

Cuantificación de evaporación en Embalse Colihues con oportunidad de mejora en la extracción de relaves.

Cristóbal Figari Reyes crfigari@alumnos.uai.cl

Doble titulación – Ingeniería Civil Industrial e Ingeniería Civil en Minería

Empresa

Minera Valle Central

Área de Planificación

Embalse Colihues, Rancagua

Septiembre, 2023

Índice

1. Resumen.....	4
2. Introducción.....	6
2.1. Contexto empresa	6
2.2. Descripción del problema	6
2.3. Oportunidad identificada	8
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general:	9
3.2 Objetivos Específicos:	9
4. Estado del arte	10
4.1. Evaporación	10
4.2. Objetivos del Cálculo de la Evaporación	10
4.3. Métodos de cálculo de evaporación	11
5. Alternativas y solución propuesta.....	12
5.1 Matriz de Riesgos	15
6. Evaluación Económica.....	17
7. Metodologías	18
7.1. Objetivo específico 1:	18
7.2. Objetivo específico 2:	18
7.3. Objetivo específico 3:	19
7.4. Objetivo específico 4:	19
7.5. Objetivo específico 5:	19
8. Medidas de Desempeño	20
8.1 Objetivo específico 1:	20
8.2 Objetivo específico 2:	20
8.3 Objetivo específico 3:	20
8.4 Objetivo específico 4:	21
8.5 Objetivo específico 5:	22
9. Desarrollo de proyecto basado en la metodología.....	23
9.1. Análisis situación actual	23

9.2. Cálculo de evaporación sufrida por el Embalse Colihues.	25
9.3. Variables Críticas	26
9.4. Disminución en tiempo de medición.....	31
9.5. Oportunidad de procesamiento de Relaves.....	33
9.6. Concentrado de Cobre	36
9.7. Valorización Concentrado Cu	38
10. Resultados.....	40
10.1 Objetivo Específico 1:	40
10.2 Objetivo Específico 2:	41
10.3 Objetivo Específico 3:	42
10.4 Objetivo Específico 4:	43
10.5 Objetivo Específico 5:	44
11. Conclusiones	47
12. Recomendaciones	48
13. Referencias.....	49

1. Resumen

El presente informe describe el desarrollo del proyecto de titulación para optar al título de Ingeniero Civil Industrial e Ingeniero Civil en Minería, para la Universidad Adolfo Ibáñez, realizado en Minera Valle Central, la cual procesa los relaves frescos y antiguos provenientes de Codelco, División El Teniente. El área específica en donde se comenzó a realizar el proyecto de título corresponde al área de planificación.

El método de explotación de los relaves antiguos de División El Teniente, que se encuentran depositados en el Tranque Cauquenes, es a través del monitoreo hidráulico. Este proceso consume agua proveniente del Embalse Colihues, el cual sufre evaporación por causas climáticas a las cuales está sujeto el cuerpo de agua. Se destaca la importancia de monitorear la evaporación del embalse, especialmente en tiempos de altas temperaturas, para gestionar adecuadamente el recurso hídrico. La obtención intermitente de datos de evaporación a través de mediciones diarias en terreno presenta desafíos logísticos.

A partir de este problema, el proyecto se basó en la implementación de un método de cuantificación de evaporación a través del método de Penman-Monteith, asociando esta pérdida de agua a la oportunidad de procesamiento de relaves y la obtención de concentrado de cobre. Esta cuantificación considera variables de Radiación Solar, Temperatura Media, Mínima y Máxima, Humedad Relativa y Velocidad de Viento, en donde se determinaron que variables son críticas para este fenómeno y se recomendaron tecnologías para su mitigación.

Posterior al diseño e implementación del método, se obtuvo un 95,25% de los datos disponibles de la estación meteorológica y se logró reducir el tiempo medición en un 81,26%, al igual que los costos asociados a esta medición. Además, se logró determinar que las variables más influyentes en el fenómeno de la evaporación son la Radiación Solar y el Viento. Por último, se obtuvo que, en meses de verano, la oportunidad de procesamiento de relaves alcanzó un equivalente a un 38,4% de la producción diaria, mientras que en meses de invierno a un 3,9%.

Abstract

The present report describes the development of the graduation project to obtain the title of Industrial Civil Engineer and Mining Civil Engineer at Adolfo Ibáñez University, carried out at Minera Valle Central, which processes fresh and old tailings from Codelco, El Teniente Division. The specific area where the graduation project was initiated corresponds to the planning area.

The method of exploiting the old tailings from El Teniente Division, deposited in the Cauquenes Tailings Dam, is through hydraulic monitoring. This process consumes water from the Colihues Reservoir, which undergoes evaporation due to climatic conditions affecting the body of water. The importance of monitoring reservoir evaporation, especially during periods of high temperatures, is emphasized for proper water resource management. The intermittent collection of evaporation data through daily field measurements presents logistical challenges.

Based on this problem, the project focused on implementing a method for quantifying evaporation using the Penman-Monteith method, associating this water loss with the opportunity for tailings processing and copper concentrate production. This quantification considers variables such as Solar Radiation, Average, Minimum, and Maximum Temperature, Relative Humidity, and Wind Speed, determining which variables are critical for this phenomenon and recommending technologies for mitigation.

Following the design and implementation of the method, a reduction in measurement time by 81.26% and associated costs was achieved. Additionally, it was determined that the most influential variables in the evaporation phenomenon are Solar Radiation and Wind. Lastly, it was found that during summer months, the opportunity for tailings processing reached an equivalent of 38.4% of daily production, while in winter months, it was 3.9%.

2. Introducción

El siguiente informe sistematiza el proyecto realizado en Minera Valle Central, a partir del 01 de agosto del 2023, período en el cual se comenzó a desempeñar las actividades correspondientes al trabajo de pasantía, específicamente en el área de Planificación. Para comenzar, resulta relevante conocer el contexto en el cual se realizaron las labores descritas.

2.1. Contexto empresa

Minera Valle Central, es una empresa que pertenece la compañía canadiense Amerigo Resources Ltd., MVC forma parte de la mediana minería, la cual fue creada con el objetivo de tratar los relaves frescos y antiguos de Codelco, División el Teniente, específicamente el tranque de relaves Cauquenes y Colihues, recuperando cobre y molibdeno.

Inaugurada en 1992, se dedica a procesar los relaves frescos provenientes de Codelco, División el Teniente, y relaves antiguos provenientes del tranque Cauquenes. Su método de explotación consiste en explotar el tranque mediante monitoreo hidráulico. Este proceso, permite tener capacidad de producción de 40.000 toneladas de cobre y 2.400.000 libras de molibdeno anuales.

2.2. Descripción del problema

Minera Valle Central explota diariamente desde el tranque Cauquenes 35.000 toneladas de relaves secos y 140.000 toneladas de relaves frescos aproximadamente, dando un total de 175.000 toneladas de relaves procesados diariamente. El proceso de monitoreo hidráulico depende estrictamente del agua proveniente del Embalse Colihues, de donde se extraen 457 l/s de agua industrial a un 100% de capacidad. El problema radica en la gestión desafiante de las cargas de precipitación del Embalse Colihues, dada su creciente escasez e imprevisibilidad. La evaporación elevada durante periodos de altas temperaturas agrava la situación, mientras que la obtención intermitente de datos de evaporación mediante un evaporímetro añade complejidad a la gestión del embalse.



Imagen 1: Embalse Colihues – Tranque Cauquenes

Fuente: Google Earth

En la actualidad, los fenómenos de precipitación son cada vez más escasos, siendo muy impredecibles en intensidad, duración y altura, por ende, cuando el embalse recibe estas cargas se hace imprescindible administrarlas y cuantificarlas de manera precisa para lograr una continuidad operacional correcta, eficiente y sustentable a la vez. En tiempos de temperaturas altas, las cuales son más comunes y están presentes en estaciones en las cuales antes eran anormales, el embalse sufre gran evaporación y obtiene significativamente menos aguas afluentes que lo carguen, esto mientras tanto, se espera un evento de precipitaciones para almacenar agua. A su vez, la obtención de la data de evaporación, es intermitente, dado que la medición debe hacerse en terreno a través de un evaporímetro Tanque Clase A, el cual se encuentra a un costado del embalse y estas mediciones se den hacer diariamente.

Es por esto que se hace de vital importancia contar con herramientas que ayuden a controlar el uso de este recurso, de manera rápida, eficaz y accesible, como también cuantificar las pérdidas de agua, lo cual se traduce en oportunidad de procesamiento de relaves.

2.3. Oportunidad identificada

Como se vio anteriormente, los eventos climáticos son cada vez menos predecibles y la industria minera y MVC está a merced de ellos, entre los que se encuentran las altas temperaturas durante todo el año y precipitaciones menos frecuentes. Es aquí donde las herramientas de gestión y cuantificación del recurso hídrico presente en el Embalse Colihues son cruciales y se ven directamente relacionadas con el proceso productivo.

Es por esto que, en base a la información anterior, la oportunidad radica en el desarrollo de una herramienta efectiva y accesible para controlar y gestionar el uso del recurso hídrico del Embalse Colihues. Esta herramienta podrá mejorar la eficiencia operativa y sustentabilidad de la operación, teniendo en cuenta los desafíos de escasez e imprevisibilidad de las precipitaciones y la evaporación elevada. Además, ofrece oportunidades de optimización del procesamiento de relaves al cuantificar las pérdidas de agua y permitir una planificación más efectiva de su uso, como también un ahorro de tiempo en el monitoreo del fenómeno de la manera actual.

3. Objetivos

De acuerdo con la oportunidad identificada, se propone como objetivo general y específicos lo siguiente:

3.1 Objetivo general:

- Cuantificar la evaporación sufrida por el embalse Colihues, para determinar la oportunidad de procesamiento de relaves asociada, mediante la implementación del método de Penman - Monteith disminuyendo en un 70% el tiempo empleado en la medición en un plazo de 5 meses.

3.2 Objetivos Específicos:

3.2.1 Objetivo específico 1:

- Levantar información sobre los datos entregados por la estación de monitoreo para la construcción del modelo.

3.2.2 Objetivo específico 2:

- Cuantificar la evaporación sufrida por el Embalse Colihues, usando el método de Penman – Monteith, determinando variables críticas mediante regresión lineal.

3.2.3 Objetivo específico 3:

- Cuantificar la disminución de tiempo empleado en el monitoreo de la evaporación en el Embalse Colihues con la implementación del nuevo método versus el anterior.

3.2.4 Objetivo específico 4:

- Evaluar económicamente la pérdida de recurso hídrico asociada a la oportunidad de procesamiento de relaves provenientes del tranque Cauquenes debido a la evaporación.

3.2.5 Objetivo específico 5:

- Entregar planilla de cálculo de evaporación para su implementación en Minera Valle Central.

4. Estado del arte

Considerando la propuesta anterior, resulta relevante conocer como ocurre la evaporación, el objetivo del cálculo y los tipos de métodos de medición existentes.

4.1. Evaporación

La evaporación se define como proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (FAO,1998). Este proceso es fundamental en la gestión de embalses, ya que afecta directamente al almacenaje de agua, por ende, la disponibilidad de recursos hídricos para la industria minera, en este caso en particular, para el monitoreo hidráulico del Tranque Cauquenes y la obtención de concentrado de cobre a partir de este proceso.

Es por esto, que en la actualidad el cálculo de la evaporación en los embalses mineros es parte fundamental para el correcto gestionamiento del agua utilizada para procesos de extracción y producción, como también, para la reducción de costos e impactos al medioambiente

4.2. Objetivos del Cálculo de la Evaporación

Con el avance de la tecnología, los sistemas de medición de evaporación para los distintos cuerpos de aguas existentes se han vuelto automatizada y cada vez más compleja, especialmente a dos industrias que se ven afectados por la evaporación, la cuales son la industria agrícola y minera. En esta última, la gestión de los recursos hídricos, en donde la evaporación de los cuerpos de agua en donde almacenan sus reservas para el proceso, puede tener grandes impactos económicos.

Como señala el informe “FAO Irrigation and Drainage Paper 56”, conocido comúnmente como “FAO 56”, el principal objetivo de calcular la evaporación es asegurar la conservación de los recursos hídricos. Esto implica realizar cálculos de evaporación para garantizar que la cantidad de agua perdida debido a este proceso se gestione correctamente (FAO,1998).

Por otro lado, el cálculo de la evaporación implica incurrir en costos técnicos y económicos, pero los costos son más perjudiciales si estos no se llevan a cabo, ya que, sin esta estimación, no se pueden tomar decisiones basadas y efectivas para el gestionamiento de los recursos hídricos disponibles. Considerando estos aspectos, surgen los siguientes principios fundamentales:

- Realizar cálculos de evaporación precisos para optimizar el uso de recursos hídricos.
- Reducir al máximo los costos relacionados con las pérdidas de agua por evaporación.
- Gestionar insumos necesarios para el cálculo de la evaporación, como datos climáticos y equipos de medición.
- Apoyar la formación y capacitación de personal en la gestión de la evaporación.

Para alcanzar estos objetivos, el proceso de cálculo de la evaporación requiere tareas específicas, entre las cuales se encuentran la recopilación de datos meteorológicos, uso de modelos y herramientas de cálculo, capacitación de personal en la interpretación de resultados y la gestión de recursos necesarios para llevar a cabo este proceso (FAO,1998).

4.3. Métodos de cálculo de evaporación

Dentro de la variedad de métodos de cálculo de evaporación, se distinguen los siguientes:

- Método de Penman-Monteith.
- Método de Evaporación de Makkink.
- Método de Balance de Agua.
- Método del Tanque de Evaporación de Clase Ajustado (AET).
- Modelos de Regresión y Empíricos.

Los primeros dos métodos, poseen un enfoque más preciso ya que el primero, considera la ecuación de Penman-Monteith, la cual toma en cuenta factores climáticos variados, por ejemplo, las temperaturas máximas y mínimas del aire, la humedad relativa, velocidad del viento, la radiación solar. El segundo, el método de Mankkink, es la variante simplificada del método de Penman-Monteith, en donde considera solo la temperatura del aire, la radiación y la velocidad del viento. Estos métodos son especialmente útiles cuando se tiene disponibilidad de datos meteorológicos detallados mediante estaciones de monitoreo, sin la necesidad de que haya personal en terreno realizando mediciones.

Los dos siguientes son técnicas simples y menos precisas que las dos anteriores, ya que el método de balance de agua, se necesitan medir los flujos de entrada y salida, los cuales son dinámicos y algunos difíciles de conseguir sus lecturas, estos deben ser seguidos en terreno, haciendo dificultosa la medición

y con posibles errores. El método del Tanque de Evaporación de Clase Ajustado, es similar al Tanque de Clase A que se utiliza en la actualidad, pero se ajusta utilizando coeficientes climáticos específicos del sitio, dando mejores lecturas.

Por último, los modelos de Regresión y Empíricos, se basan en observaciones y mediciones directas en el embalse, las cuales pueden variar de acuerdo a la persona que los realice, afectando directamente en los resultados finales.

5. Alternativas y solución propuesta

Como se mencionó anteriormente, no existe un método de cálculo de evaporación exclusivo para los distintos cuerpos de agua, sino que son combinaciones que indican de diferentes formas la evaporación sufrida por un cuerpo de agua expuesta al medioambiente y todos sus factores asociados. En este sentido, las soluciones que se proponen para el cálculo de la evaporación del embalse son las siguientes:

- a. Método de Penman - Monteith.
- b. Método Balance de Agua.
- c. Método del Tanque de Evaporación de Clase Ajustado (AET).

Estos tres métodos fueron elegidos como propuesta de solución ya que la alternativa (a) ofrece un cálculo remoto y preciso, con bajo costo de implementación y flexible, ya que puede calcular la evaporación diaria, semanal y mensual. La alternativa (b), se puede realizar, ya que se tiene cuantificación de algunos caudales de entrada y salida, pero no en su totalidad, ofreciendo una oportunidad de mejora en la misma solución, la cual es conocer de forma exacta los caudales de entrada y salida que no se tiene claridad. Por último, la opción (c), es una versión más precisa del Tanque que existe hoy en MVC, dado que hay más precisión en los factores utilizados.

A continuación, se definen los criterios a utilizar y su importancia para la elección de la solución. La asignación de porcentajes se hizo de acuerdo a las necesidades principales de MVC, realizando reuniones con los principales actores en el uso de la información respecto a la información entregada por los métodos de cálculo de evaporación, como también a los encargados de la realización de estas mediciones.

Los porcentajes son los siguientes:

	%
Bajo costo de implementación	25%
Bajo tiempo de implementación	10%
Baja necesidad seguimiento en terreno	30%
Precisión	25%
Baja capacitación del personal	10%

Tabla 1: Tabla ponderación de criterios

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, una tabla en donde se define una escala de categoría descriptiva, a la cual se le asigna un valor de 1 a 5, en donde 1 representa el nivel más bajo de cumplimiento y 5 el nivel más alto de cumplimiento. El método que obtenga mayor puntaje, será la elección escogida.

Muy bajo	1
Bajo	2
Medio	3
Medio-Alto	4
Alto	5

Tabla 2: Tabla escala de categorías descriptivas

Fuente: Elaboración propia

Criterio	Instrumentos para cálculo de evaporación		
	Método Penman – Monteith	Método de Balance de Agua	Método de Tanque AET
Bajo costo de implementación	5	1	3
Bajo tiempo de implementación	4	3	3
Baja necesidad seguimiento en terreno	5	1	2
Precisión	5	3	3
Baja capacitación del personal	4	2	3

Tabla 3: Tabla comparativa de alternativa de solución

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la ponderación entre los porcentajes de cada criterio y sus puntajes obtenidos, dando como resultado lo siguiente:

	Método Penman - Monteith	Método de Balance de Agua	Método de Tanque AET
Puntaje	4.8	1.8	2.7

Tabla 4: Tabla Puntajes totales ponderados

Fuente: Elaboración propia

A partir de la tabla de puntajes finales, se puede observar que el método de Penman-Monteith es el método escogido para determinar la evaporación en el Embalse Colihues.

5.1 Matriz de Riesgos

Para identificar los riesgos asociados a la implementación del proyecto, se realizó una matriz de riesgos asociados en conjunto a su mitigación, esto para tener una cuantificación de manera de medir los posibles riesgos al proyecto una vez implementado.

En primer lugar, se ocupó una escala de mapa de calor, el cual facilita la medición de los riesgos asociados, en donde se muestra en la columna izquierda la probabilidad estimada de que un evento pueda ocurrir, aumentando de arriba hacia abajo, comenzando desde improbable (1), medianamente probable (2), probable (3), altamente probable (4). Y horizontalmente, mostrando el impacto asociado, aumentado de izquierda a derecha, comenzando desde leve (1), moderado (2), grave (3), crítico (4).

Por último, la obtención del riesgo asociado se obtiene multiplicando las casillas de probabilidad con las casillas de impacto, en donde los resultados de los puntajes obtenidos se representan en leves (1-5), media (6-10), Alta (11-16) como se muestra a continuación:

	Impacto			
Probabilidad	Leve (1)	Moderado (2)	Grave (3)	Crítico (4)
Improbable (1)	1	2	3	4
Medianamente probable (2)	2	4	6	8
Probable (3)	3	6	9	12
Altamente probable (4)	4	8	12	16

Valorización	Baja (1-5)	Media (6-10)	Alta (11-16)
--------------	------------	--------------	--------------

Tabla 5: Mapa de calor

Fuente: Elaboración propia

En base a lo anterior, se determinaron 7 riesgos asociados a la implementación del proyecto, los cuales obtuvieron su valor asociado a la matriz de riesgos, obteniendo su criticidad asociada a su mitigación. Esto se hizo en conjunto al Ingeniero a cargo de la recolección de la data de evaporación.

Nivel de Riesgo	Riesgo	Mitigación
Bajo (8)	La no toma de datos de la estación de monitoreo	Constante mantención de la estación de monitoreo
Bajo (4)	Error en la toma de datos	Calibración constante de los equipos de la estación de monitoreo
Bajo (4)	Detección de datos incorrectos de estación de monitoreo	Levantar requerimiento de mantención a los equipos
Bajo (1)	Eliminación de tasas de evaporación	Tener copias mensuales de la planilla de cálculo
Bajo (4)	Alteración de planilla por error	Tener planilla de cálculo general
Bajo (2)	Falta de conocimiento de planilla	Realización de capacitación de uso planilla
Bajo (2)	Encargado no sabe cómo ingresar datos en la planilla	Realización de capacitación de uso de planilla

Tabla 6: Matriz de Riesgos

Fuente: Elaboración propia

6.Evaluación Económica

A continuación, se muestra la evaluación económica con respecto a la implementación del proyecto:

	Agosto	Septiembre	octubre	Noviembre
	1	2	3	4
Horas Hombre	\$ 345.000	\$ 345.000	\$ 345.000	\$ 345.000
Estación de monitoreo*				
Sensor de Humedad *	\$ 600.000	\$ -	\$ -	\$ -
Anemómetro (Viento)*	\$ 550.000	\$ -	\$ -	\$ -
Termómetro (Temperatura)*	\$ 230.000	\$ -	\$ -	\$ -
Piranómetro (Radiación)*	\$ 1.100.000	\$ -	\$ -	\$ -
Pluviómetro (Precipitación)*	\$ 70.000	\$ -	\$ -	\$ -
Plataforma en línea*	\$ 60.000	\$ 60.000	\$ 60.000	\$ 60.000
Costo de mantención*	\$ 400.000	\$ -	\$ -	\$ 400.000
Tiempo utilizado en medición	\$ -	\$ -	\$ 3.777	\$ 3.777
Licencia Office 365	\$ 19.900	\$ -	\$ -	\$ -
Sub - Total	\$ 3.374.900	\$ 405.000	\$ 408.777	\$ 808.777
Total	\$ 4.997.454			

Tabla N°8: Evaluación Económica

Fuente: Elaboración propia

*Costos hundidos

Dado que la implementación de cuantificación mediante el método de Penman-Monteith es a través de una planilla de cálculo y la teoría es de libre acceso, no se incurre en un costo adicional para Minera Valle Central, solo se incurre en el costo de horas hombres, la licencia de Office 365 y el tiempo destinado a hacer las mediciones.

Vale decir que los costos de los equipos y mantención de la estación de monitoreo, sistema en línea, son costos hundidos para el proyecto, ya que estos equipos están en MVC, la mantención y el servicio en línea corren por otro departamento.

7. Metodologías

7.1. Objetivo específico 1:

- Levantar información sobre los datos entregados por la estación de monitoreo para la construcción del modelo.

En primer lugar, contempla la identificación de la estación de monitoreo que se encuentra cercana al embalse a través de una visita a terreno. Esto contempla identificar su ubicación y sus funciones. En segundo lugar, se obtendrá la información de la base de datos de esta estación, la cual arroja datos de medición cada una hora a partir de enero del 2023.

7.2. Objetivo específico 2:

- Cuantificar la evaporación sufrida por el embalse, usando el método de Penman – Monteith, determinando variables críticas mediante regresión lineal.

Mediante el método de Penman – Monteith se hará un cálculo de la evaporación sufrida por el embalse Colihues, tomando datos provenientes de la estación de monitoreo desde enero del 2023 hasta la última semana de agosto del mismo año.

- La ecuación de Penman – Monteith es la siguiente:

$$E_{PEN} \approx 0,051(1 - \alpha)R_s\sqrt{T + 9,5} - 0,188(T + 13)\left(\frac{R_s}{R_A} - 0,194\right) * (1 - 0,00014(0,7T_{max} + 0,3T_{min} + 46)^2\sqrt{\frac{RH}{100}}) + 0,049(T_{max} + 16,3)\left(1 - \frac{RH}{100}\right)(a_u + 0,536u) \quad (1)$$

(1) Cada termino se encuentra definido en el anexo.

Se realizarán regresiones lineales con cada una de las variables que afectan al modelo, con el fin de modelar la relación entre las variables independientes y el resultado que arroja el modelo, de este modo se determinará cuáles son las variables que más afectan y su importancia, esto se hará con todas las variables implicadas en el modelo.

7.3. **Objetivo específico 3:**

- Cuantificar la disminución de tiempo empleado en el monitoreo de la evaporación en el Embalse Colihues con la implementación del nuevo método versus el anterior.

Cuantificar el tiempo empleado en el monitoreo de la evaporación con la situación actual con el evaporímetro Tanque Clase A y cuantificar el tiempo empleado con la implementación del método de Penman-Monteith, luego contrastar ambas situaciones y determinar el ahorro de tiempo y horas hombre.

7.4. **Objetivo específico 4:**

- Evaluar económicamente la pérdida de recurso hídrico asociada a la oportunidad de procesamiento de relaves provenientes del tranque Cauquenes debido a la evaporación.

Una vez implementado el modelo y cuantificada la cantidad de agua evaporada, se procederá a determinar oportunidad de procesamiento de relaves. Esto se realizará determinando el tonelaje de relaves antiguos que no se procesarían por la pérdida de agua por evaporación. A su vez, se determinarán las toneladas de concentrado de cobre asociadas a las toneladas de relave, esto con las leyes de Cobre que están presentes en el tranque Cauquenes y su recuperación en planta.

7.5. **Objetivo específico 5:**

- Entregar planilla de cálculo de evaporación para su implementación en Minera Valle Central.

Generar una plantilla Excel para su entrega al área de planificación para la cuantificación de evaporación para su implementación en Minera Valle Central.

8. Medidas de Desempeño

8.1 Objetivo específico 1:

- Levantar información sobre los datos entregados por la estación de monitoreo para la construcción del modelo.

$$\text{Porcentaje de datos disponibles} = \frac{\text{Datos Totales} - \text{Datos Faltantes}}{\text{Datos Totales}} * 100$$

Indicador: % de disponibilidad datos debe ser mayor o igual a un 90%, para que la data sea representativa.

8.2 Objetivo específico 2:

- Cuantificar la evaporación sufrida por el embalse, usando el método de Penman – Monteith, determinando variables críticas mediante regresión lineal.

8.2.1 Oportunidad de procesamiento de relaves:

Litros por segundo evaporados sobre los litros por segundo utilizados en la extracción del tranque Cauquenes.

$$\text{Oportunidad de procesamiento de relaves} = 1 - \frac{\text{Litros utilizados(s)} - \text{Litros evaporados (s)}}{\text{Litros utilizados(s)}} * 100$$

Indicador: % de oportunidad de procesamiento de relaves.

Donde: $0 < \% \text{ oportunidad de procesamiento} < 100$

8.3 Objetivo específico 3:

- Cuantificar la disminución de tiempo empleado en el monitoreo de la evaporación en el Embalse Colihues con la implementación del nuevo método versus el anterior.

8.3.1 Disminución de tiempo en medición:

$$\text{Disminución de tiempo en medición} = \frac{\text{Tiempo antiguo de medición} - \text{Tiempo nuevo de medición}}{\text{Tiempo antiguo de medición}} * 100$$

Indicador: Ahorro de tiempo en la medición debe ser mayor o igual a un 70%

8.3.2 Porcentaje Reducción de Costos:

$$\% \text{ Reducción de Costos} = \frac{\text{Costo medición antigua} - \text{Costo medición nueva}}{\text{Costo medición antigua}} * 100$$

Indicador: Ahorro de dinero en la medición debe ser mayor o igual a un 70%

8.4 Objetivo específico 4:

- Evaluar económicamente la pérdida de recurso hídrico asociada a la oportunidad de procesamiento de relaves provenientes del tranque Cauquenes debido a la evaporación.

8.4.1 Costo de m³ de agua:

$$\text{Valor económico agua evaporada} = \frac{\text{Valor Concentrado Cu}}{\text{Agua Evaporada}}$$

Indicador: determina el costo asociado por m³ de agua (\$/m³).

Donde:

Cumplimiento:	obtención Valor Concentrado Cu y agua evaporada → 100%
	no obtención de uno de los dos anteriores → 0%

8.5 Objetivo específico 5:

- Entregar planilla de cálculo de evaporación para su implementación en Minera Valle Central.

Donde:

Cumplimiento:	Cumplimiento de los anteriores KPI s → 100%
	No cumplimiento de los anteriores KPI s → 0%

9. Desarrollo de proyecto basado en la metodología

9.1. Análisis situación actual

Es necesario conocer la situación actual de cómo se mide la evaporación en Minera Valle Central.

En primer lugar, se identificará el Tanque Clase A mediante el cual se mide la evaporación.



Imagen 3: Tanque Clase A

Fuente: Elaboración Propia

En segundo lugar, es importante como se lleva a cabo el proceso de medición, el cual lo realiza un ingeniero a cargo una vez cada 24 horas. Esta labor consiste en medir como varia el nivel del agua en el tanque, mediante una regleta ubicada al interior de este. Esta medición se realiza de lunes a jueves, ya que hay tres días en los cuales no se realizan mediciones, estos son viernes, sábados y

domingos, dado que el encargado los fines de semanas no asiste a MVC y el viernes hay teletrabajo, es por esto que la medición de esos tres días, se determina leyendo la evaporación el día lunes.

Por otro lado, la medición de la evaporación del tanque, puede que se vea afectado por diferentes situaciones, como, por ejemplo:

- Error humano en la medición.
- Animales pueden beber agua del evaporímetro arrojando lecturas incorrectas.
- En la remoción de objetos se puede sacar agua del tanque, obteniendo lecturas incorrectas.

A continuación, se muestra un gráfico con el comportamiento de la evaporación recopilada del Evaporímetro Tanque Clase A, con 126 mediciones de 243 disponibles desde enero del 2023 hasta agosto del 2023.

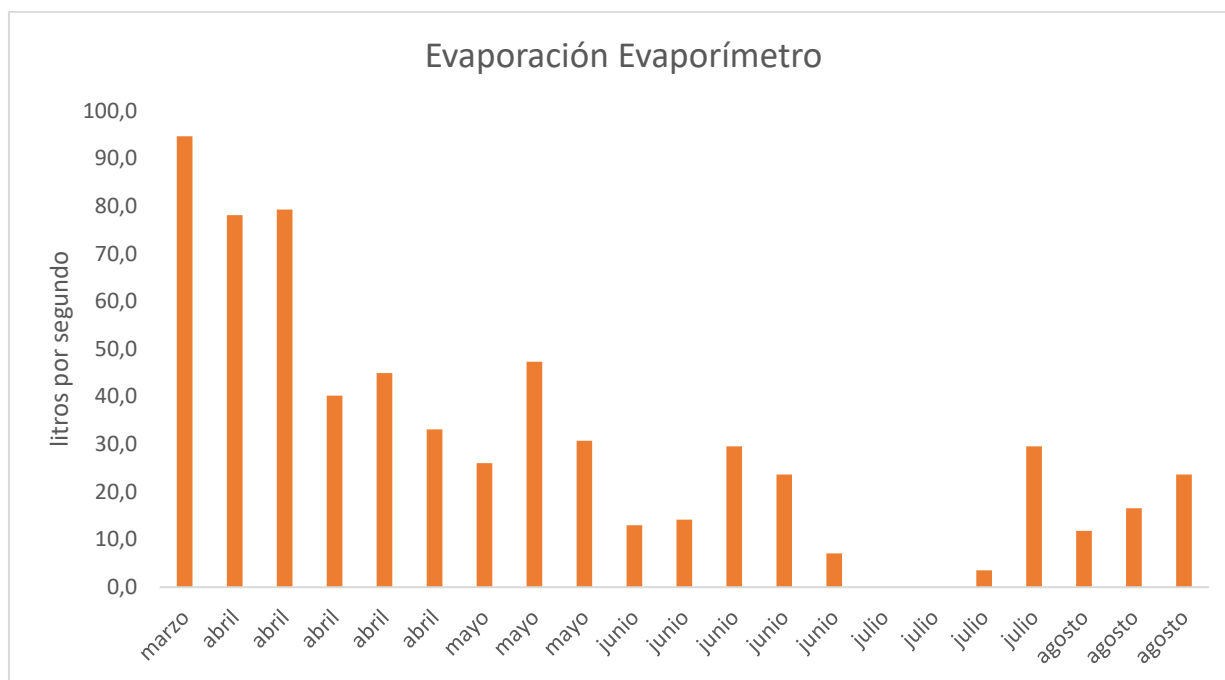


Gráfico N°1: Evaporación Semanal Evaporímetro

Fuente: Elaboración propia

9.2. Cálculo de evaporación sufrida por el Embalse Colihues.

El cálculo de la evaporación semanal sufrida por el Embalse Colihues se determinará a través de la ecuación de Penman-Monteith, la cual considera variables críticas y medibles en Minera Valle Central, el periodo analizado es desde la primera semana de enero del 2023 hasta la última de agosto del 2023, con un área del Embalse estable de 2.300.000 m² y un factor del 75%. En cuanto a los datos críticos y medibles en la estación de monitoreo presente en MVC para el modelo son los siguientes:

- Temperatura Máxima
- Temperatura Mínima
- Temperatura Media
- Radiación Solar
- Humedad Relativa
- Velocidad de Viento

A partir de la ecuación de Penman-Monteith se obtiene lo siguiente:



Gráfico N°2: Evaporación Semanal Año 2023

Fuente: Elaboración propia

Al ver el gráfico N°2, se puede observar que los meses de enero, febrero y marzo son los que presentaron mayor evaporación semanal, teniendo como dato más bajo la tercera semana de marzo con 108,20 l/s y como máximo la última semana de enero con 175,37 l/s. Luego se puede observar una tendencia a la baja hasta el mes de mayo, obteniendo un promedio de 72,55 l/s, estabilizándose hasta la última semana de julio, con un promedio semanal de 25,72 l/s. Por último, comienza un alza la primera semana de agosto, observándose un incremento en la primera semana a 63,44 l/s.

El cálculo final de la evaporación sufrida por el embalse Colihues en el periodo analizado, arroja un total acumulado evaporado de 1.585.960 m³.

Esto responde a la estacionalidad y sus implicancias meteorológicas, es decir, la variación de temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento, las cuales son evaluadas en el modelo, como también, muy importante, responde a la superficie del pelo de agua, ya que, si esta es mayor, la evaporación será mayor y viceversa.

9.3. Variables Críticas

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la regresión lineal con las 6 variables estudiadas en R Studio, para poder determinar los pesos de las variables en el modelo, para así, recomendar medidas de prevención con las variables más influyentes en el fenómeno de la evaporación.

En primer lugar, las variables con las cuales se realizó la regresión lineal son las siguientes:

1. Temperatura Mínima.
2. Temperatura Máxima.
3. Temperatura Media.
4. Humedad Relativa.
5. Radiación Solar.
6. Velocidad de Viento.

Donde los resultados fueron los siguientes:

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1.2352489	0.8426471	-1.466	0.154222
datosR\$minima	-0.0277336	0.0298350	-0.930	0.360834
datosR\$maxima	0.0007568	0.0307557	0.025	0.980549
datosR\$media	0.0511937	0.0550304	0.930	0.360469
datosR\$HR	-0.0302872	0.0077729	-3.897	0.000582 ***
datosR\$Rs	0.2617054	0.0196880	13.293	2.31e-13 ***
datosR\$viento	0.7686641	0.2313622	3.322	0.002571 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2269 on 27 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9946, Adjusted R-squared: 0.9934
F-statistic: 833 on 6 and 27 DF, p-value: < 2.2e-16

Imagen 4: Regresión Lineal

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar, las variables más significantes son Humedad Relativa, Radiación Solar y la Velocidad del Viento. También podemos ver que a medida que la Temperatura Mínima y la Humedad Relativa son menores, la evaporación será menor. La regresión realizada, obtiene como R^2 ajustado un 0,9934.

Seguidamente, se determinó el factor de inflación de la varianza (VIF), esto para determinar si existe multicolinealidad entre los datos ingresados en la regresión, en donde los valores deben aproximarse a 1 para que no exista multicolinealidad, entre más grande sea el valor, explica que las variables están fuertemente correlacionadas dentro del modelo. Los valores VIF son los siguientes:

```
> vif(mle)
datosR$minima datosR$maxima datosR$media datosR$HR datosR$Rs datosR$viento
11.955549 16.643252 50.195810 7.587766 13.095263 12.002565
```

Imagen 5: Factor de inflación de la varianza

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, todas las variables obtienen un valor alto, por lo cual, los coeficientes de las variables implicadas en el modelo se ven afectados seriamente por la multicolinealidad, por lo

cual, se determinarán los pesos de las variables a través del Algoritmo de Random Forest, el cual es menos sensible frente a la multicolinealidad en la determinación de la importancia de las variables.

El algoritmo de Random Forest consiste en obtener una predicción a través de la generación de árboles de decisión múltiples e independientes llamados “bosques”, para luego combinar sus resultados. Estos árboles contribuyen de igual manera a la predicción final del algoritmo.

```
Call:
randomForest(formula = datosR$evaporacion ~ ., data = datosR, importance = TRUE)
Type of random forest: regression
Number of trees: 500
No. of variables tried at each split: 2

Mean of squared residuals: 0.1894234
% Var explained: 97.51
```

Imagen 6: Algoritmo Random Forest

Fuente: Elaboración Propia

Aplicando el algoritmo de tipo regresión, con un numero de 500 árboles de decisión distintos se obtuvieron los siguientes pesos para las 6 variables distintas en el modelo.

	%IncMSE	IncNodePurity
minima	10.595755	44.89734
maxima	8.282487	29.66576
media	12.896502	54.23132
HR	5.600541	14.58816
Rs	12.771168	48.00316
viento	12.613378	57.39945

Imagen 7: Importancia de variables

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar en la columna de %IncMSE, en donde se les asigna la importancia de cada variable en el modelo, las tres variables más importantes son la Radiación Solar, la Velocidad de

Viento y la Temperatura Media, seguidas de la Temperatura Mínima y Máxima, y por último la Humedad Relativa. Se puede ver que el test explica un 97.51% de los datos.

Comparando los datos obtenidos de la regresión lineal y el algoritmo Random Forest se llega a la conclusión de que las variables más importantes en la evaporación son la Radiación Solar y la Velocidad del Viento, por lo cual se discutirán medidas de mitigación de la evaporación, pero enfocadas en esas variables.

A continuación, se muestran tres tecnologías distintas, las cuales actúan sobre las variables de Radiación Solar y Viento en embalses:

1. Shade Balls
2. Domo Circular
3. Lonas Continuas

Las Shade Balls o Bolas de Sombra, son pelotas platicas de color negro, las cuales son arrojadas a los cuerpos de agua flotando en la superficie, evitando que el cuerpo sufra evaporación principalmente por Radiación Solar, pero también contra el viento, dado que es una capa sobre el pelo de agua.

El Domo Circular es una estructura que se instala para dar sombra al cuerpo de agua, reduciendo su exposición a la Radiación Solar.

Las Lonas Continuas son desplegadas en la superficie del pelo de agua, y estas pueden estar compuestas de diferentes materiales, principalmente actúan sobre la Radiación Solar, pero también sobre el Viento.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre las tres tecnologías, en donde se especifica la tasa de reducción de evaporación, su costo asociado, su modo de uso y su cobertura por área.

Esta tabla se obtuvo de uno de los principales proveedores de estas tecnologías en la industria, la cual es O₂ Company.




	Shade Balls	Domo Circular	Lonas Continuas
			
EVITA LA EVAPORACIÓN EN	25%	50%	80%
PRECIO POR 1000m ² : 3Lt	USD \$15.297	USD \$203.964	USD \$10.964
MODO DE USO	Se vierte en el agua	Instalación Compleja	Instalación Compleja
PRODUCTO BIODEGRADABLE	No	No	No
COBERTURA POR HECTÁREA	140.000 bolas	60.000	100.000
PROCEDENCIA	Estados Unidos	Francia	España

Imagen 8: Tabla Comparativa Tecnologías

Fuente: O₂ Company

Si bien las tres tecnologías poseen diferentes porcentajes de reducción de evaporación y a diferentes precios, se deben hacer pruebas in situ para ver cómo se comportan con las características del Embalse Colihues, ya que este se encuentra sectorizado, lo cual implica diferentes consumos, diferentes capacidades y distintas geometrías, lo cual se hace imprescindible evaluar si es conveniente o no la instalación de estos métodos.

Aun así, se aprecia que la tecnología más conveniente es la lona continua, por su alto poder de reducción de evaporación y su costo asociado.

9.4. Disminución en tiempo de medición

A continuación, se detalla el tiempo de empleado al realizar la medición del evaporímetro Tanque Clase A, el cual se encuentra a un costado de las oficinas, frente al Embalse Colihues.

	Situación Actual	
Trayecto ida	1	min
Trayecto vuelta	1	min
Tiempo medición	6	min
Tiempo Total	8	min

Tabla N°9: Tiempo de Medición Situación Actual

Fuente: Elaboración propia

El trayecto tanto como de ida y vuelta, tiene un tiempo de recorrido de 1 minuto cada uno, dando un total de 2 minutos de tiempo de trayecto. A su vez, el tiempo de medición es de 6 minutos, ya que se deben remover objetos, insectos o basuras que puedan estar al interior del evaporímetro que puedan afectar su medición, luego esperar que el agua se estabilice y obtener la lectura.

Ahora se detalla el tiempo empleado usando el nuevo método, el cual es a través de una planilla de Excel, en donde se debe ingresar los datos de Temperatura Media, Máxima y Mínima, Humedad Relativa, Radiación Solar y Velocidad de Viento, como se puede observar a continuación:

Tiempo UTC-4	Semana	Temperatura del Aire Mínimo	Temperatura del Aire Máximo	T. Media	Humedad Relativa %	M/S	Ra	JD MENSUAL	dr	δ	latitud [rad]	Ws	N	n	Rs	ALFA	z	mm día	u (Viento m/s)	(u)	Correccion por altura	Epen [mm/s emana]				
ene	2 ene / 8 ene	11.2	30.3	20.60	50.65	1	43.226	15	1.029	-0.3702	-0.598	1.8383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.94	3.28	0.99	3.59	8.30	2.93	1.58	8.38	8.38
ene	9 ene / 15 ene	11.2	27.7	19.67	48.32	1	43.226	15	1.029	-0.3702	-0.598	1.8383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.82	3.19	0.99	3.31	7.98	2.76	1.49	8.06	8.06
ene	16 ene / 22 ene	10.7	28.5	19.59	51.20	1	43.226	15	1.029	-0.3702	-0.598	1.8383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.81	3.18	0.99	3.32	7.99	2.88	1.56	8.07	8.07
ene	23 ene / 29 ene	11.8	30.4	21.37	41.84	1	43.226	15	1.029	-0.3702	-0.598	1.8383	14.044	12	30.847	0.08	680	8.04	3.36	0.99	3.98	8.70	2.78	1.50	8.78	8.78

Imagen 4: Planilla de Cálculo de Evaporación

Fuente: Elaboración Propia

El tiempo empleado para esto es de alrededor de 6 minutos, esto porque se debe ingresar la temperatura media, máxima y mínima promedio de la semana, la humedad relativa promedio de la semana al igual que la velocidad promedio de la semana, esto, desde la base de datos de la estación de monitoreo. Vale decir que no se incurre en gasto de tiempo en trayectos, ya que se realiza remotamente. Los tiempos se detallan a continuación:

	Nueva Situación	
Trayecto ida	0	min
Trayecto vuelta	0	min
Tiempo medición	6	min
Tiempo Total	6	min

Tabla N°10: Tiempo de Medición Nueva Situación

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, con la implementación del nuevo método el cual tarda 6 minutos versus el antiguo que dura 32 minutos semanales.

Por otro lado, el ingeniero que debe realizar esta función, ocupa 2,13 horas mensuales en esta función, dado que se debe hacer diariamente de lunes a jueves, en comparación con el nuevo método que utiliza 24 minutos, ya que se realiza una vez a la semana. Esto traducido en costo de HH se muestra a continuación:

	Costo HH (\$/h)	Tiempo Medición (h/mes)	Costo Total
Situación Actual	\$ 9.444	2,13	\$ 20.115
Nueva Situación	\$ 9.444	0,4	\$ 3.777

Tabla N°11: Costo Tiempos de Medición

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, con la situación actual se gastan \$20.115 pesos, versus la nueva situación \$3.777 pesos mensuales.

9.5. Oportunidad de procesamiento de Relaves

Una vez obtenida la evaporación semanal, se obtendrá la cantidad de metros cúbicos (m^3) evaporados diariamente, para así obtener las toneladas de relaves, en consecuencia, la cantidad de Concentrado de Cobre.

Para esto es necesario definir ciertos parámetros:

	Tranque Cauquenes	
Contenido de sólidos	47	%
Densidad relaves frescos	2.8	ton/m ³
Densidad aparente de relave en tranque	1.35	ton/m ³
Densidad Agua	1	tm/m ³

Tabla N°12: Parámetros operacionales Tranque Cauquenes

Fuente: Minera Valle Central

Para realizar el cálculo de la oportunidad de procesamiento de relaves, debemos saber cuáles son los parámetros de operación del Tranque Cauquenes, en donde el contenido de sólidos que llega a planta es de un 47%, la densidad de relaves frescos es de 2,8 ton/m³, su densidad aparente es de 1,35 ton/m³, tomando como densidad del agua 1 tm/m³.

Para la extracción de 35.000 toneladas de relaves provenientes del Tranque Cauquenes se necesitan 457 l/s.

Esto se obtiene desde la siguiente manera:

Toneladas relaves secos	35.000	ton/día
Volumen de relaves secos	12.500	m ³ /día
Tonelaje de relaves	74.468	ton/día
Agua necesaria	39.468	m ³ día
Agua necesaria	457	l/s

Tabla N°13: Cálculo agua necesaria

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, para obtener el volumen de relaves secos a remover se debe realizar la siguiente operación:

$$\frac{\text{Relaves secos (ton/día)}}{\text{Densidad relaves frescos (ton/m}^3\text{)}} = \text{Volúmen relaves a remover (m}^3\text{/día)}$$

En segundo lugar, se debe obtener el tonelaje de relaves húmedos:

$$\frac{\text{Relaves secos (ton/día)}}{\text{Contenido de sólidos (\%)}} = \text{Relaves húmedos (ton/día)}$$

En tercer lugar, se obtiene el agua necesaria para remover los relaves secos:

$$\text{Relaves húmedos (ton/día)} - \text{Relaves secos (ton/día)} = \text{Agua necesaria (m}^3\text{/día)}$$

Por último, se pasan los m³/día a l/s:

$$\frac{\text{Agua necesaria (m}^3\text{/día)}}{86.400 \text{ seg} * 1.000 \text{ l}} = \text{Agua necesaria (l/s)}$$

Ahora realizando el cálculo inverso, ya que se tienen los litros por segundo evaporados semanalmente, se obtienen la cantidad de relaves provenientes del Tranque Cauquenes.

En primer lugar, se deben convertir los l/s evaporados a m³ diarios:

$$\frac{\text{Agua Evaporada (l/s)} * 86.400 \text{ s} * 1 \text{ m}^3}{1.000} = \text{Agua Evaporada (m}^3\text{/día)}$$

En segundo lugar, se obtienen las toneladas de relaves secos por día:

$$\frac{\text{Agua Evaporada (m}^3\text{/día)} * \text{Contenido de sólidos (\%)}}{1 - \text{Contenido de sólidos (\%)}} = \text{Relaves secos (ton/día)}$$

Por último, se obtienen las toneladas de relaves semanales:

$$\text{Relaves secos (ton/día)} * 7 = \text{Relaves secos s (ton/semana)}$$

Este mismo proceso se realiza con todas las semanas desde la primera semana de enero hasta la última de agosto, obteniendo el siguiente gráfico:

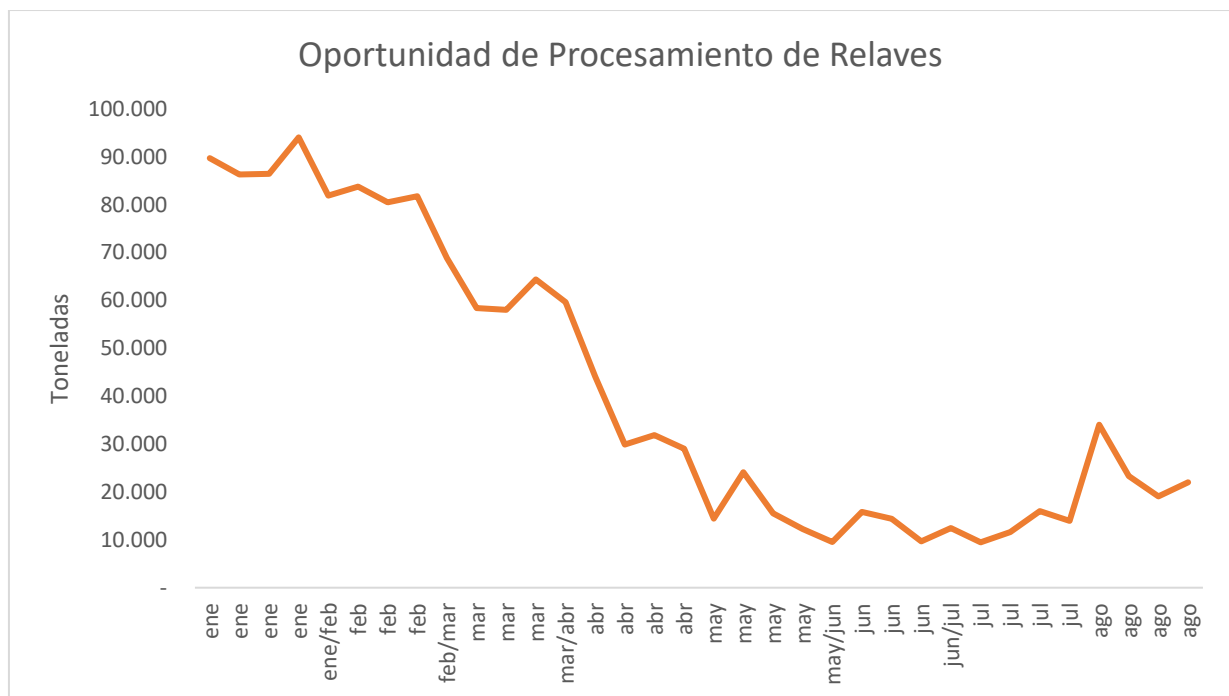


Gráfico N°3: Oportunidad de Procesamiento de Relaves

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en el gráfico N°3, la oportunidad de procesamiento de relaves se comporta de la misma forma que la evaporación, ya que el procesamiento responde ante la cantidad de agua. Se puede ver que, en los meses de enero, febrero y marzo, son los que presentan mayor oportunidad

de procesamiento, teniendo como dato más bajo la segunda semana de marzo con 58.032 toneladas y como máximo la última semana de enero con 94.057 toneladas de relaves. Por otro lado, se puede observar una tendencia a la baja hasta el mes de mayo, en donde se estabiliza hasta la primera semana de julio, con un promedio 20.887 toneladas de relaves en función a la evaporación. Por último, comienza el alza la segunda semana de julio, observándose un incremento a 12.462 toneladas de relaves equivalente, mientras que en agosto se observa un aumento a 34.027 toneladas.

El cálculo final de la oportunidad de procesamiento de relaves en el Tranque Cauquenes sufrida por la evaporación en el embalse Colihues en el periodo analizado, arroja un total acumulado de 1.406.418 toneladas.

9.6. Concentrado de Cobre

A partir de la cuantificación de las toneladas de relaves, se cuantificará la cantidad de toneladas de Concentrado de Cobre en función a la evaporación sufrida en el Embalse Colihues, y su valor asociado. Para esto es importante definir los siguientes parámetros del proceso:

Ley de Cu en Relave	0,24%
Recuperación Metalúrgica	30%
Ley de Concentrado de Cu	26%

Tabla N°14: Parámetros Planta Minera Valle Central

Fuente: Minera Valle Central

Dado el proceso de Minera Valle Central, la ley de Cobre presente en los relaves provenientes del Tranque Cauquenes, poseen una ley de Cobre del 0,24%, el cual después de pasar por Flotación Colectiva, Selectiva y Filtrado se obtiene una recuperación metalúrgica global del 30%.

En primer lugar, se debe obtener las toneladas de cobre fino asociadas a las toneladas de relaves, para esto se hace la siguiente operación:

$$\text{relaves secos semanalmente (ton)} * 0,24\% = \text{Cu Fino (ton)}$$

A continuación, se debe multiplicar el Cu Fino por la recuperación:

$$\text{Cu Fino (ton)} * 30\% = \text{Cu Fino (ton)}$$

Una vez obtenidos las toneladas de cobre fino, se debe dividir por la ley del concentrado final:

$$\frac{\text{Cu Fino (ton)}}{26\%} = \text{Concentrado Cu (ton)}$$

Luego se deben obtener las libras de Concentrado de Cu para facilitar el cálculo:

$$\frac{\text{Concentrado Cu (ton)} * 2204,64 \text{ (lb)}}{1 \text{ (ton)}} = \text{Concentrado de Cu (lb)}$$

El resultado durante el periodo analizado es el siguiente:

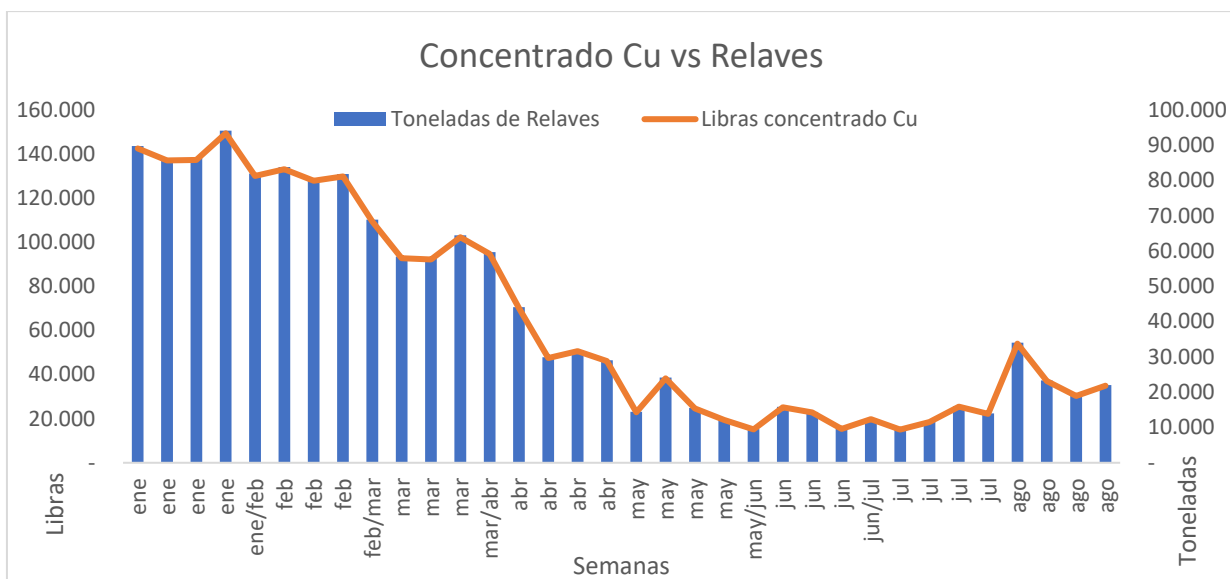


Gráfico N°4: Concentrado de Cu vs Libras de Relaves

Fuente: Elaboración propia

Del gráfico se puede observar el contraste de Concentrado de Cobre con respecto a la oportunidad de procesamiento de relaves en función a la evaporación sufrida por el Embalse Colihues durante el periodo de estudio. De 1.406.418 toneladas de relaves provenientes del Tranque Cauquenes, equivalen a 2.232.464 libras de Concentrado de Cobre

9.7. Valorización Concentrado Cu

Seguidamente de la cuantificación del Concentrado de Cu final, se determinan los Ingresos Marginales de Venta de Cu, valorizando el Concentrado de Cu.

$$\text{Concentrado Cu final (lb)} * \text{Precio US\$/lbCu} = \text{Ingresos Marginales por Venta}$$

Por otro lado, definir los precios de la libra de cobre mensuales durante el periodo de estudio:

	US\$/lb
Enero	US\$ 4,082
Febrero	US\$ 4,062
Marzo	US\$ 4,008
Abril	US\$ 3,998
Mayo	US\$ 3,735
Junio	US\$ 3,804
Julio	US\$ 3,831
Agosto	US\$ 3,788

Tabla N°15: Precios libra de Cobre

Fuente: Cochilco

Ingresos Marginales por Venta de Concentrado de Cu	USD	8.918.050
---	------------	------------------

Tabla N°16: Ingresos Marginales

Fuente: Elaboración Propia

En consecuencia, se determina los Ingresos Netos por Venta de Cu equivalentes a la oportunidad de procesamiento de relaves en función de la evaporación, con un monto igual a US\$ 8.918.050.

10. Resultados

10.1 Objetivo Especifico 1:

En relación con el desarrollo del proyecto se analizó el periodo desde la primera semana de enero del 2023 hasta la última semana de agosto del 2023, para determinar la evaporación sufrida por el Embalse Colihues, para esto, la data que entrega la estación de monitoreo debe ser completa y representativa. La estación de monitoreo entrega datos cada una hora de las mediciones de Temperatura, Radiación Solar, Humedad Relativa y Velocidad de Viento, lo cual, arroja un total de 5.832 datos por variable a un 100% cumplimiento.

	Datos disponibles	Datos totales
Temperatura	5.555	5.832
Radiación Solar	5.555	5.832
Humedad Relativa	5.555	5.832
V. Viento	5.555	5.832
Total	22.220	23.328

Tabla N°17: Datos Estación de Monitoreo

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla anterior, se muestra que cada variable fue cuantificada 5.555 veces de un total de 5.832, transformándolo a las 4 variables medidas da un total de 22.220 veces de un total de 23.328, lo que se traduce en:

$$\text{Porcentaje de datos disponibles} = \frac{\text{Datos Totales} - \text{Datos Faltantes}}{\text{Datos Totales}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de datos disponibles} = \frac{23.382 - 1.108}{23.328} * 100 = 95,25\%$$

En conclusión, se puede decir que la data es representativa, ya que cumple con el indicador el cual debe ser mayor o igual a 90%, obteniendo una data representativa para la construcción del modelo.

10.2 Objetivo Específico 2:

El procesamiento de relaves se ve relacionado con los litros por segundo utilizados para procesar 35.000 toneladas de relaves al día, los cuales son 457 l/s y los litros por segundo evaporados según el modelo de Penman-Monteith.

$$\text{Oportunidad de procesamiento de relaves} = 1 - \frac{\text{Litros utilizados(s)} - \text{Litros evaporados (s)}}{\text{Litros utilizados(s)}} * 100$$

A continuación, se ve la oportunidad de procesamiento de relaves en función a la evaporación semanal correspondiente sufrida por el Embalse Colihues.

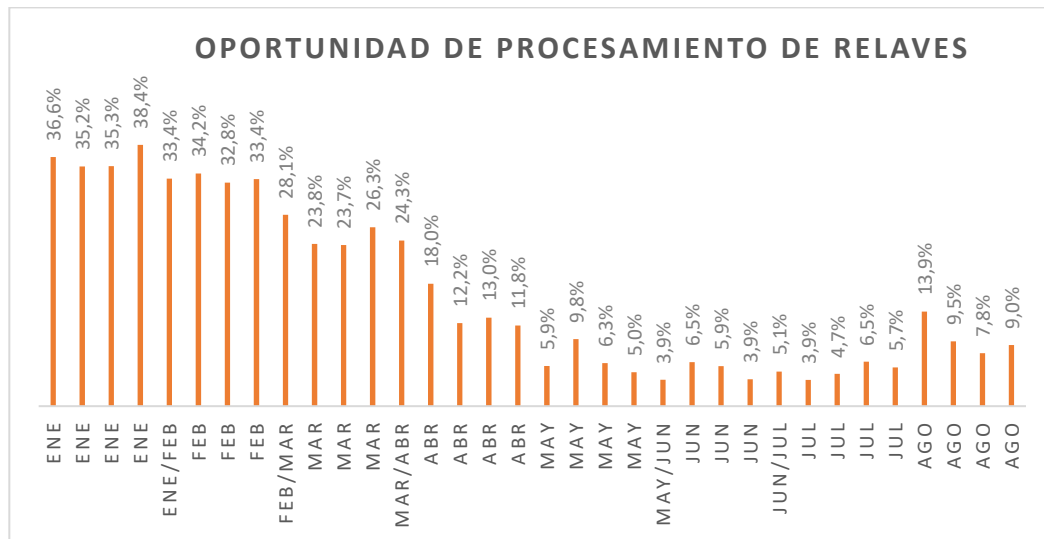


Gráfico N°6: Oportunidad de procesamiento de relaves

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, la variabilidad significativa en la oportunidad de procesamiento de relaves, que fluctúa entre 38,4% y un 3,9%, está directamente relacionada con la evaporación, que destaca la importancia de comprender y gestionar los impactos estacionales y climáticos en la operación.

Esta fluctuación responde a los cambios estacionales presentes durante el periodo de estudio, lo cual no se ve reflejado en el corto plazo, si no que en el mediano a largo plazo, en donde el nivel del embalse va disminuyendo en temporadas de escasas hídrica y efectos climáticos adversos, implicando que las variables que actúan en el efecto de la evaporación, como por ejemplo la Radiación Solar, incrementen, aumentando la evaporación, en consecuencia la oportunidad de procesamiento de relaves si no se toman medidas de mitigación.

10.3 Objetivo Específico 3:

La disminución de tiempo de medición, fue mediante la implementación de la planilla de cálculo de evaporación, la cual permite realizar la medición sin la necesidad de ir a terreno.

$$\text{Disminución de tiempo en medición} = \frac{\text{Tiempo antiguo de medición} - \text{Tiempo nuevo de medición}}{\text{Tiempo antiguo de medición}} * 100$$

$$\text{Disminución de tiempo en medición} = \frac{32 \text{ min} - 6 \text{ min}}{32 \text{ min}} * 100 = 81,26\%$$

Se obtuvo el porcentaje de disminución de tiempo de medición, en donde se aprecia la reducción de tiempo fue de un 81,26%, en donde el objetivo era un 70%.

La reducción de costos, fue también mediante a la implementación de la plantilla de cálculo de evaporación, la cual ahorra los trayectos de ida y vuelta para realizar la medición.

$$\% \text{ Reducción de Costos} = \frac{\text{Costo medición antigua} - \text{Costo medición nueva}}{\text{Costo medición antigua}} * 100$$

$$\% \text{ Reducción de Costos} = \frac{\$20.147 - \$3.777}{\$20.147} * 100 = 81,26\%$$

Se obtuvo el porcentaje de reducción de costos, en donde se aprecia la reducción del costo fue de un 81,26%, en donde el objetivo era un 70%.

Como se puede observar, ambas métricas se cumplieron, obteniendo resultados acordes con los objetivos necesarios planteados por Minera Valle Central.

10.4 Objetivo Específico 4:

En relación al objetivo específico 4, se obtiene el valor del m3 de agua evaporado, en relación al Concentrado de cobre.

$$\text{Valor económico agua evaporada} = \frac{\text{Valor Concentrado Cu}}{\text{Agua Evaporada}}$$

Para el cumplimiento de este KPi, se debe obtener el valor del Concentrado y el agua evaporada correspondientes a la misma semana, obteniendo así el valor del m³ evaporado.

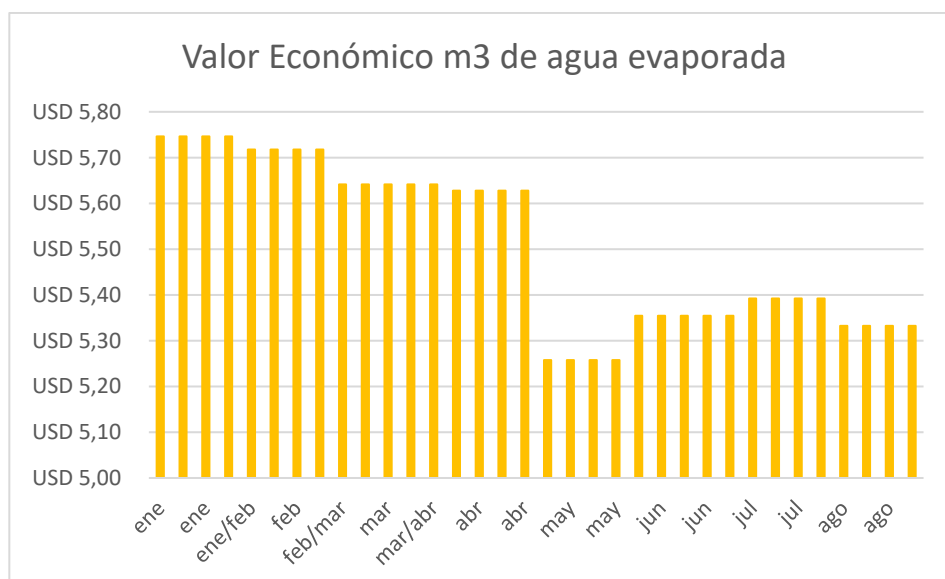


Gráfico N°7: Valor Económico del m3 de agua evaporada

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar, el valor económico del m^3 de agua evaporada oscila entre 5.25 USD y 5.75 USD, cuyo valor promedio está en torno a los 10 USD, destaca la importancia económica de la gestión eficiente del recurso hídrico en la industria minera.

Los costos asociados a la evaporación del agua se reflejan en la influencia en los factores geográficos y climáticos principalmente. Minera Valle Central teniendo como método de extracción el monitoreo hidráulico, enfrenta desafíos directos en el manejo sustentable de este recurso, no solo considerando los costos asociados a la evaporación, sino que también al valor estratégico en el proceso productivo.

La variabilidad de estos costos levanta la alerta de la necesidad de implementación de tecnologías y enfoque innovadores que ayuden a la reducción de la evaporación sufrida en el Embalse Colihues, esto para la reducción de costos asociados como también a la conservación del recurso hídrico, el cual se ve afectado a los cambios climáticos adversos actuales.

10.5 Objetivo Especifico 5:

En relación al objetivo específico 5, se cumple con la entrega de planilla de cálculo de evaporación para la aplicación en MVC, esto a través del cumplimiento de las anteriores métricas dispuestas.

A continuación, se muestra la planilla de cálculo de evaporación y oportunidad de procesamiento de relaves.

Exposición de pautas dividida en 4

Temp o UTC- 4		Temp eratur a del Aire Minim -1°C	Temp eratur a del Aire Máxim +1°C	Hume dad Relati va %	MES	Ra	JD MENS UAL	dr	δ	latitud [rad]	Ws	N	n	Rs	ALFA	z	Exceso de pasada dividida x4								
Temp eratur a del Aire Minim -1°C	Temp eratur a del Aire Máxim +1°C	Temp eratur a del Aire Minim -1°C	Temp eratur a del Aire Máxim +1°C	Hume dad Relati va %	MES	Ra	JD MENS UAL	dr	δ	latitud [rad]	Ws	N	n	Rs	ALFA	z	mm dia	u (Viento m/s)	f(u)	Correccion por altura	Epen [mm/s enana 1]				
ene 2 ene/8 ene	11.3	30.3	20.60	50.03	1	43.226	15	1029	-0.3702	-0.598	18383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.94	3.28	0.99	3.59	8.30	2.93	158	8.38	8.38
ene 9 ene/15 ene	11.2	27.7	19.67	48.32	1	43.226	15	1029	-0.3702	-0.598	18383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.82	3.19	0.99	3.31	7.98	2.76	149	8.06	8.06
ene 16 ene/22 ene	10.7	28.5	19.59	51.20	1	43.226	15	1029	-0.3702	-0.598	18383	14.044	12	30.847	0.08	680	7.81	3.18	0.99	3.32	7.99	2.88	156	8.07	8.07
ene 23 ene/29 ene	11.8	30.4	21.37	41.84	1	43.226	15	1029	-0.3702	-0.598	18383	14.044	12	30.847	0.08	680	8.04	3.36	0.99	3.98	8.70	2.78	150	8.78	8.78
ene/feb 30 ene/5 feb	13.3	31	21.68	46.51	2	39.028	46	1021	-0.2303	-0.598	17392	13.225	11	27.629	0.08	680	7.26	3.37	0.99	3.63	7.57	2.72	147	7.85	7.85
feb 6 feb/12 feb	14.2	31.2	22.56	41.03	2	39.028	46	1021	-0.2303	-0.598	17392	13.225	11	27.629	0.08	680	7.34	3.44	0.99	3.79	7.74	2.57	139	7.82	7.82
feb 13 feb/19 feb	11.5	29.2	20.50	41.09	2	39.028	46	1021	-0.2303	-0.598	17392	13.225	11	27.629	0.08	680	7.10	3.24	0.99	3.53	7.44	2.50	135	7.52	7.52
feb 20 feb/26 feb	12	30.9	21.11	41.79	2	39.028	46	1021	-0.2303	-0.598	17392	13.225	11	27.629	0.08	680	7.17	3.30	0.99	3.63	7.55	2.51	135	7.64	7.64
feb/mar 27 feb/5 mar	13.2	30.9	21.39	39.02	3	32.419	76	10078	-0.0334	-0.598	15395	12.174	10	22.867	0.08	680	5.96	3.31	0.99	3.65	6.35	2.41	130	6.43	6.43
mar 6 mar/12 mar	11.8	28.5	19.48	53.55	3	32.419	76	10078	-0.0334	-0.598	15395	12.174	10	22.867	0.08	680	5.78	3.12	0.99	2.67	5.37	2.44	132	5.45	5.45
mar 13 mar/19 mar	11.3	27.9	19.67	51.05	3	32.419	76	10078	-0.0334	-0.598	15395	12.174	10	22.867	0.08	680	5.79	3.14	0.99	2.64	5.34	2.31	125	5.42	5.42
mar 20 mar/26 mar	12.2	29.3	20.80	35.46	3	32.419	76	10078	-0.0334	-0.598	15395	12.174	10	22.867	0.08	680	5.91	3.25	0.99	3.24	5.93	2.09	113	6.01	6.01
mar/abr 27 mar/2 abr	10.3	29	18.30	44.08	3	32.419	76	10078	-0.0334	-0.598	15395	12.174	10	22.867	0.08	680	5.66	3.01	0.99	2.80	5.49	2.10	113	5.57	5.57
abr 3 abr/9 abr	10.5	27.3	17.97	34.31	4	24.7	107	0.992	0.1786	-0.598	14475	11.058	9	17.376	0.08	680	4.27	2.97	0.99	2.70	4.04	1.79	0.96	4.12	4.12
abr 10 abr/16 abr	5.66	25.5	14.48	62.44	4	24.7	107	0.992	0.1786	-0.598	14475	11.058	9	17.376	0.08	680	3.99	2.63	0.99	1.31	2.71	1.59	0.86	2.79	2.79
abr 17 abr/23 abr	4.31	23.6	12.81	58.70	4	24.7	107	0.992	0.1786	-0.598	14475	11.058	9	17.376	0.08	680	3.85	2.47	0.99	1.48	2.89	1.71	0.92	2.98	2.98
abr 24 abr/29 abr	8.09	23.2	14.03	64.14	4	24.7	107	0.992	0.1786	-0.598	14475	11.058	9	17.376	0.08	680	3.96	2.59	0.99	1.23	2.63	1.64	0.89	2.71	2.71
may 1 may/7 may	2.95	17	9.02	72.01	5	18.761	137	0.9787	0.3370	-0.598	13298	10.63	6.8	12.52	0.08	680	2.53	1.96	0.99	0.67	1.27	1.37	0.74	1.35	1.35
may 8 may/14 may	7.53	23.8	14.89	47.01	5	18.761	137	0.9787	0.3370	-0.598	13298	10.63	6.8	12.52	0.08	680	2.90	2.48	0.99	1.72	2.17	1.54	0.83	2.25	2.25
may 15 may/21 may	4.69	18.7	10.86	72.98	5	18.761	137	0.9787	0.3370	-0.598	13298	10.63	6.8	12.52	0.08	680	2.65	2.12	0.99	0.81	1.37	1.58	0.85	1.45	1.45
may 22 may/28 may	4.56	16.8	9.68	77.39	5	18.761	137	0.9787	0.3370	-0.598	13298	10.63	6.8	12.52	0.08	680	2.57	2.02	0.99	0.46	1.06	1.21	0.85	1.14	1.14
may/jun 29 may/4 jun	5.61	18.5	11.48	70.14	6	16.091	168	0.9709	0.4080	-0.598	12719	9.768	5.8	10.447	0.08	680	2.25	2.10	0.99	0.63	0.81	1.15	0.82	0.89	0.89
jun 5 jun/11 jun	2.95	23.8	12.59	56.24	6	16.091	168	0.9709	0.4080	-0.598	12719	9.768	5.8	10.447	0.08	680	2.30	2.19	0.99	1.25	1.40	1.36	0.73	1.48	1.48
jun 12 jun/18 jun	-2.04	24.4	9.09	56.27	6	16.091	168	0.9709	0.4080	-0.598	12719	9.768	5.8	10.447	0.08	680	2.11	1.89	0.99	1.01	1.26	1.08	0.88	1.34	1.34
jun 19 jun/25 jun	6.54	14.3	9.92	79.63	6	16.091	168	0.9709	0.4080	-0.598	12719	9.768	5.8	10.447	0.08	680	2.16	1.96	0.99	0.59	0.82	1.01	0.88	0.90	0.90
jun/Jul 26 jun/2 jul	3.46	22.5	10.29	61.63	6	16.091	168	0.9709	0.4080	-0.598	12719	9.768	5.8	10.447	0.08	680	2.18	1.99	0.99	0.87	1.08	1.11	0.80	1.16	1.16
Jul 3 jul/9 jul	3.32	15.6	8.32	77.96	7	17.489	198	0.9711	0.3687	-0.598	13045	9.9656	7.8	12.166	0.08	680	2.41	2.01	0.99	0.38	0.80	1.01	0.55	0.89	0.89
Jul 10 jul/16 jul	2.47	17.8	7.72	74.89	7	17.489	198	0.9711	0.3687	-0.598	13045	9.9656	7.8	12.166	0.08	680	2.37	1.95	0.99	0.56	1.00	1.25	0.67	1.09	1.09
Jul 17 jul/23 jul	4.56	21.3	10.27	64.45	7	17.489	198	0.9711	0.3687	-0.598	13045	9.9656	7.8	12.166	0.08	680	2.54	2.19	0.99	1.04	1.41	1.47	0.80	1.49	1.49
Jul 24 jul/30 jul	7.84	21.1	10.95	66.08	7	17.489	198	0.9711	0.3687	-0.598	13045	9.9656	7.8	12.166	0.08	680	2.54	2.20	0.99	0.85	1.22	1.27	0.83	1.30	1.30

Imagen 9: Planilla de cálculo de evaporación

Fuente: Elaboración Propia

Agua evaporada en 1 día m3	agua evaporada en la semana	Ton relaves secos sin procesar por día	Ton Relaves secos sin procesar semana	Ley de Cu	Cu Fino (ton)	Recuperacion	Cu Recuperado (ton)	Ley concentrado	Concentrado (ton)	Libras concentrado Cu	Precio del Cu (USD/lib)	Valorizacion Cu
14,453	101,171	12,817	89,717	0.24	215.3	30%	64.60	26%	248.4	142,412	USD 4.082	USD 581,354
13,902	97,314	12,328	86,297	0.24	207.1	30%	62.13	26%	239.0	136,983	USD 4.082	USD 559,194
13,924	97,465	12,347	86,432	0.24	207.4	30%	62.23	26%	239.3	137,196	USD 4.082	USD 560,063
15,152	106,065	13,437	94,057	0.24	225.7	30%	67.72	26%	260.5	149,301	USD 4.082	USD 609,477
13,194	92,360	11,701	81,904	0.24	196.6	30%	58.97	26%	226.8	130,010	USD 4.062	USD 528,101
13,496	94,474	11,968	83,779	0.24	201.1	30%	60.32	26%	232.0	132,986	USD 4.062	USD 540,188
12,968	90,775	11,500	80,499	0.24	193.2	30%	57.96	26%	222.9	127,779	USD 4.062	USD 519,040
13,171	92,197	11,680	81,760	0.24	196.2	30%	58.87	26%	226.4	129,780	USD 4.062	USD 527,168
11,095	77,664	9,839	68,872	0.24	165.3	30%	49.59	26%	190.7	109,323	USD 4.008	USD 438,146
9,407	65,849	8,342	58,395	0.24	140.1	30%	42.04	26%	161.7	92,692	USD 4.008	USD 371,491
9,349	65,440	8,290	58,032	0.24	139.3	30%	41.78	26%	160.7	92,116	USD 4.008	USD 369,183
10,375	72,623	9,200	64,401	0.24	154.6	30%	46.37	26%	178.3	102,227	USD 4.008	USD 409,706
9,609	67,263	8,521	59,648	0.24	143.2	30%	42.95	26%	165.2	94,682	USD 4.008	USD 379,465
7,102	49,716	6,298	44,088	0.24	105.8	30%	31.74	26%	122.1	69,983	USD 3.998	USD 279,791
4,819	33,730	4,273	29,911	0.24	71.8	30%	21.54	26%	82.8	47,479	USD 3.998	USD 189,821
5,134	35,938	4,553	31,870	0.24	76.5	30%	22.95	26%	88.3	50,588	USD 3.998	USD 202,253
4,677	32,738	4,147	29,032	0.24	69.7	30%	20.90	26%	80.4	46,083	USD 3.998	USD 184,240
2,326	16,283	2,063	14,440	0.24	34.7	30%	10.40	26%	40.0	22,921	USD 3.735	USD 85,610
3,886	27,202	3,446	24,123	0.24	57.9	30%	17.37	26%	66.8	38,291	USD 3.735	USD 143,017
2,500	17,503	2,217	15,521	0.24	37.3	30%	11.18	26%	43.0	24,638	USD 3.735	USD 92,022
1,972	13,802	1,749	12,240	0.24	29.4	30%	8.81	26%	33.9	19,428	USD 3.735	USD 72,565

Imagen 10: Planilla de cálculo de oportunidad de procesamiento de relaves

Fuente: Elaboración Propia

11. Conclusiones

En la actualidad, la gestión del recurso hídrico en la industria minera se hace cada vez más importante, es por esto que la medición de la evaporación en embalses se hace imprescindible, sobre todo para Minera Valle Central dado su método de extracción de relaves mediante monitoreo hidráulico. Este enfoque no solo aporta para determinar el agua evaporada, sino que también establece una relación directa de este fenómeno con las oportunidades de procesamiento de relaves.

La asociación de este fenómeno con el método de extracción, da una perspectiva para el manejo del recurso hídrico de forma sustentable para el procesamiento de relaves. Con esta información, Minera Valle Central puede adaptarse y gestionar de mejor manera el recurso para aprovechar el máximo las oportunidades de procesamiento, tomando en consideración las estaciones y variables climáticas.

Además, la identificación de variables críticas que afectan a este fenómeno es crucial. Dada la implementación del método de Penman-Monteith, no solo se cuantifica esta evaporación, sino que también, nos ayuda a identificar estas variables influyentes que tengan un impacto significativo. Esto, permite a Minera Valle Central evaluar medidas de mitigación de evaporación en el Embalse Colihues de manera informada, ayudando a reducir la pérdida de agua y optimizar el procesamiento de relaves.

Por último, la implementación de este sistema de cuantificación de evaporación no solo contribuye a una gestión sostenible del recurso, sino que da paso a una operación más sustentable y consiente con el medio ambiente. La comprensión de este fenómeno y la identificación de variables críticas en este, son claves para la toma de decisiones estratégicas, logrando un equilibrio entre la operación y la preservación del recurso por parte de Minera Valle Central en el marco de la economía circular.

12. Recomendaciones

Considerando los resultados obtenidos durante la implementación del modelo de Penman-Monteith y sus implicancias, se recomienda evaluar medidas de mitigación de la evaporación en el Embalse Colihues, dado que al largo plazo una inversión en tecnologías para evitar este fenómeno sea rentables, especialmente las lonas continuas mencionadas anteriormente, las cuales evitan la Radiación Solar y el Viento.

Por otro lado, se recomienda trasladar el evaporímetro Tanque Clase A, el cual, tendría mejores lecturas a nivel del Embalse y más cerca de este, pero tomando en consideración la remoción de objetos a su alrededor que puedan afectar sus lecturas. A su vez, delimitar el lugar de emplazamiento del evaporímetro para no tener lecturas incorrectas por el consumo de agua de animales, como también, automatizar la lectura con la implementación de un sensor de nivel, para evitar errores humanos en la medición.

Además, se recomienda utilizar el modelo para hacer proyecciones de evaporación futuras, esto para determinar volúmenes críticos para una operación segura y eficiente. También, aplicar consumos de planta, para poder determinar el tiempo con el cual se contará con agua, la que asegure el procesamiento continuo de relaves proveniente del Tranque Cauquenes y los relaves frescos provenientes de Codelco, División El Teniente.

Por último, es importante que Minera Valle Central realice análisis probabilísticos con este modelo, lo cual ayudará a situarse en diferentes escenarios climáticos, los cuales cada vez son más impredecibles debido al cambio climático.

13. Referencias.

1. FAO. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56. Recuperado de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>.
2. Comisión Chilena del Cobre. (2023) *Precio de los Metales*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Precio-de-los-Metales.aspx>.
3. O2 Company. (s.f.). *Competencias*. Recuperado de <https://o2company.live/#competencias>
4. Minera Valle Central. *Historia Minera Valle Central*. Recuperado de <https://mineravallecentral.cl/>
5. Chat GPT. *Formas de medición de evaporación*. Recuperado de <https://chat.openai.com/c/16fc2546-16fe-4231-884a-290ccb0808b5>
6. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning*. Springer. ISBN-13: 978-1461471370.

13. Anexos.

- Modelo Penman-Monteith

Simplified versions of the standardized Penman equation

Substituting the approximate Eqs. (13), (28) and (29) into Eq. (7), an accurate approximate version for the Penman (1948) equation is obtained:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{PEN}} \approx & 0.051(1 - \alpha)R_S \sqrt{T + 9.5} - 0.188(T + 13) \left(\frac{R_S}{R_A} - 0.194 \right) \\
 & \times \left(1 - 0.00014(0.7T_{\text{max}} + 0.3T_{\text{min}} + 46)^2 \sqrt{\frac{RH}{100}} \right) \\
 & + 0.049(T_{\text{max}} + 16.3) \left(1 - \frac{RH}{100} \right) (a_U + 0.536u) \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$R_S = R_A \cdot \left(0.5 + 0.25 \cdot \frac{n}{N}\right), \quad (49)$$

where n is measured bright sunshine hours per day (h); N is the maximum possible duration of daylight (h) that can be estimated from tables or by the following set of equations when the latitude of the site and the number of Julian day (or the month) are given (Shuttleworth, 1993; Allen et al., 1994)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_S, \quad (50)$$

where ω_S is the sunset hour angle (radians) given by

$$\omega_S = \arccos(-\tan(\phi) \tan(\delta)), \quad (51)$$

where δ is solar declination (radians) given by

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (52)$$

where J is Julian day number. For monthly estimations the Julian day corresponding to i th month is calculated as

$$J = \text{INT}(30.5i - 14.6). \quad (53)$$

Finally R_A in MJ/m²/d is calculated as

$$R_A = 37.59 d_r [\omega_S \sin(\phi) \sin(\delta) + \sin(\omega_S) \cos(\phi) \cos(\delta)], \quad (54)$$

Wind function for evaporation from open water

Penman (1948, 1963) originally suggested a wind function of the form: $f_U^{(1)} = 1 + 0.536u$. The original function of Penman (1948) is also recommended by Shuttleworth (1993) for estimating potential evaporation from open water. Later, Penman (1956) suggested a reduction of the original function by proposing $f_U^{(2)} = 0.5 + 0.536u$. In hydrological applications both forms of the wind function are used to estimate open water evaporation, the first one more frequently than the second one (Brutsaert, 1982). Cohen et al. (2002) considered that the original wind function is unrealistically high for open water evaporation and suggested the second one. Linacre (1993) reduced further the value of the wind function proposing $f_U^{(3)} = 0.54u$.

A global climatic data set including monthly data (FAO-CLIMWAT) was applied to compare the results of the Penman model provided using each of the three previously reported wind functions. Regression of the results yields

$$E_{\text{PEN}}|_{f_U=1+0.54u} \approx 1.06 E_{\text{PEN}}|_{f_U=0.5+0.54u} \approx 1.12 E_{\text{PEN}}|_{f_U=0.54u}. \quad (30)$$

- Código regresión lineal y test de multicolinealidad

```
deltamodel=lm(f~datosR$minima+datosR$maxima+datosR$media+
  datosR$HR+datosR$Rs+datosR$viento)
summary(deltamodel)

vif(deltamodel)
```

- Código Test Random Forest

```
# Ajusta un modelo de Random Forest
set.seed(123) # Para reproducibilidad
rf_model <- randomForest(datosR$evaporacion ~ ., data = datosR, importance = TRUE)

# Imprime el resumen del modelo
print(rf_model)

# Visualiza la importancia de las variables
importance(rf_model)
varImpPlot(rf_model)
```