencionó anteriormente, una vez que la simulación terminó, se exportó un informe completo donde se muestran los caudales y presiones en cada emisor, el

consumo energético entre otros valores, pero para efectos de este trabajo solo se utilizaron estos parámetros, los cuales se dispusieron en Excel para su eventual manipulación y análisis.

3.3 Variables involucradas en el proceso de diseño

3.3.1 Variables de entrada

Al hablar sobre variables de entrada, se hace referencia a los parámetros que son necesarios poseer y que son indispensables al momento del diseño. Dichos parámetros son los siguientes:

- Tipo de emisor
- Caudal o descarga de emisor
- Tasa de riego
- Espaciamiento entre emisores
- Diámetro de tuberías
- Curva de emisor
- Geometría del submódulo de riego
- Pendientes del módulo
- Espaciamiento entre laterales

3.3.2 Variables de salida

Las variables de salida que a continuación se mencionarán, corresponden a los parámetros que son resultado del diseño, habiendo utilizados las variables de entrada.

- Diferencia de presión en tuberías primarias, secundarias y laterales
- Caudal menor de submódulo
- Caudal mayor de submódulo
- Caudal medio de submódulo
- Longitudes de tuberías
- Uniformidad de riego en módulo de trabajo

3.4 Cálculos de parámetros estándar para las diferentes simulaciones

3.4.1 Diseño de pila de lixiviación

Para comenzar el diseño del sistema de riego, primeramente, fue necesario contar con las dimensiones y las pendientes que definen la pila de lixiviación, como se muestra a continuación.

3.4.1.1 Dimensiones

Para lograr realizar el dimensionamiento de la pila de lixiviación fue necesario contar con la tasa de entrega de PLS a la planta de extracción por solvente, el ciclo de lixiviación, la densidad del mineral aglomerado y la altura de pila, además, considerando que se utilizó una pila de forma rectangular y utilizando la Ecuación (1), se obtuvo una corona de pila de las siguientes dimensiones:

$$A_{cild} = \frac{30.464\ {}^{\mathrm{t}}/_{\mathrm{d}} \times 150\ \mathrm{d}}{1{,}36\ {}^{\mathrm{t}}/_{\mathrm{m}^3} \times 6\ \mathrm{m}} \approx 560.000\ \mathrm{m}^2$$

Utilizando los siguientes valores:

T_m= 30.464 t/d
C_l = 150 días
ρ_{ma} = 1,36 t/m^3 (Carvajal, 2012)
H_n = 6 m

Una vez con el valor del área de la corona de la pila, fue necesario definir el largo y ancho de esta, se eligió un largo mucho mayor al ancho, debido a que, se decidió analizar el comportamiento de un solo submódulo. Con esto fue posible tener una mayor diferencia de presiones por pérdidas de carga en la tubería secundaria y así

lograr mostrar las variaciones que se pueden generar en los caudales que entregan los emisores. De lo anterior se tiene lo siguiente:

Largo de corona = 1.600 m
Ancho de corona = 350 m

Las dimensiones anteriores corresponden a la corona de la pila, por lo que, de acuerdo con la Ecuación (2), el área de la base de la pila queda definida de la siguiente forma:

$$L_{ba} = 1.600 + 2 \times \frac{6}{\tan 20} \approx 1.634$$

Donde:

L_{ba} = Longitud basal de mineral apilado m
L_{ca} = 1.600 m
H_n = 6 m
tan α_{rma} = 20º

Finalmente, realizando el mismo procedimiento anterior para el ancho de la base de la pila, las dimensiones de la base quedaron representadas por:

Ancho = 383 m
Largo = 1.634 m

3.4.1.2 Definición de área de trabajo

Como se mencionó anteriormente, la pila de lixiviación se dividió en módulos de trabajo y estos a su vez en submódulos. Luego, con las dimensiones calculadas, se obtuvo que de forma transversal la pila se dividió en 20 módulos de 80 m y cada módulo se dividió en 5 submódulos de trabajo de 16 m. El largo de cada módulo y submódulo son iguales y tienen un valor de 350 m.
Lo anterior realizado, se puede observar en las Figuras 17 y 18.

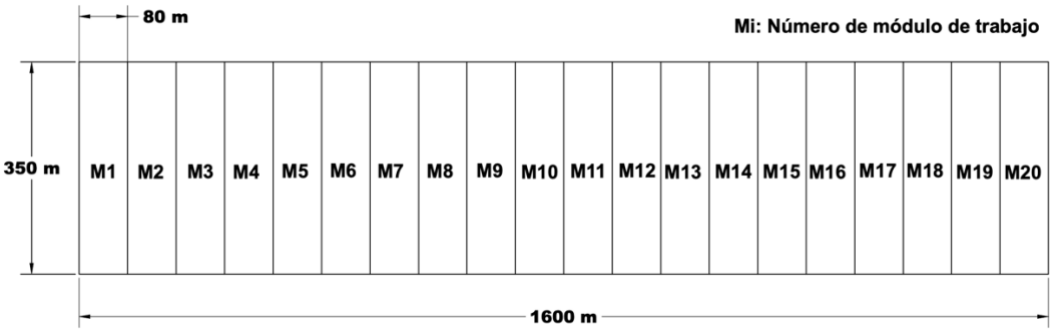


Figura 17. Dimensiones de pila de lixiviación y la división en 20 módulos.

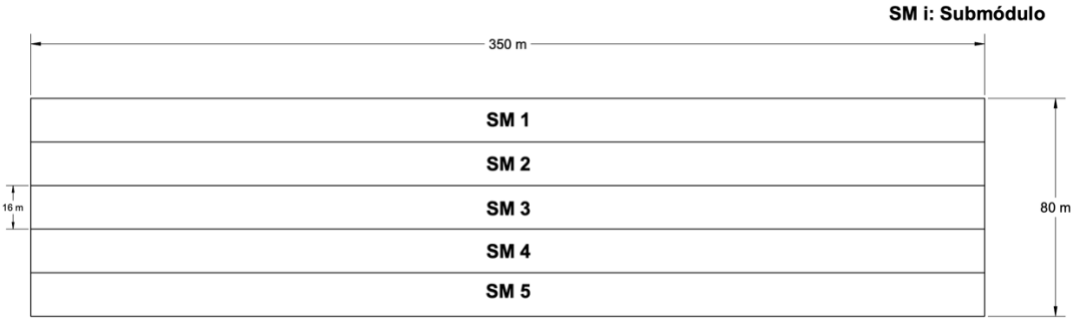


Figura 18. División de un módulo en submódulos.

3.4.1.3 Pendientes en la pila de lixiviación

En este trabajo de título se trabajó con pendientes en la base de la pila, con el propósito de lograr recolectar los fluidos de forma adecuada, sin embargo, a nivel general de pila será de forma horizontal, a fin de observar las diferencias de caudales en relación con la pérdida de presión por pérdidas de carga en tubería secundaria.

Por lo general, las pendientes que se utilizan para la realización de una pila de lixiviación son de 4% en dirección longitudinal y 1% dirección transversal (Aburto, 2016), como se muestra en Figuras 19 y 20:

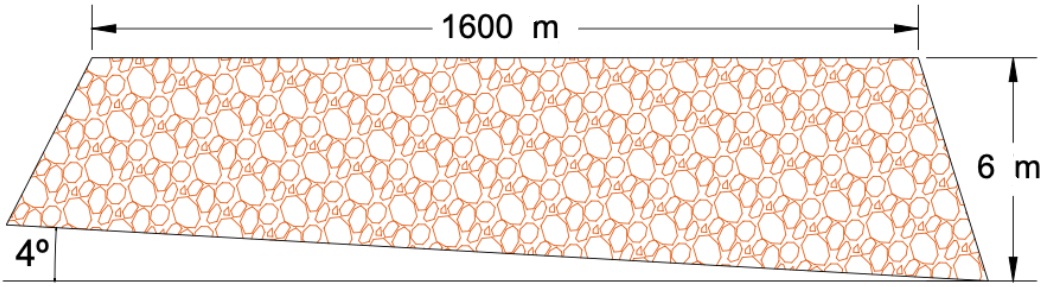


Figura 19. Esquema de pendiente longitudinal en la pila de lixiviación.

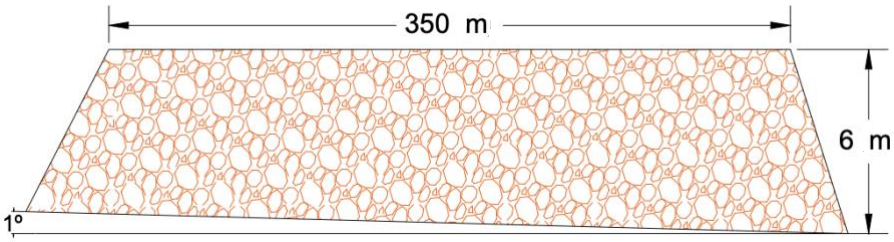


Figura 20. Esquema de pendiente transversal en la pila de lixiviación.

3.4.1.4 Tipo de mineral (mena)

El mineral que se lixivió es un óxido de cobre denominado crisocola, el cual se escogió debido a su rápida cinética de reacción y que es posible efectuar la lixiviación a temperatura ambiente.

La ecuación química de la reacción de la crisocola con el ácido sulfúrico es la siguiente:

$$CuSiO_3 \cdot 2H_2O + H_2SO_4 \leftrightarrow CuSO_4 + SiO_2 + H_2O$$

Las propiedades físicas de la crisocola se presentan en la Tabla 5:

Tabla 5. Propiedades físicas y entorno de comunes de localización.

Composición	Silicato de cobre
Dureza	2 - 4
Color	Verde Brillante, Azul cielo a gris
Entorno	Se puede encontrar en zonas de oxidación de depósitos de cobre, rocas ígneas y depósitos de reemplazo hidrotermal.

A continuación, se presenta en la Figura 21 una representación de la crisocola.

Figura 21. Fotografía del mineral crisocola.

3.4.1.5 Impermeabilización de base y tuberías de recolección

Para la impermeabilización de la base se implementó el siguiente diseño acorde a lo mostrado en la Figura 22. Donde se utilizó un espesor de HDPE de 2 mm, enseguida se dispuso de material compactado de 50 cm de espesor y finalmente se colocó una capa de material chancado con un diámetro menor a 2 cm, esta ultima capa era de 50 cm.

Para el drenaje de la solución se utilizaron tuberías corrugadas ranuradas o perforadas, con un diámetro de 100 mm que conducían el fluido hacia las tuberías colectoras que son corrugadas de 375 mm. La función de estas tuberías es colectar las soluciones para dirigirlas a las tuberías de colección exterior, que por lo general se emplean aguas debajo de la pila, es decir, a un costado de esta (Aburto, 2016).

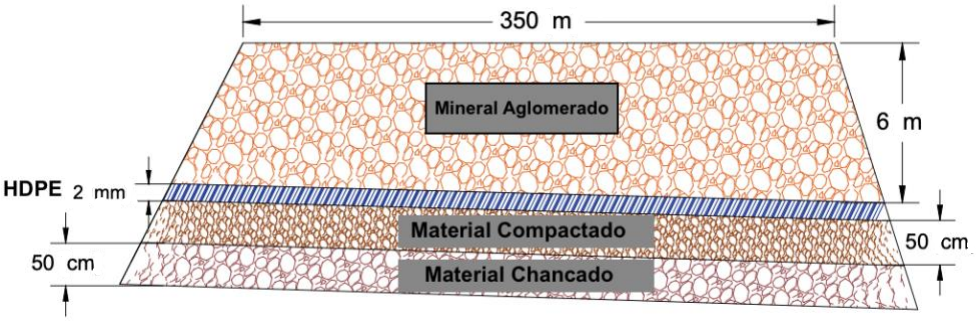


Figura 22. Esquema de disposición de impermeabilización en la base de la pila.

3.5 Simulaciones

A continuación, se describirá el proceso utilizado para realizar las simulaciones, donde solo se mostrará la realización de una simulación con geometría cuadrada y una con geometría triangular, debido a que se llevaron a cabo 48 simulaciones. Además, es importante mencionar que la simulación con geometría cuadrada que se mostrará corresponde a la utilizada para obtener el sistema de impulsión.

3.5.1 Simulación con geometría cuadrada

3.5.1.1 Dimensionamiento de sistema de impulsión

A continuación, se mostrará el procedimiento de dimensionamiento del sistema de impulsión el cual también será contabilizado como parte de las simulaciones, donde se determinará el diámetro de tubería primaria, secundaria y lateral. Es importante hacer énfasis en que este dimensionamiento se llevará acabo con parámetros aleatorios de distancias entre emisores y laterales, sin embargo, se considerará constante la tasa de riego del sistema. Por otra parte, es importante mencionar que este sistema de impulsión será constante durante las simulaciones, por lo que, no será necesario volver a calcular los diámetros de las tuberías.

3.5.1.2 Tipo de geometría de distribución y radio de acción de emisores

Para esta simulación y dimensionamiento de sistema de impulsión, se utilizó una separación de emisores de 4 m y una separación de laterales de 4 m de lo cual se obtuvo un área de trabajo cuadrada de emisores de 16 m^2, como se muestra en la Figura 23. Es importante considerar que los aspersores riegan de forma circular, por lo que, el área de riego por emisor se puede considerar como el área de una circunferencia, la cual se calcula como πr^2 y tiene un valor de 12,56 m^2.

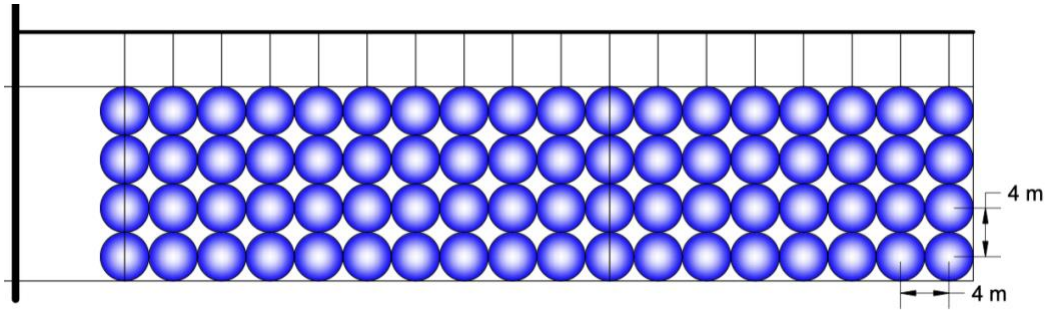


Figura 23. Esquema de distribución geométrica de emisores y las dimensiones de distancias.

3.5.1.3 Cálculo de caudal por emisor

Utilizando la Ecuación (43), despejando el caudal, definiendo una tasa de riego de 10 $\mathrm{l/h/m^2}$ y un radio de circunferencia de riego de 12,56 m^2 se tiene lo siguiente:

$$Q_e = 12{,}56 \times 10 = 126\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}} = 2{,}1\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$$

Por lo que, el valor de caudal por emisor es de 2,1 ${}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$.

3.5.1.4 Elección de diámetro de aspersor

Para poder escoger el diámetro de la boquilla del emisor fue necesario utilizar el caudal por emisor, el cual es de 2,1 $^{l}/_{min}$, por lo cual, el diámetro inmediatamente más grande que cumple con los requerimientos de riego es el de 1,59 mm, el cual posee una constante de 0,53.

3.5.1.5 Cálculo de cantidad de emisores y laterales

Para el cálculo de cantidades de emisores se consideró el área de corona y no el de la base, por lo que, los costados de la pila no se regarán.

Tomando en cuenta que se trabajó con un solo submódulo y que el resto se resumirá en demandas generales por módulos, se tiene que regar un área total de 5.600 m^2, como se muestra en la Figura 24.

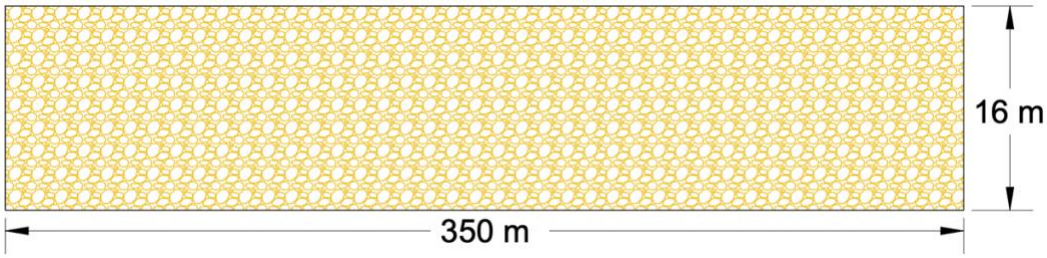


Figura 24. Dimensiones de submódulo.

Con lo anterior, y tomando en cuenta que la distancia entre emisores es de 4 m al igual que la distancia entre laterales y ocupando las ecuaciones (48) y (49), se tiene que:

$$Nº\ emisores\ en\ lateral = \frac{16\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{m}} = 4$$

$$Nº\ laterales = \frac{350\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{m}} \approx 87$$

Dando como resultado la cantidad total de emisores es de 348.

3.5.1.6 Cálculo de área total regada

Utilizando el radio de riego de los emisores, se calculó el área total regada de la utilizando la Ecuación (51) y se obtuvo que:

$$A_{tr} = 12{,}56 \times 348 = 4373\ \mathrm{m}^2$$

3.5.1.7 Cálculo de caudal en tubería secundaria y módulos

Con el valor de área total a regar es posible calcular el caudal teórico que pasa por la tubería secundaria que permite regar el 100% del mineral, utilizando la Ecuación (44):

$$Q_{ts} = \frac{5600 \times 10}{60} = 933{,}3\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$$

Dicho valor teórico fue utilizado para comparar los caudales obtenidos en todas las simulaciones, por lo tanto, es un valor fijo.

Luego, utilizando la Ecuación (45), el cálculo de caudal de la tubería secundaria en función del radio de circunferencia de riego se expresa como:

$$Q_{ts} = 2{,}1\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}} \times 87 \times 4 = 728{,}8\,{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$$

3.5.1.8 Cálculo de caudal en tubería primaria

Para calcular el caudal que pasará en la tubería primaria, es necesario conocer el número de módulos, el caudal por módulo y utilizando la Ecuación (47), se tiene lo siguiente:

$$Q_{tp} = 728{,}8 \times 5 \times 20 = 72.880\,{}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}} \approx 4372\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}$$

3.5.1.9 Dimensionamiento de diámetro de tubería primaria

Para el dimensionamiento del diámetro de las tuberías es necesario considerar un régimen turbulento para la gran mayoría de estas como ya se ha mencionado, por lo que, se debe definir una velocidad límite que permita dicho régimen, esto se consigue utilizando la Ecuación (53), con un valor de número de Reynolds de 4000 (valor límite para régimen turbulento). Por otra parte, es necesario también considerar que la velocidad con la que el fluido pasa por la tubería no puede ser tan elevada, ya que, aumentarían las pérdidas de carga. De lo anterior, se decidió utilizar un valor máximo de velocidad de 3 $\mathrm{m/s}$, sin embargo, para las tuberías de mayor longitud, se decidió utilizar una velocidad menor, ya que las pérdidas de cargas asociadas a longitudes grandes son un factor muy importante para considerar.

Una vez con la velocidad definida, se procedió a calcular un diámetro tentativo de tubería, haciendo uso de la Ecuación (53), donde se obtuvo lo siguiente:

$$d = \sqrt{\frac{4372}{3600 \times 3} \times \frac{4}{\pi}} \approx 710 \text{ mm}$$

Luego, escogió el diámetro inmediatamente superior de la marca tigre, el cual posee un diámetro interno de 710 mm.

3.5.1.10 Dimensionamiento de diámetro de tubería secundaria

Considerando el valor obtenido de caudal para las tuberías secundarias, se tiene el siguiente valor de diámetro:

$$d = \sqrt{\frac{56}{3600 \times 0.8} \times \frac{4}{\pi}} \approx 140 \text{ mm}$$

Luego, se escogió un diámetro inmediatamente superior de la marca Vinilit en material PVC con diámetro externo 6”.

3.5.1.11 Dimensionamiento de diámetro de laterales

Teniendo en cuenta el valor de caudal obtenido para los laterales, se tiene el siguiente valor de diámetro:

$$d = \sqrt{\frac{0{,}5}{3600 \times 2} \times \frac{4}{\pi}} \approx 9{,}4 \text{ mm}$$

De lo anterior, se escogió un diámetro de 16 mm en HPDE de la marca tigre.

3.5.1.12 Caudales obtenidos

Los caudales obtenidos para la simulación se presentan en Tabla 6.

Tabla 6. Valores obtenidos de caudales en la simulación.

Promedio de caudal del total de aspersores (l/min)	Promedio de 3 menores caudales (l/min)
2,11	2,09

3.5.1.13 Presiones obtenidas

Los valores de presiones que se obtuvieron para la simulación se presentan en Tabla 7:

Tabla 7. Valores obtenidos de presiones en la simulación

Presión mayor (mcf)	Presión menor (mcf)	Diferencia de presión (mcf)
16,4	15,6	0,8

.

3.5.1.14 Cálculo de coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad de esta simulación se presenta en Tabla 8:

Tabla 8. Valor de coeficiente de uniformidad obtenido.

Coeficiente de uniformidad (CU)
99,3%

3.5.1.15 Configuración de válvula reductora de presión

El valor que se fijó para todas las válvulas reductoras de presión fue de 16,6 m.

3.5.1.16 Costo de sistema de impulsión

El costo energético del sistema fue de 0,2 $\mathrm{kWh/m^3}$.

3.5.1.17 Cálculo de costo de implementación (Ci)

El costo de implementación de malla de riego es de:

$$Ci = 348 \times 5 \times 20 \times 2.590 = \$\,90.132.000$$

Donde CLP$ 2.590 corresponde al valor unitario de aspersor, 5 a la cantidad de submódulos y 20 corresponde a la cantidad de módulos que componen la pila completa.

3.5.2 Simulación con geometría triangular

3.5.2.1 Tipo de geometría de distribución y radio de acción de emisores

Para esta simulación se definió una distribución del tipo triangular donde el radio de acción de los emisores es de 2 m, dando como resultado un área de riego de 12,56 m^2, como se muestra en la Figura 25.

El cambio que se genera al utilizar este tipo de geometría recae principalmente en la cantidad de emisores dispuestos, debido a que es necesario poner los emisores de la primera lateral a un radio y medio de distancia con la tubería secundaria y luego la segunda lateral se dispone a un radio de distancia de la tubería secundaria, con lo cual, se genera la disminución de 1 aspersor por lateral, además, la distancia entre laterales cambia debido a que el triangulo que se forma entre tres centros de circunferencia de emisores es un triangulo equilátero, con esto, la distancia entre laterales disminuye.

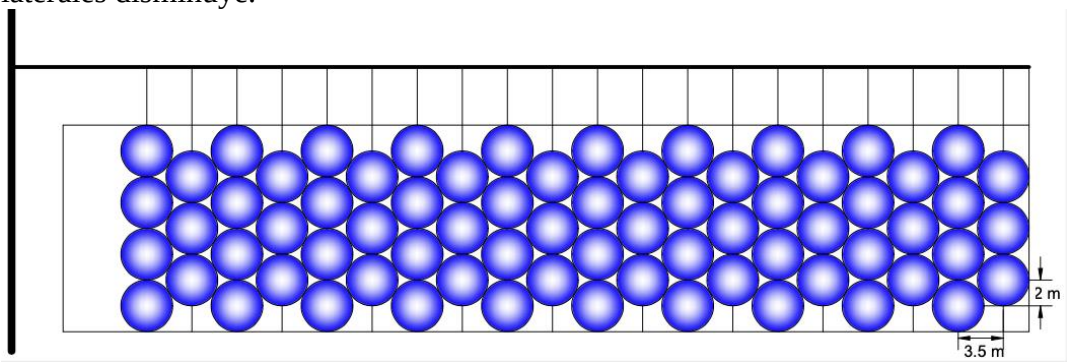


Figura 25. Esquema de distribución geométrica de emisores y las distancias entre centros de circunferencias.

3.5.2.2 Cálculo de caudal por emisor

Utilizando la Ecuación (43), despejando el caudal, definiendo una tasa de riego de 10 $l/h/m^2$ y un radio de circunferencia de riego de 12,56 m^2 se tiene lo siguiente:

$$Q_e = 12{,}56 \times 10 = 125{,}6\ {}^{l}/_{h} = 2{,}1\ {}^{l}/_{min}$$

Por lo que, el valor de caudal por emisor es de 2,1 ${}^{l}/_{min}$.

3.5.2.3 Elección de diámetro de aspersor

Para poder escoger el diámetro de la boquilla del emisor fue necesario utilizar el caudal por emisor, el cual es de 2,1 l/min, por lo cual, el diámetro inmediatamente más grande que cumple con los requerimientos de riego es el de 1,59 mm, el cual posee una constante de 0,53.

3.5.2.4 Cálculo de cantidad de emisores y laterales

Considerando que el área de trabajo es constante, la cantidad de emisores y laterales para una geometría triangular se calcularon como muestra la Figura 26.

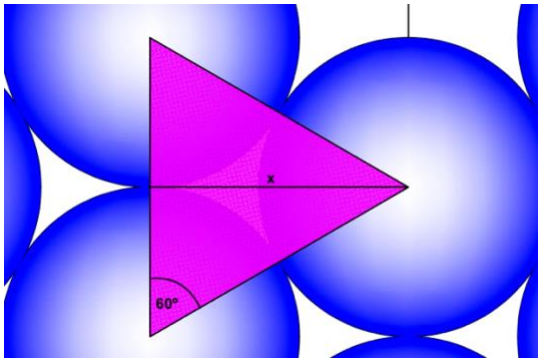


Figura 26. Esquema de una Geometría triangular donde se muestra la distancia existente entre dos laterales.

Desde la Figura 25 se puede extraer que la distancia que existe entre lateral se puede expresar de la siguiente forma:

$$\tan(60) = \frac{x}{r} \tag{58}$$

$$x = r\tan(60) \tag{59}$$

Luego, utilizando la Ecuación (59) se calculó la distancia entre las laterales, dando como resultado lo siguiente:

$$Distancia\ entre\ laterales = 2\tan(60)$$

$$Distancia\ entre\ laterales \approx 3{,}5\ \mathrm{m}$$

Entonces, la cantidad de emisores en lateral y números de laterales fueron los siguientes:

$$Nº\ emisores\ en\ lateral = \frac{16\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{m}} \approx 4$$

$$Nº\ laterales = \frac{350\ \mathrm{m}}{3{,}5\ \mathrm{m}} \approx 100$$

Luego, para calcular la cantidad de emisores se realizó una suma ponderada donde el 50% de los laterales constó de 3 emisores y el 50% 4 emisores, dando como resultado 354 aspersores.

3.5.2.5 Cálculo de área total regada

Utilizando el radio de riego de los emisores, se calculó el área total regada de la utilizando la Ecuación (51) y se obtuvo que:

$$A_{tr} = 12{,}56 \times 354 = 4448\ \mathrm{m}^2$$

3.5.2.6 Cálculo de caudales en tuberías secundaria y módulos

Para realizar el cálculo de caudales en tuberías secundarias se utilizó la Ecuación (45), sin embargo, debido a que el número de emisores varia para geometría triangular, se calculó el caudal de la tubería secundaría considerando el total de emisores. Este cálculo es en función del radio de circunferencia de riego, el cual tuvo un valor de:

$$Q_{ts} = 2{,}1\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}} \times 350 = 735\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$$

Además, utilizando la Ecuación (46) se calculó el caudal teórico en el módulo completo, dando un valor de:

$$Q_{tm} = 735 \times 5 = 3675\ {}^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{min}}$$

3.5.2.7 Caudales obtenidos en emisores

Los valores de caudales que se obtuvieron para la simulación se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores obtenidos de caudales en la simulación.

Promedio de caudal (l/min)	Promedio menores (l/min)
2,11	2,09

3.5.2.8 Presiones obtenidas en emisores

Los valores de presiones que se obtuvieron para la simulación se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores obtenidos de presiones en la simulación.

Presión mayor (mcf)	Presión menor (mcf)	Diferencia de presión (mcf)
16,4	15,6	0,8

3.5.2.9 Cálculo de coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad de esta simulación se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Valor de coeficiente de uniformidad obtenido.

Coeficiente de uniformidad (CU)
99,2%

3.5.2.10 Configuración de válvula reductora de presión

El valor que se fijó para todas las válvulas reductoras de presión fue de 16,6 m.

3.5.2.11 Costo de sistema de impulsión

El costo energético del sistema fue de 0,19 $\mathrm{kWh/m^3}$.

3.5.2.12 Cálculo de costo de implementación (Ci)

El costo de implementación de malla de riego es de:

$$Ci = 358 \times 5 \times 20 \times 2.590 = \$\ 91.686.000$$

Donde CLP$ 2.590 corresponde al valor unitario de aspersor, 5 a la cantidad de submódulos y 20 corresponde a la cantidad de módulos que componen la pila completa.

3.5.3 Resumen de resultados obtenidos

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 48 simulaciones donde 24 fueron con geometría cuadrada y 24 con geometría triangular. A continuación, se presentarán los resultados obtenidos para dichas simulaciones las Tablas 12,13,14,15.

Tabla 12. Resumen de resultados obtenidos de cantidad de aspersores y área total regada.

N° Simulación	Geometría	Radio	Nº Aspersores	Área regada (m^2)
1	Cuadrada	1,7	412	3738
2	Cuadrada	1,8	388	3949
3	Cuadrada	1,9	368	4178
4	Cuadrada	2,0	348	4373
5	Cuadrada	2,1	249	3450
6	Cuadrada	2,2	237	3604
7	Cuadrada	2,3	228	3789

8	Cuadrada	2,4	219	3958
9	Cuadrada	2,5	210	4123
10	Cuadrada	2,6	201	4269
11	Cuadrada	2,7	192	4397
12	Cuadrada	2,8	124	3054
13	Cuadrada	2,9	120	3170
14	Cuadrada	3,0	116	3280
15	Cuadrada	3,1	112	3381
16	Cuadrada	3,2	108	3474
17	Cuadrada	3,3	106	3626
18	Cuadrada	3,4	102	3704
19	Cuadrada	3,5	100	3848
20	Cuadrada	3,6	96	3909
21	Cuadrada	3,7	94	4043
22	Cuadrada	3,8	92	4174
23	Cuadrada	3,9	88	4205
24	Cuadrada	4,0	86	4323
25	Triangular	1,7	416	3777
26	Triangular	1,8	393	4000
27	Triangular	1,9	373	4230
28	Triangular	2,0	354	4448
29	Triangular	2,1	240	3325
30	Triangular	2,2	228	3467
31	Triangular	2,3	218	3623
32	Triangular	2,4	210	3800
33	Triangular	2,5	200	3927
34	Triangular	2,6	193	4099
35	Triangular	2,7	183	4191
36	Triangular	2,8	108	2660
37	Triangular	2,9	104	2748
38	Triangular	3,0	101	2856
39	Triangular	3,1	98	2959
40	Triangular	3,2	95	3056
41	Triangular	3,3	92	3147
42	Triangular	3,4	89	3232
43	Triangular	3,5	86	3310
44	Triangular	3,6	84	3420
45	Triangular	3,7	81	3484
46	Triangular	3,8	80	3629
47	Triangular	3,9	77	3679
48	Triangular	4,0	75	3770

Tabla 13. Resumen de resultados obtenidos de presiones.

N° Simulación	Menor presión (mcf)	Mayor presión (mcf)	Diferencia de presión (mcf)
1	8,4	8,9	0,5
2	10,1	10,7	0,6
3	12,5	13,2	0,7
4	15,6	16,4	0,8
5	8,6	9,0	0,5
6	10,3	10,8	0,5
7	12,0	12,6	0,6
8	14,0	14,7	0,7
9	16,5	17,2	0,7
10	9,1	9,9	0,8
11	10,6	11,4	0,9
12	12,2	12,6	0,4
13	14,0	14,4	0,4
14	15,4	15,9	0,4
15	9,8	10,3	0,5
16	11,1	11,6	0,5
17	12,5	13,0	0,6
18	14,1	14,7	0,6
19	15,7	16,3	0,7
20	10,8	11,5	0,7
21	11,9	12,6	0,7
22	13,2	14,0	0,8
23	14,6	15,4	0,8
24	16,1	17,1	0,9
25	8,2	8,7	0,5
26	10,1	10,7	0,6
27	12,5	13,2	0,7
28	15,6	16,4	0,8
29	8,6	9,0	0,4
30	10,3	10,8	0,5
31	12,0	12,6	0,6
32	13,9	14,6	0,7
33	16,3	17,0	0,7
34	9,1	9,9	0,8
35	10,6	11,5	0,9
36	12,2	12,7	0,5
37	14,0	14,5	0,5
38	15,4	16,0	0,6
39	9,8	10,5	0,6
40	11,0	11,7	0,7
41	12,5	13,3	0,8
42	14,1	15,0	0,9
43	15,7	16,6	1,0

44	10,8	11,9	1,1
45	11,9	13,0	1,2
46	13,2	14,5	1,3
47	14,6	16,0	1,4
48	16,2	17,7	1,6

Tabla 14. Resumen de resultados obtenidos de caudales y configuración de válvula reductora de presión.

N° Simulación	Promedio de caudales del total de aspersores (l/min)	Promedio de 3 menores caudales (l/min)	CU	Configuración Válvula (m)
1	1,5	1,5	99,3	9,0
2	1,7	1,7	99,3	10,9
3	1,9	1,9	99,3	13,4
4	2,1	2,1	99,3	16,6
5	2,3	2,3	99,3	9,2
6	2,5	2,5	99,3	11,0
7	2,8	2,8	99,2	12,9
8	3,0	3,0	99,4	15,0
9	3,3	3,3	99,4	17,5
10	3,6	3,5	98,7	10,3
11	3,9	3,8	98,6	12,0
12	4,1	4,1	99,4	12,9
13	4,4	4,4	99,5	14,8
14	4,7	4,7	99,5	16,3
15	5,1	5,0	99,2	10,8
16	5,4	5,4	99,2	12,1
17	5,7	5,7	99,3	13,7
18	6,1	6,1	99,2	15,4
19	6,5	6,4	99,3	17,2
20	6,9	6,8	98,9	12,4
21	7,3	7,2	98,9	13,7
22	7,6	7,6	98,9	15,2
23	8,0	8,0	98,9	16,7
24	8,5	8,4	99,0	18,5
25	1,5	1,5	99,2	8,8
26	1,7	1,7	99,2	10,8
27	1,9	1,9	99,2	13,4
28	2,1	2,1	99,2	16,6
29	2,3	2,3	99,2	9,0
30	2,6	2,5	99,0	11,0
31	2,8	2,8	99,2	12,8
32	3,0	3,0	99,0	14,8
33	3,3	3,3	99,2	17,3

34	3,6	3,5	98,3	10,2
35	3,9	3,8	98,3	11,9
36	4,1	4,1	99,4	12,8
37	4,4	4,4	99,4	14,7
38	4,7	4,7	99,2	16,2
39	5,1	5,0	98,7	10,7
40	5,4	5,4	98,9	12,0
41	5,8	5,7	98,7	13,6
42	6,1	6,1	98,8	15,3
43	6,5	6,4	98,9	17,0
44	6,9	6,8	98,2	12,3
45	7,3	7,2	98,1	13,5
46	7,7	7,6	98,0	15,1
47	8,1	8,0	98,1	16,6
48	8,5	8,4	98,1	18,4

Tabla 15. Resumen de resultados obtenidos de costos de implementación de malla de riego.

N° Simulación	Costo de implementación
1	$ 106.647.059
2	$ 100.492.000
3	$ 95.421.053
4	$ 90.132.000
5	$ 64.491.000
6	$ 61.383.000
7	$ 59.052.000
8	$ 56.656.250
9	$ 54.390.000
10	$ 52.059.000
11	$ 49.728.000
12	$ 32.116.000
13	$ 31.080.000
14	$ 30.044.000
15	$ 29.008.000
16	$ 27.972.000
17	$ 27.454.000
18	$ 26.418.000
19	$ 25.900.000
20	$ 24.864.000
21	$ 24.346.000
22	$ 23.828.000
23	$ 22.792.000
24	$ 22.274.000
25	$ 107.744.000
26	$ 101.787.000
27	$ 96.607.000

28	$	91.686.000
29	$	62.160.000
30	$	59.052.000
31	$	56.462.000
32	$	54.390.000
33	$	51.800.000
34	$	49.987.000
35	$	47.397.000
36	$	27.972.000
37	$	26.936.000
38	$	26.159.000
39	$	25.382.000
40	$	24.605.000
41	$	23.828.000
42	$	23.051.000
43	$	22.274.000
44	$	21.756.000
45	$	20.979.000
46	$	20.720.000
47	$	19.943.000
48	$	19.425.000

3.5.4 Análisis económico

3.5.4.1 Definición de optimización

En este trabajo de título se define como optimización de la malla de riego a la maximización de la utilidad del proceso considerando el área regada, el costo de implementación de malla de riego, el costo energético del sistema de impulsión, tomando en cuenta un alto valor de coeficiente de uniformidad que permita que el riego sea homogéneo a lo largo de toda la pila.

3.5.4.2 Definición de supuestos

Para realizar el análisis económico de todas las configuraciones de malla de riego que se implementaron en las 48 simulaciones, fue necesario considerar una serie de supuesto, los cuales se muestran en Tabla 16:

Tabla 16. Supuestos realizados y valores definidos para el costo energético por hora, recuperación de cobre, precio del cobre y valor del dólar.

Días de trabajo	150
horas trabajadas por día	18
Valor kWh Rancagua aéreo (CLP$)	86,938
Recuperación de cobre Kg/m3 a 25 ºC (Zabala, M. 2013)	8,73
Cu US/lb	4,265
Dólar	770,33

Luego, en base al costo energético obtenido desde el software EPANET, se calculó el costo que presenta cada una de las simulaciones durante un periodo de 150 días, que corresponde a un ciclo de riego de la pila de lixiviación. Con estos valores determinados, se transformó el valor de costo de implementación a dólares, a fin de tener una unidad en común. Finalmente, se calculó la recuperación de cobre tomando en consideración que de 1 m^3 de solución lixiviante, se recuperan 8,73 kg de cobre, lo cual corresponde aproximadamente a un 80% de recuperación, además fijando el precio del cobre a 4,265 US/lb se obtuvieron los siguientes valores, como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Valores de costos y utilidad de proceso de lixiviación estudiado.

Costo energético por ciclo de riego $US	Costo de implementación $US	Utilidad MM$US
237.041	138.443	821
252.722	130.453	875
267.067	123.870	925
266.511	117.004	969
231.263	83.719	764
268.043	79.684	974
242.469	76.658	839
250.116	73.548	866
263.855	70.606	914
260.147	67.580	946
205.453	64.554	649
204.742	41.691	677
212.543	40.346	702
219.872	39.001	727
226.679	37.657	749
232.913	36.312	770
243.110	35.639	803
237.041	34.294	821
246.265	33.622	853
250.116	32.277	866
258.700	31.605	896
267.067	30.932	925
269.078	29.587	932
263.448	28.915	958
241.689	139.867	837
255.978	132.134	886
270.696	125.410	937
257.551	119.022	986
222.905	80.693	737
232.407	76.658	768
242.874	73.296	803
243.169	70.606	842

251.290	67.244	870
262.283	64.890	908
268.191	61.528	929
186.429	36.312	589
192.577	34.967	609
200.142	33.958	633
207.359	32.950	655
204.877	31.941	677
211.001	30.932	697
216.679	29.924	716
211.787	28.915	733
229.273	28.242	758
233.538	27.234	772
243.291	26.898	804
235.443	25.889	815
241.239	25.216	835

4 Capitulo IV: Análisis de resultados

A continuación, se procederán a analizar los datos calculados de forma teórica, junto con los obtenidos mediante las simulaciones. Para lo anterior, se analizarán los parámetros mencionados en la metodología, los cuales son:

- Uniformidad de riego
- Área regada
- Costo de implementación de malla de riego
- Costo energético del sistema de impulsión

En Tabla 17 se presentan los valores de los parámetros anteriormente mencionados para las 48 simulaciones.

Tabla 18. Resumen de los valores obtenidos para las simulaciones de número de aspersores, área total regada, coeficiente de uniformidad y utilidad.

N° Simulación	Geometría	Radio (m)	Nº Aspersores	Área regada (m^2)	CU	Utilidad MM$US
1	Cuadrada	1,7	412	3738	99,3	821
2	Cuadrada	1,8	388	3949	99,3	875
3	Cuadrada	1,9	368	4178	99,3	925
4	Cuadrada	2,0	348	4373	99,3	969
5	Cuadrada	2,1	249	3450	99,3	764
6	Cuadrada	2,2	237	3604	99,3	974
7	Cuadrada	2,3	228	3789	99,2	839
8	Cuadrada	2,4	219	3958	99,4	866
9	Cuadrada	2,5	210	4123	99,4	914
10	Cuadrada	2,6	201	4269	98,7	946
11	Cuadrada	2,7	192	4397	98,6	649
12	Cuadrada	2,8	124	3054	99,4	677
13	Cuadrada	2,9	120	3170	99,5	702
14	Cuadrada	3,0	116	3280	99,5	727
15	Cuadrada	3,1	112	3381	99,2	749
16	Cuadrada	3,2	108	3474	99,2	770
17	Cuadrada	3,3	106	3626	99,3	803
18	Cuadrada	3,4	102	3704	99,2	821
19	Cuadrada	3,5	100	3848	99,3	853
20	Cuadrada	3,6	96	3909	98,9	866
21	Cuadrada	3,7	94	4043	98,9	896

22	Cuadrada	3,8	92	4174	98,9	925
23	Cuadrada	3,9	88	4205	98,9	932
24	Cuadrada	4,0	86	4323	99,0	958
25	Triangular	1,7	416	3777	99,2	837
26	Triangular	1,8	393	4000	99,2	886
27	Triangular	1,9	373	4230	99,2	937
28	Triangular	2,0	354	4448	99,2	986
29	Triangular	2,1	240	3325	99,2	737
30	Triangular	2,2	228	3467	99,0	768
31	Triangular	2,3	218	3623	99,2	803
32	Triangular	2,4	210	3800	99,0	842
33	Triangular	2,5	200	3927	99,2	870
34	Triangular	2,6	193	4099	98,3	908
35	Triangular	2,7	183	4191	98,3	929
36	Triangular	2,8	108	2660	99,4	589
37	Triangular	2,9	104	2748	99,4	609
38	Triangular	3,0	101	2856	99,2	633
39	Triangular	3,1	98	2959	98,7	655
40	Triangular	3,2	95	3056	98,9	677
41	Triangular	3,3	92	3147	98,7	697
42	Triangular	3,4	89	3232	98,8	716
43	Triangular	3,5	86	3310	98,9	733
44	Triangular	3,6	84	3420	98,2	758
45	Triangular	3,7	81	3484	98,1	772
46	Triangular	3,8	80	3629	98,0	804
47	Triangular	3,9	77	3679	98,1	815
48	Triangular	4,0	75	3770	98,1	835

4.1 Uniformidad de riego

A partir de la Tabla 19, se puede observar que el coeficiente de uniformidad más alto corresponde al sistema de riego de la simulación 14 con un valor de 99,5%. Dicho valor tiene asociada una diferencia de presión de 0,4 mcf, además, el menor coeficiente de uniformidad corresponde al sistema de riego de la simulación 46 con 98.0% y una diferencia de presión de 1,3 mcf, lo cual muestra que, a menor diferencia de presión, el caudal que cada aspersor emitirá será más homogéneo, como se puede apreciar en el Figura 27.

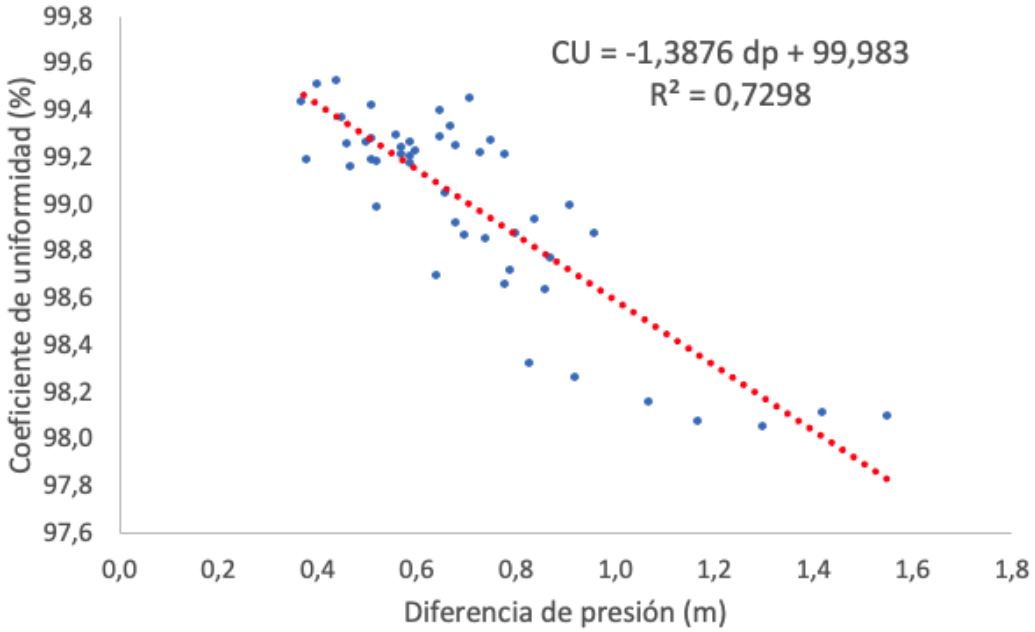


Figura 27. Gráfico de coeficiente de uniformidad Vs diferencia de presión.

Tabla 19. Resumen donde se presenta el coeficiente de uniformidad y diferencia de presión a lo largo de la malla de riego, asociado a una geometría de distribución de emisores.

N° Simulación	Geometría	Diferencia presión (mcf)	CU
14	Cuadrada	0,4	99,5
13	Cuadrada	0,4	99,5
9	Cuadrada	0,7	99,4
12	Cuadrada	0,4	99,4
37	Triangular	0,5	99,4
8	Cuadrada	0,7	99,4
36	Triangular	0,5	99,4
3	Cuadrada	0,7	99,3
17	Cuadrada	0,6	99,3

19	Cuadrada	0,7	99,3
6	Cuadrada	0,5	99,3
4	Cuadrada	0,8	99,3
1	Cuadrada	0,5	99,3
2	Cuadrada	0,6	99,3
5	Cuadrada	0,5	99,3
27	Triangular	0,7	99,2
38	Triangular	0,6	99,2
26	Triangular	0,6	99,2
33	Triangular	0,7	99,2
28	Triangular	0,8	99,2
7	Cuadrada	0,6	99,2
18	Cuadrada	0,6	99,2
29	Triangular	0,4	99,2
16	Cuadrada	0,5	99,2
25	Triangular	0,5	99,2
31	Triangular	0,6	99,2
15	Cuadrada	0,5	99,2
32	Triangular	0,7	99,0
24	Cuadrada	0,9	99,0
30	Triangular	0,5	99,0
23	Cuadrada	0,8	98,9
20	Cuadrada	0,7	98,9
22	Cuadrada	0,8	98,9
43	Triangular	1,0	98,9
40	Triangular	0,7	98,9
21	Cuadrada	0,7	98,9
42	Triangular	0,9	98,8
41	Triangular	0,8	98,7
39	Triangular	0,6	98,7
10	Cuadrada	0,8	98,7
11	Cuadrada	0,9	98,6
34	Triangular	0,8	98,3
35	Triangular	0,9	98,3
44	Triangular	1,1	98,2
47	Triangular	1,4	98,1
48	Triangular	1,6	98,1
45	Triangular	1,2	98,1
46	Triangular	1,3	98,0

Luego, al trazar una línea de tendencia que mejor represente a los valores, se obtiene la siguiente ecuación:

$$CU = -1{,}3876\Delta P + 99{,}983 \quad (68)$$

Entonces, a partir de la Ecuación (68) fue posible encontrar un modelo que permite calcular un posible valor de coeficiente de uniformidad dependiendo de la diferencia de presión (mcf).

Ahora bien, en relación con la geometría de distribución de emisores, el mayor valor de CU lo obtuvo una geometría cuadrada y como se muestra en la Tabla 18, es esta geometría que presenta una mayor cantidad de simulaciones con coeficiente de uniformidad mayores, lo cual indica que dicha geometría permite una distribución de caudales de una mejor manera. Sin embargo, es importante mencionar que a pesar de que la geometría cuadrada presenta los mejores resultados de uniformidad de riego, la geometría triangular no posee valores considerablemente bajos, por lo que, la implementación de este tipo de geometría también se recomienda utilizar.

Por otra parte, a partir de todas las simulaciones realizadas, se puede observar que las diferencias de presiones no sobrepasan los 1,3 m, lo cual indica un límite superior de probables presiones a obtener en un sistema de riego con la implementación de una válvula reguladora de presión a la entrada de cada tubería secundaria.

4.2 Área regada

A partir de la Tabla 20, es posible observar que, para un mismo radio de circunferencia de riego, pero con diferentes geometrías, el área de riego cambia, donde la tendencia es que para geometrías triangulares el área total regada es mayor en radios menores. Esto se debe a que al formar un triangulo equilátero uniendo los centros de tres emisores, estos quedan más cerca (véase Figura 28), permitiendo alcanzar zonas que con la geometría cuadrada no. No obstante, para radios de alcance mayores, el área total regada es menor para esta geometría, ya que, existe una menor cantidad de aspersores debido la forma de distribución que poseen los emisores como se muestra en la Figura 29.

Tabla 20. Resumen del área regada en función del radio de acción de los aspersores.

Geometría	Radio (m)	Área regada (m^2)	Geometría	Radio (m)	Área regada (m^2)
Cuadrada	1,7	3738	Triangular	1,7	3777
Cuadrada	1,8	3949	Triangular	1,8	4000
Cuadrada	1,9	4178	Triangular	1,9	4230
Cuadrada	2,0	4373	Triangular	2,0	4448
Cuadrada	2,1	3450	Triangular	2,1	3325
Cuadrada	2,2	3604	Triangular	2,2	3467

Cuadrada	2,3	3789	Triangular	2,3	3623
Cuadrada	2,4	3958	Triangular	2,4	3800
Cuadrada	2,5	4123	Triangular	2,5	3927
Cuadrada	2,6	4269	Triangular	2,6	4099
Cuadrada	2,7	4397	Triangular	2,7	4191
Cuadrada	2,8	3054	Triangular	2,8	2660
Cuadrada	2,9	3170	Triangular	2,9	2748
Cuadrada	3,0	3280	Triangular	3,0	2856
Cuadrada	3,1	3381	Triangular	3,1	2959
Cuadrada	3,2	3474	Triangular	3,2	3056
Cuadrada	3,3	3626	Triangular	3,3	3147
Cuadrada	3,4	3704	Triangular	3,4	3232
Cuadrada	3,5	3848	Triangular	3,5	3310
Cuadrada	3,6	3909	Triangular	3,6	3420
Cuadrada	3,7	4043	Triangular	3,7	3484
Cuadrada	3,8	4174	Triangular	3,8	3629
Cuadrada	3,9	4205	Triangular	3,9	3679
Cuadrada	4,0	4323	Triangular	4,0	3770

Es importante mencionar que, a medida que los radios de la circunferencia de riego disminuyan, el área regada será mayor, ya que, el espacio que queda entre emisores cada vez será menor (véase Figura 28).

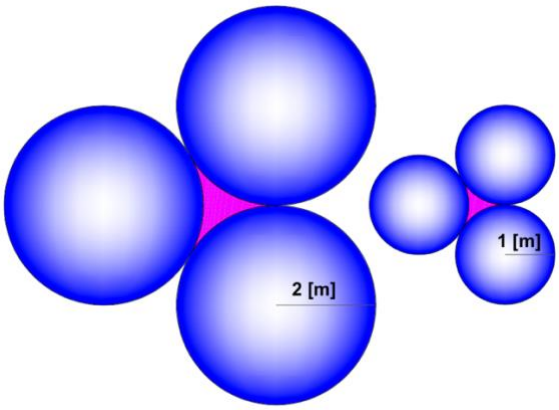


Figura 28. Esquema donde se muestra en color magenta el área no regada en función del radio de las circunferencias de riego.

Por otra parte, para la geometría triangular los aspersores quedan dispuestos de forma intercalada, donde en un lateral existe n+1 aspersores y en lateral sucesivo n emisores, como se puede apreciar en la Figura 29.

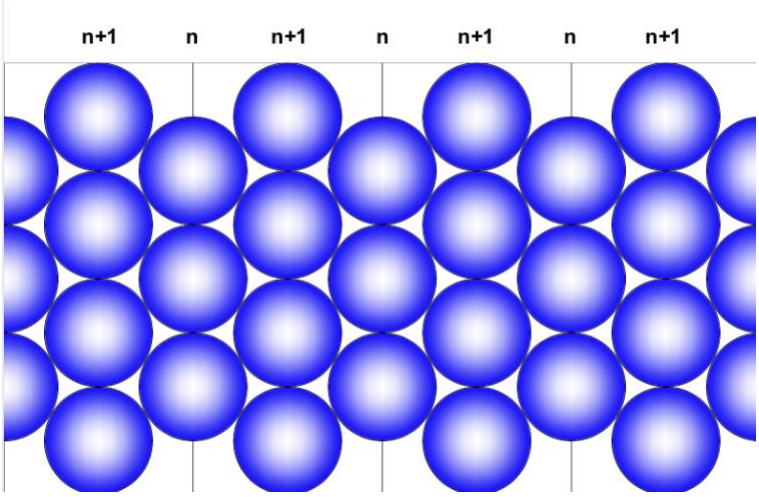


Figura 29. Esquema de formación intercalada de emisores por unidad de lateral.

Por otro lado, a partir de la Figura 30, se pueden observar tramos donde existe un aumento del área regada en función del radio de alcance, de lo cual se puede concluir que para rangos determinados de radio es posible encontrar una configuración que permita maximizar el área regada. En particular en este caso de estudio se determinó que existen 3 rangos de radio que presentan un aumento de área total regada, el primero parte en 1,7 m hasta los 2 m, el segundo va desde los 2,1 m hasta los 2,7 y el tercero desde 2,8 m hasta los 4 m.

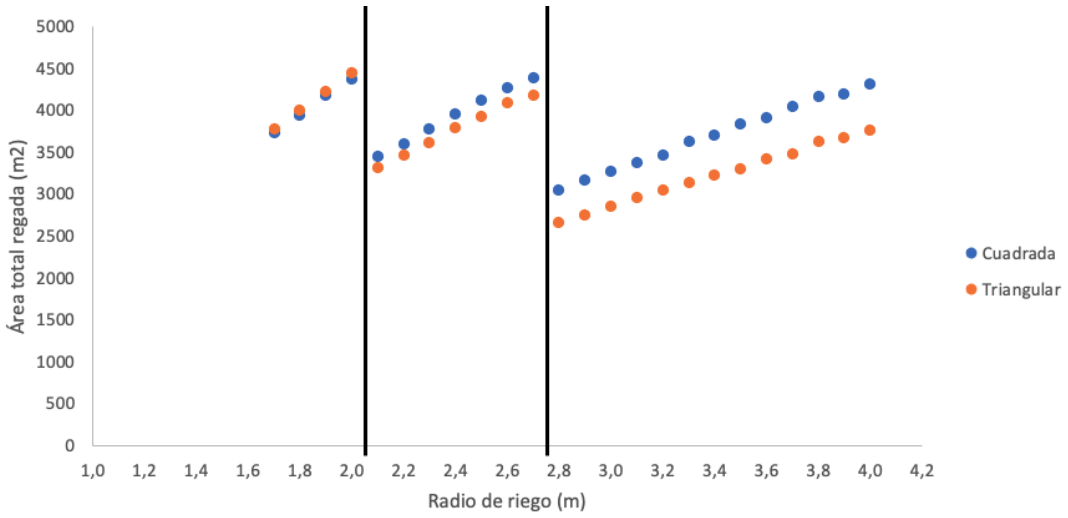


Figura 30. Gráfico de área total regada en función del radio de alcance de riego.

4.3 Costo de implementación de malla de riego

A partir de la Figura 31 se puede observar que los menores costos de implementación están asociados a radios de riego mayores, lo cual se genera debido a que con radios mayores, el área de alcance por aspersor aumenta y por consiguiente la cantidad de estos disminuye, por lo que, es posible encontrar una configuración de malla de riego que permita regar una mayor cantidad de área con una cantidad reducida de aspersores, lo cual permite una disminución del costo de inversión que se tendría que hacer para implementar la malla de riego.

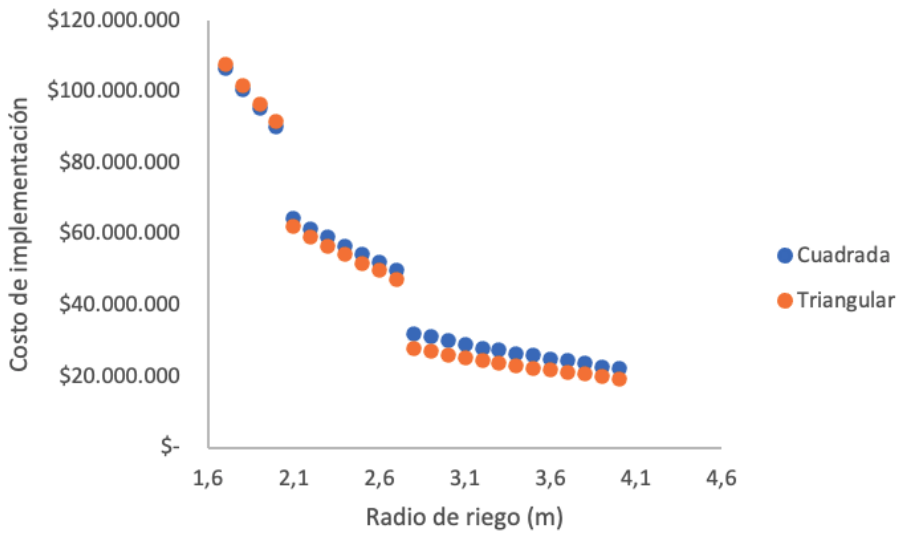


Figura 31. Gráfico de costo de implementación de malla de riego en función del radio de riego.

4.4 Análisis económico

Una vez aplicado el análisis económico a las 48 simulaciones, se obtuvo que la malla de riego que posee la configuración óptima es la implementada en la simulación 28. Sus valores se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Resumen de los valores obtenidos para la simulación 28.

N° Simulación	28
Geometría	Triangular
Radio (m)	2
Nº Aspersores	354
Área regada (m^2)	4448
Menor presión (mcf)	15,6
Mayor presión (mcf)	16,4
Diferencia presión (mcf)	0,8

Promedio de caudales (l/min)	2,11
Promedio 3 menores caudales (l/min)	2,09
CU	99,2
Configuración Válvula (mcf)	16,6
Costo de implementación $US	119.022
Costo energético por ciclo de riego $US	257.551
Utilidad MM$US	986

5 Capitulo V: Conclusiones

Luego de finalizar con todo el desarrollo de este trabajo de título, es posible concluir que para realizar una optimización de malla de riego es necesario analizar 4 aspectos relevantes, los cuales son el área regada, coeficiente de uniformidad, el costo de implementación del sistema de riego y el costo energético del sistema de impulsión.

Al hacer estas 4 comparaciones por medio del análisis económico, es posible determinar de manera eficaz la optimización de la malla de riego, debido a que, no tan solo se hace un estudio hidráulico, sino que también se considera la cantidad de área regada, lo que para el proceso de lixiviación significa que se obtendrá una mayor recuperación sin necesidad incurrir en costos innecesarios por un mal dimensionamiento en términos de área unitaria de riego, ya que, si se generan intersecciones entre áreas de riego, es probable que se generen aposamientos y consumo extra de ácido. Es por esta razón que para realizar la optimización de la malla de riego se deben tener presentes los aspectos anteriormente nombrados.

A partir de los resultados obtenidos de diferencias de presión en todo el submódulo y los coeficientes de uniformidad, fue posible estudiar la relación que existe entre estos dos parámetros, de donde se tiene una relación inversamente proporcional, debido a que, para diferencias de presiones menores, el coeficiente de uniformidad será mayor, ya que existen menores diferencias entre los caudales emitidos por los aspersores. Además, fue posible generar un modelo que permite estimar el CU en función de la diferencia de presión existente entre los aspersores del submódulo de trabajo.

Un factor importante por considerar es que mientras menores sean los radios de circunferencia de riego, mayor área será regada. Esto se debe a que al tener menores radios de riego mayor cantidad de emisores se tendrán y de acuerdo con lo mostrado en la Figura 28, el área existente entre circunferencias de riego se hace menor, por lo que, se puede concluir que para una malla de riego de lixiviación es necesario utilizar radios que permitan regar la mayor cantidad de área y que la inversión inicial por términos de costos por emisor, no sea excesivo.

Luego de realizar el análisis de los resultados obtenidos mediante las 48 simulaciones realizadas, es posible concluir que la geometría de distribución de aspersores que entrega un mejor riego de pila es la cuadrada. Dicha geometría permite distribuir los caudales de forma óptima, permitiendo una mayor área regada y el uso de una menor cantidad de emisores.

En términos de las simulaciones, según el análisis económico realizado la configuración de sistema de riego que presentó mejores resultados fue la simulación 28, por lo que, se definió como la malla óptima. Los resultados obtenidos se presentan en Tabla 21.

6 Capitulo VI: Recomendaciones

Es importante hacer mención que el modelo desarrollado de estimación de CU en función de la diferencia presión fue realizado solo con 48 simulaciones y con parámetros específicos, por lo que, para un desarrollo más exacto se recomienda la realización de una mayor cantidad de simulaciones.

7 Referencias

Aburto, A. (2016). MODELO TÉCNICO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS DE COSTOS PARA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES EN PILAS DE LIXIVIACIÓN (PILA DINÁMICA V/S PILA PERMANENTE). Universidad técnica Federico Santa María.

Ahumada, D. (2019). PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACIÓN EN MINERALES OXIDADOS CON ALTO PORCENTAJE DE ARCILLAS. Universidad técnica Federico Santa María. Arcos, C. (2019). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA LIXIVIACIÓN DE SULFUROS DE COBRE DE BAJA LEY EN UN MEDIO SULFATO-CLORURO PRETRATADOS QUÍMICAMENTE CON NaCl—NaNO3—H2SO4. Universidad técnica Federico Santa María.

Beckel, J. (2000). El proceso hidrometalúrgico de lixiviación en pilas y el desarrollo de la minería cuprífera en Chile. Naciones Unidas, CEPAL, Red de Reestructaración y Competitividad, Div. de Desarrollo Productivo y Empresarial.

Carvajal, C. (2012). CARACTERIZACIÓN DE UN MINERAL OXIDADO – SECTOR VETA BLANCA. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

COCHILCO. (2017). Sulfuros primarios: Desafíos y oportunidades.

CODELCO, E. (2019a). Electroobtencion.

CODELCO, E. (2019b). Lixiviación "El riego".

Díaz, J. D. J., & Bañol, H. A. C. (2015). NÚMERO DE REYNOLDS. CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS.

Domic, E. (2001). Hidrometalurgía.

Guiachetti, D. (2011). CONSUMO DE ÁCIDO SULFÚRICO Y CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL OXIDADO DE COBRE. UNIVERSIDAD DE CHILE. Hernández, P. A. A. (2006). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE ELECTRO OBTENCIÓN DE COBRE CON CÁTODO PARTICULADO MÓVIL BASADA EN ELECTRO DIÁLISIS REACTIVA. UNIVERSIDAD DE CHILE.

Ipinza. Hidrometalurgía 1. Universidad Arturo Prat; Jara, J., Valenzuela, A., & Crisóstomo, C. (s. f.). Hidráulica de tuberías.

López, E. (2012). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DE MATERIALES DEPOSITADOS EN PILAS DE LIXIVIACIÓN. UNIVERSIDAD DE CHILE. Miranda, N. (2012). FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA AGLOMERACIÓN Y POSTERIOR LIXIVIACIÓN DE MINERALES OXIDADOS, SULFURADOS Y MEZCLAS CON CLORURO DE SODIO Y SULFATO FÉRRICO. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Morales, F. (2016) EVALUACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO PLAN DE RIEGO DE LOS SECTORES DE LIXVIACION EN LA OPERACIÓN MANTOVERDE – ANGLO AMERICAN. Universidad de chile.

Muñoz, S. (s. f.). Conceptos de lixiviación de minerales.

Navarro, P., Espinoza, D., & Vargas, C. (2018). Caracterización de Diluyentes Usados en Extracción por Solventes. KnE Engineering, 3(1), 344.

Quispe, E. (2018). OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO EN EL PAD DE LIXIVIACIÓN DE LA UNIDAD CUAJONE – SOUTHERN PERÚ. Universidad nacional Jorge Basadre Grohmann.

Retamal, N. (2008). DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO UTILIZADOS EN LIXIVIACIÓN DE MINERALES. UNIVERSIDAD DE CHILE.

Rodríguez, M. (2015). OPTIMIZACIÓN Y MEJORA EN LA ETAPA DE CHANCADO/AGLOMERADO/LIXVIACIÓN EN MINERA ANITA LTDA. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Saldarriaga Valderrama, J. G. (2002). Hidráulica de tuberías. McGraw-Hill.

Schulz, E. (2003). Introducción a la metalurgía.

Zabala, M. (2013). COMPORTAMIENTO DE LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN UNA PILA DE LIXIVIACIÓN A CONDICIONES AMBIENTALES EXTREMAS. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

8 Anexo

8.1 Imágenes de interfaz de software

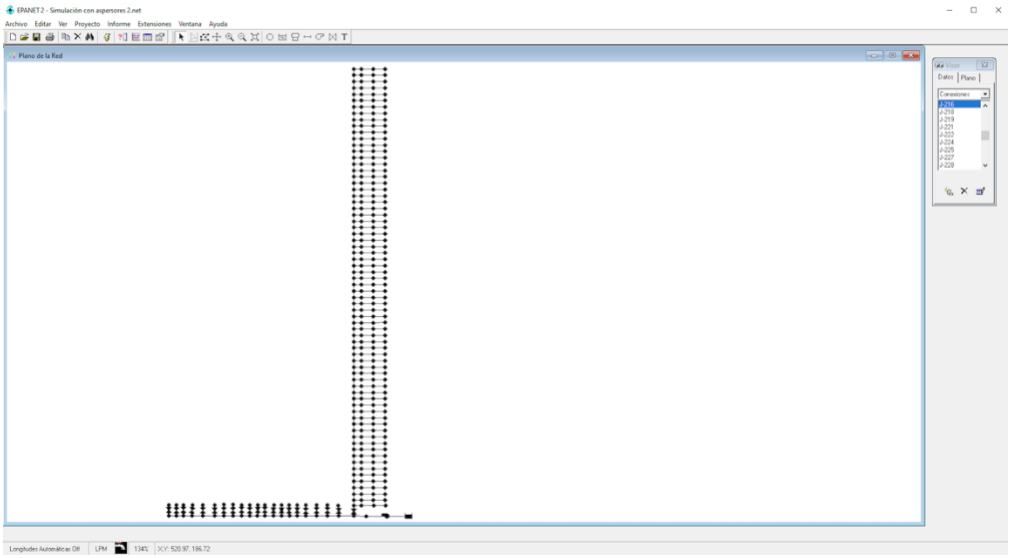


Figura 32. Interfaz de trabajo del software EPANET, donde se puede apreciar el modelo esqueletizado de la pila de lixiviación.

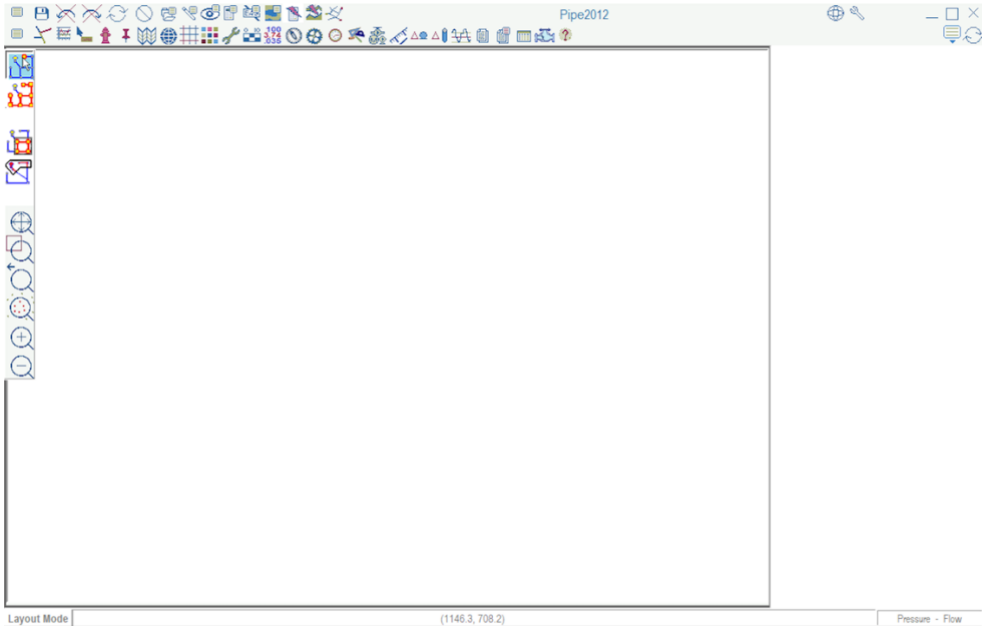


Figura 33. Interfaz de trabajo del software Kypipe.

8.2 Esquemas representativos

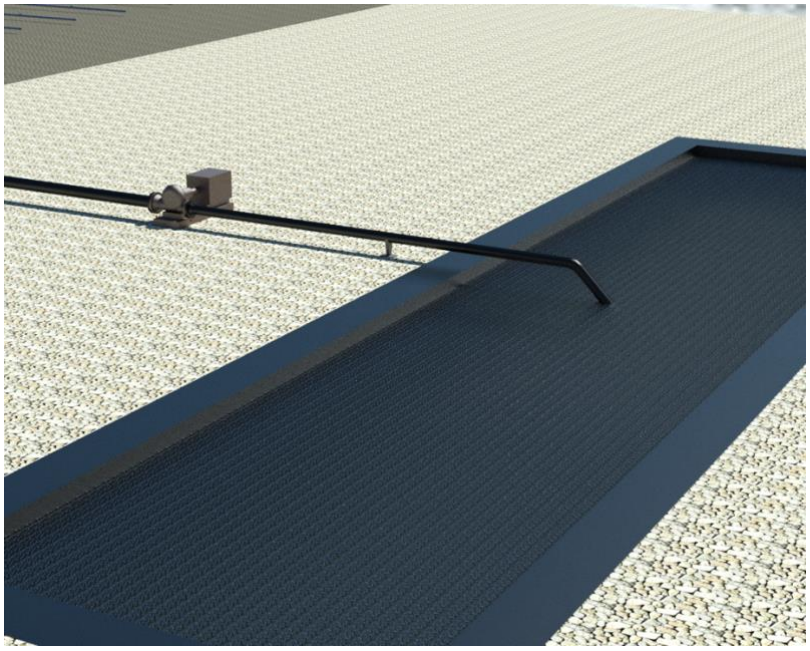


Figura 34. Esquema representativo de una posible disposición del sistema de impulsión en la entrada de piscina de ILS.

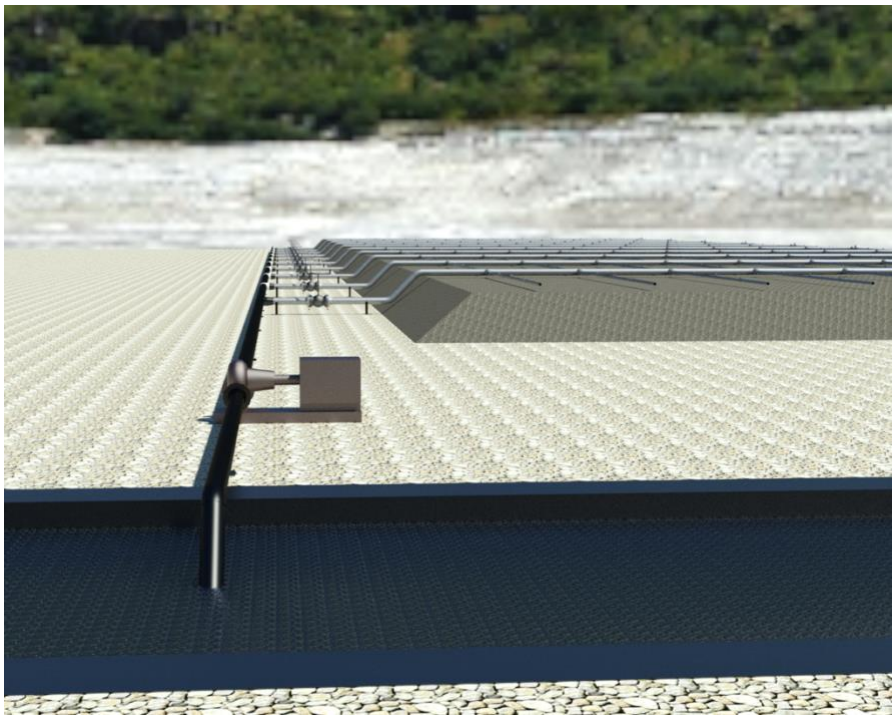


Figura 35. Esquema representativo de disposición de tuberías y pila de lixiviación.

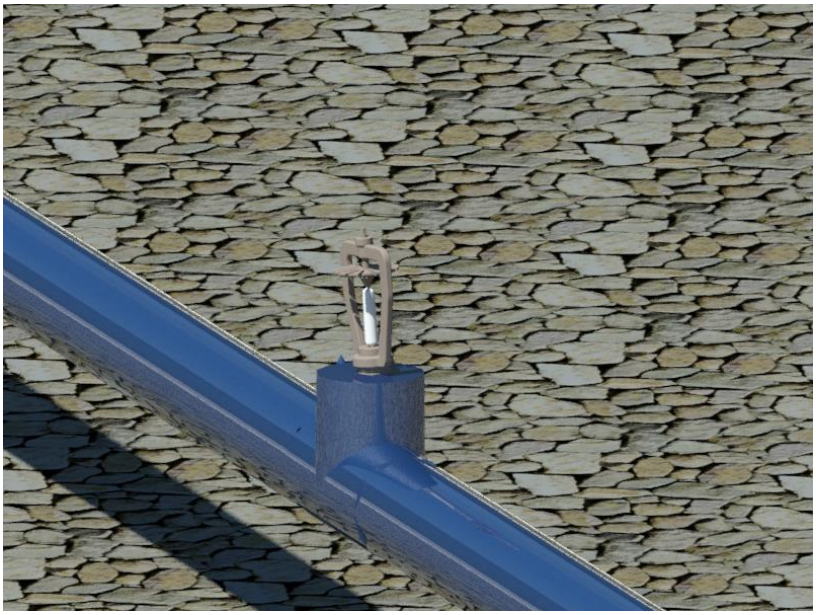


Figura 36. Esquema representativo de la disposición de aspersores en la pila.