



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL ESCALAMIENTO DE PRUEBAS DE  
LABORATORIO PARA LA PREDICCIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE  
DRENAJE MINERO ÁCIDO EN DEPÓSITOS DE ESTÉRILES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

**PILAR IGNACIA VEGA LIRA**

PROFESORA GUÍA

MARÍA CAROLINA SOTO CABRERA

PROFESORA CO GUÍA

DANIELA VILLABLANCA ESPINOZA

COMISIÓN

LINDA DANIELE

SANTIAGO DE CHILE

2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE GEÓLOGA  
POR: PILAR IGNACIA VEGA LIRA  
FECHA: 11 DE ENERO DE 2021  
PROF. GUÍA: MARÍA CAROLINA SOTO

## EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA EL ESCALAMIENTO DE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA PREDICCIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DRENAJE MINERO ÁCIDO EN DEPÓSITOS DE ESTÉRILES

El proceso de extracción de minerales genera una gran cantidad material que es clasificado como lastre o estéril y que es almacenado en depósitos de estériles. Estos materiales pueden ser fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero ácido debido a su contenido de sulfuros, produciendo acidez al oxidarse y generando la lixiviación y movilización de sulfato y metales. A partir de esto, se han desarrollado estudios de predicción del comportamiento geoquímico de estos materiales, mediante ensayos de laboratorio estáticos y cinéticos, los cuales permiten entender el comportamiento de estos residuos en un rango de tiempo determinado. De los ensayos cinéticos, destacan las celdas de humedad que, si bien entregan una aproximación de cómo podría evolucionar la meteorización de la roca químicamente, son desarrolladas en condiciones de laboratorio controladas, distintas a las condiciones de campo. Es por esto, que se utilizan factores de escala, los cuales consideran correcciones en las celdas de humedad con respecto a parámetros como la temperatura, tamaño de grano, volumen de agua en contacto con la roca, etc., para simular las condiciones de campo y extrapolar los resultados de laboratorio a condiciones reales.

En el presente estudio, se recopiló metodología para encontrar factores de escala que extrapolaran de la manera más realista posible las tasas de lixiviación entregadas por las celdas de humedad. Posteriormente, se seleccionaron 2 de estas metodologías (método razón campo/celda y método empírico), en función de la disponibilidad de información del caso de estudio. Las tasas calculadas fueron convertidas a concentraciones escaladas, verificando la validez de cada factor utilizando una base de datos de celdas de humedad y datos in situ de un caso ejemplo de depósito de estériles construido a partir de un yacimiento tipo pórfido cuprífero ubicado en el Norte de Chile.

Se encontraron un total de 1224 factores de escala, con datos in situ tomados entre 2014 y 2019 a partir de la metodología razón campo/celda, los cuales otorgaron valores de concentraciones simuladas con un buen ajuste a los valores de pH, Cu y  $SO_4$  monitoreados en campo, reproduciendo de manera aceptable las tendencias observadas en terreno, aun cuando no se logran reproducir correctamente las curvas de las series temporales. Mientras que, a partir de la metodología de cálculo empírico, se obtuvieron 4 subfactores para corregir los siguientes parámetros: temperatura, tamaño de grano, volumen de agua en contacto con la roca y concentración de oxígeno. Se utilizó la recomendación de Morin (2013) de no utilizar más de 3 factores, lo que dio como resultado valores de concentraciones sobreestimados y poco realistas, por lo que se agregó un cuarto factor, entregando valores de concentraciones simuladas más ajustadas para el  $SO_4$ , pero sobreestimadas para el Cu y el pH; revalidando la importancia de generar un factor de escala distinto para cada elemento. Para ambos casos, las curvas de las concentraciones simuladas en el tiempo no se lograron ajustar correctamente para el  $SO_4$ , Cu y pH a las curvas de concentraciones monitoreadas a pie de botadero por lo que se recomienda la utilización de programas de modelación geoquímica como complemento para tener un mayor acercamiento con respecto a la evolución química y mezclas asociadas, así como de la dinámica de los flujos de circulan a través de los depósitos de estériles.

# Agradecimientos

Quiero partir agradeciendo a mi profesora guía Carolina Soto, por “adoptarme” como memorista en la empresa y ayudarme en este proceso, por su buena disposición siempre y por guiarme constantemente en las variadas revisiones del borrador que se hacía infinito.

También quiero agradecer a la Daniela Villablanca y al Aldo Anselmo, por su disposición a ayudarme, aportándome con comentarios, ideas y correcciones durante todo el proceso de escritura. Sin su apoyo no habría sido posible entregar este trabajo. Al grupo de Geoquímica, por compartirme sus conocimientos y por los aprendizajes que me han dejado desde que entré como practicante hasta hoy.

A la profesora Linda Daniele, por apoyarme las veces que lo necesité de la mejor manera y con la mejor disposición.

A la Blanca Baccola, secretaria del departamento de Geología, por siempre estar ahí para responder la infinidad de preguntas que surgieron durante todo el proceso.

A mi mamá y papá gracias por todo, por el esfuerzo y sacrificio que han hecho para darme una buena educación, por apoyarme, educarme, guiarme e inculcarme valores, por amarme y por convencerme de que puedo lograr todo lo que me proponga.

A mi familia, a mis hermanos por soportarme en mis momentos de mal humor y estrés. A mis abuelos, por preocuparse por mí, aconsejarme y educarme con sus experiencias de vida.

Al Andrés, por la preocupación, cariño y apoyo durante todo este tiempo

A mis amigas de plan común, Belén, Cami, Cynthia, Panchi, Cane, Dani, Tania, Pollo, por su gigante amistad y apoyo durante todo el ciclo universitario, por las risas, por esos buenos carretes, por todos los logros y tragedias juntas, por hacer la universidad un lugar mucho más amigable y entretenido. A la gente bacán que conocí en Geo (Mención honrosa al Carlos, Titi, Keno, Juan, Ale, Abuelo, Juanma, Vicho, Migue, entre muchos), por las inolvidables tardes en los naranjos, las sesiones de trabajo intenso en la salita, las salidas a terreno y esos paseos exprés que nos sacábamos y terminábamos hablando de la vida. Gracias por tanto (perdón por tan poco).

Destacar a mi grupo de Campo II, Keno y Carlos, que más que ser un grupo de campo, se convirtió en el grupo hidroquímico favorito de apañe en todo este proceso del trabajo de título “modo online”, resolviéndonos dudas y dándonos ánimo de que no era imposible terminar el borrador (a pesar de siempre estar queriendo prórrogas, jugando age, haciendo deporte o simplemente procrastinando). Espero que sigamos juntos, tanto como amigos, como colegas.

Gracias a mis amigos del colegio Joaquín, Christian, Camilo, Nury, por los buenos momentos, por esas salidas en bici/cerro y por apañar siempre, y en especial a mis amigas de la vida Javi y Pancha, gracias por seguir estando, por apoyarme en las buenas y en las no tan buenas, por los consejos, por todas las risas, cahuines, salidas a carretear y por un montón de años más juntas.

# Tabla de Contenido

Resumen .....	i
Agradecimientos .....	ii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo General .....	2
1.2.2. Objetivos Específicos .....	2
1.3. Hipótesis de trabajo .....	3
1.4. Metodología.....	3
1.5. Alcances .....	4
2. Antecedentes.....	5
2.1. Depósitos de estériles.....	5
2.1.1. Características de un depósito de estériles .....	6
2.1.2. Procesos geoquímicos dentro de un depósito de estériles .....	8
2.2. Drenaje Minero.....	10
2.2.1. Reacciones de generación de acidez .....	11
2.2.2. Factores controladores de la generación de acidez .....	12
2.3. Técnicas de caracterización geoquímica.....	13
2.4. Factores de Escalamiento.....	16
2.4.1. Factores de escala individuales y rango de valores.....	18
2.5. Estudios Previos .....	21
2.5.1. Enfoque 1: Razón tasas de campo vs tasas de laboratorio.....	21
2.5.2. Enfoque 2: Cálculo de factores individuales.....	24
3. Metodología de aplicación al caso estudio.....	28

3.1.	Caracterización del caso estudio.....	28
3.2.	Base de datos de tasas de lixiviación.....	33
3.3.	Obtención de un factor de escala.....	34
3.4.	Aplicación de factores de escala.....	35
3.5.	Validación de las metodologías.....	37
4.	Resultados.....	39
4.1.	Metodologías seleccionadas.....	39
4.2.	Factor de Escala.....	40
4.1.1.	Método razón Campo/Celda de humedad.....	40
4.1.2.	Método cálculo empírico.....	42
4.3.	Tasas de lixiviación.....	45
4.4.	Tasas de lixiviación escaladas.....	47
4.5.	Concentraciones escaladas.....	48
4.5.1.	Método razón Campo/Celda de humedad.....	48
4.5.2.	Método cálculo empírico a partir de 3 subfactores de escala.....	50
5.	Discusión.....	52
5.1.	Metodologías seleccionadas.....	52
5.2.	Factores de Escala.....	54
5.2.1.	Método razón campo/celda de humedad.....	54
5.2.2.	Método cálculo empírico.....	57
5.3.	Concentraciones escaladas.....	61
5.3.1.	Concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 3 subfactores de escala.....	61
5.3.2.	Concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología de razón campo/celda.....	65
6.	Conclusiones.....	70
7.	Glosario.....	71

8. Bibliografía..... 72

# Índice de Figuras

Figura 1: Representación conceptual de la estructura interna de un depósito de estériles (Modificado de Aubertin et al, 2005). .....	6
Figura 2: Perfil esquemático para modelo conceptual hidrológico de un depósito de estériles (Elaboración Propia). .....	9
Figura 3: Esquema de los procesos físicos/químicos que ocurren dentro de un depósito de estériles. (Imagen extraída de Amos, et al. 2015). .....	10
Figura 4: Etapas de la generación de DMA a partir de la oxidación de la pirita. Imagen extraída de Sernageomin 2015. ....	12
Figura 5: Celda húmeda para roca estéril. (Imagen extraída de MEND, 2000). .....	15
Figura 6: Valores de precipitaciones promedio mensual del sector. ....	29
Figura 7: Valores de temperaturas promedio mensual del sector. ....	29
Figura 8: Modelo hidrológico simple del depósito de estériles del caso estudio. ....	30
Figura 9: Promedios de pH, conductividad eléctrica, sulfato y cobre por semana de análisis para celdas de humedad con material primario y no primario, .....	32
Figura 10: Diagrama con tasas de lixiviación utilizadas. ....	34
Figura 11: Variación temporal de pH, conductividad eléctrica, sulfato y cobre para el punto de monitoreo ABDP. ....	38
Figura 12: Porcentajes de grupos de factores de escala según lugar del decimal .....	41
Figura 13: Distribución de flujos en el depósito de estériles estudiado. Flechas celestes indican flujo no saturado. Flechas azules indican flujo saturado. Bandera roja indica punto ABDP de monitoreo. ....	42
Figura 14: Tasa de reacción de la pirita en función de la temperatura a partir de la energía de activación de la pirita en 50 y 60 KJ/mol. (Información extraída de MEND,2006). ....	44
Figura 15: Variación temporal de las concentraciones escaladas de $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda. ....	49
Figura 16: Variación temporal de las concentraciones escaladas de $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica. ....	51
Figura 17: Resultados de factores de excedencia obtenidos para elementos mayores y menores/traza para celdas de humedad. ....	55

Figura 18: Factores de excedencia para elementos mayores y menores de Kirchner & Mattson 2015 para celdas de humedad y barriles. ....	55
Figura 19: Histograma de factores de escala calculados por cantidad, obtenidos por Lapakko 2015. ....	56
Figura 20: Área de superficie de partícula en función del tamaño de partícula para partículas cúbicas (Extraído de SRK Consulting (2006)).....	59
Figura 21: Variaciones temporales para las concentraciones de $SO_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 3 factores de escala. ....	62
Figura 22: Variaciones temporales para las concentraciones de $SO_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 4 factores de escala. ....	64
Figura 23: Variaciones temporales para las concentraciones de $SO_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda	66
Figura 24: Variación en el tiempo de caudal para flujo saturado y flujo insaturado .....	67

# Índice de Tablas

Tabla 1: Resumen de cambios de condiciones entre laboratorio y campo (Tabla extraída de Muhammad 2018).....	17
Tabla 2: Resumen de rango/valores de factor de escala encontrados en estudios previos .....	23
Tabla 3: Resumen métodos para encontrar valores de subfactores de escala individuales .....	27
Tabla 4: Rango de valores propuestos para cada factor de escala.....	35
Tabla 5: Promedio de parámetros químicos principales monitoreados entre 2016 y 2019 del punto de monitoreo ABDP.....	37
Tabla 6: Promedio de factores de escalas calculados a partir de la razón campo/celda .....	40
Tabla 7: Grupos de factores de escala según lugar del decimal .....	41
Tabla 8: Resumen de los factores de escala de temperatura por mes .....	43
Tabla 9: Promedio tasas de lixiviación de “first flush” por elemento para material primario y no primario.....	45
Tabla 10: Promedio tasas de lixiviación de “estables” por elemento para material primario y no primario.....	46
Tabla 11: Promedio de tasas escaladas para $SO_4$ , Cu y $H^+$ por tipo de flujo, tipo de metodología de factores de escala y tipo de material.....	47
Tabla 12: Valores de concentraciones escaladas de $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda.....	48
Tabla 13: Valores de concentraciones escaladas de $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica. ....	50
Tabla 14: Factores de escala para el contacto con el agua a través del tiempo para Eagle Gold (Extraído de StrataGold 2014).....	57
Tabla 15: Resumen de los factores de escala para corregir la temperatura (Extraído de StrataGold 2014) .....	58
Tabla 16: Valores de subfactores de escala para trabajos comparados .....	60
Tabla 17: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y $SO_4$ para concentraciones escaladas a partir de metodología empírica con 3 subfactores y Punto ABDP.....	61
Tabla 18: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y $SO_4$ para concentraciones escaladas a partir de metodología empírica con 4 subfactores y Punto ABDP.....	63

Tabla 19: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y $SO_4$ para concentraciones escaladas a partir de metodología razón campo/celda y Punto ABDP. ....	65
--	----

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

El proceso de extracción de minerales genera una gran cantidad de material que es clasificado como lastre o estéril y que es almacenado en depósitos de estériles. En algunos casos, estos acopios también pueden incluir material de baja ley que puede o no ser reprocesado posteriormente.

En general, los depósitos de estériles pueden ser fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero ácido dada la existencia de sulfuros en cantidades variables, siendo la más influyente la pirita, la cual produce la mayor cantidad de acidez al oxidarse debido a procesos controladores como el transporte de gas y oxígeno, calor y agua; reacciones de neutralización y acidificación y actividad microbiana (Amos et al., 2015).

Estos residuos pueden llegar a ser perjudiciales para el medioambiente, impactando negativamente a la calidad del agua aguas abajo por lo que es de suma importancia que se encuentren estables químicamente.

Dado esto, es que se hace necesario generar estudios de predicción con respecto a la estabilidad química de estas fuentes potencialmente generadoras de drenaje minero, a través de estudios tanto de campo como de laboratorio. Actualmente, para lograr una caracterización de estos residuos se utilizan técnicas de laboratorio que complementan modelos conceptuales y numéricos, los cuales pueden generar un acercamiento al comportamiento de estos en un rango de tiempo determinado, pudiéndose evaluar futuros escenarios y establecer ciertas medidas de prevención y contención para evitar posibles impactos ambientales en la zona.

Unos de los principales métodos de análisis para determinar el potencial de generación de drenaje minero ácido, es el uso de ensayos de laboratorio estáticos y cinéticos, los cuales, utilizados de manera conjunta proveen información relevante con respecto al comportamiento geoquímico de los materiales en análisis (Sapsfors et al., 2009). Dentro de los ensayos cinéticos, los más utilizados corresponden a las celdas de humedad, las cuales simulan los procesos geoquímicos de meteorización a través de ciclos de humedad e inundación, donde se genera un lixiviado que es liberado y recolectado para su consecuente análisis químico, entregando concentraciones de elementos a pequeña escala. Si bien estos entregan una aproximación de cómo podría evolucionar la meteorización de la roca químicamente, se debe considerar que las condiciones de laboratorio son distintas a las producidas en campo, diferenciándose, por ejemplo, en el tamaño de partícula, temperatura, etc., por lo que es necesario aplicar una metodología que permita extrapolar a una mayor escala estos resultados.

Esto último es posible a partir de factores de escalamiento. Estos factores consideran parámetros que pueden influir en la meteorización de la roca y su tasa, incluyendo la temperatura, la distribución del tamaño de partícula, el contenido de sulfuro-mineral, el área de superficie, el pH del agua de poro, el contenido de humedad, el tiempo de contacto agua-roca y la concentración de  $O_2$  (Kempton, 2012; Amos et al., 2015) como algunos ejemplos de estos. Cabe destacar que estos no están exentos de errores, y pueden subestimar/sobreestimar los valores de concentraciones de elementos reales.

Actualmente, si bien existe bibliografía y estudios publicados relacionados al escalamiento a partir de factores de escala para depósitos de estériles, estos se centran principalmente en el extranjero, siendo para el caso de Chile, casi nula la existencia pública de este tipo de investigaciones a pesar de la gran cantidad de empresas mineras establecidas en el país y la importancia que tiene el escalamiento de ensayos al momento de caracterizar el tipo de drenaje generado y la calidad del agua de contacto que emana de estos a escala real.

El presente trabajo pretende evaluar distintas metodologías de escalamiento existentes para el análisis del potencial de generación de drenaje minero ácido a partir de pruebas de laboratorio, enfocado principalmente en el escalamiento de los resultados, desde escala de laboratorio a escala de un depósito de estériles en campo. Esto aportará información relevante para futuros estudios enfocados a la toma de decisiones en relación con medidas de control/mitigación según corresponda al caso.

Cabe destacar que se abordará solo el estudio enfocado a depósitos de estériles, por lo que los depósitos de relaves quedan excluidos de este trabajo.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es evaluar distintas metodologías de escalamiento de resultados de pruebas de laboratorio utilizadas para caracterizar y/o predecir el potencial de generación de drenaje minero ácido y lixiviación de metales de un depósito de estériles, de manera de extrapolar estos resultados a una mayor escala.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

1. Determinación de parámetros hidrogeológicos principales, características físicas y procesos geoquímicos que ocurren dentro de un depósito de estériles.
2. Identificación de factores controladores de procesos geoquímicos dentro de los depósitos de estériles y sus componentes relevantes.
3. Establecer los parámetros escalables en depósitos de estériles.
4. Análisis de las metodologías utilizadas para el escalamiento empírico de pruebas de laboratorio a partir de factores de escalamiento, con sus parámetros escalables y rangos correspondientes.
5. Aplicación de las metodologías escogidas a evaluar a un caso ejemplo de depósito de estériles en el Norte de Chile.
6. Comparación de las metodologías evaluadas.

## 1.3. Hipótesis de trabajo

Existen diversas metodologías para encontrar factores de escala que extrapolan ensayos de laboratorio, las cuales tienden a tener resultados variables según las características del depósito de estériles y del sitio en que se encuentra este. La utilización de distintos enfoques metodológicos de escalamiento de ensayos de laboratorio para la predicción del potencial de generación de drenaje minero ácido en depósitos de estériles permitirá obtener resultados a mayor escala (campo) comparables y consistentes entre sí.

## 1.4. Metodología

Para poder cumplir con los objetivos específicos propuestos anteriormente, a continuación, se indica la metodología de trabajo definida:

1. Revisión bibliográfica:
  - 1.1. Recopilación de antecedentes de fundamentos teóricos de hidrogeoquímica, además de las características físicas y procesos relacionados a la oxidación de sulfuros y carga de solutos de los depósitos de estériles.
  - 1.2. Recopilación de antecedentes acerca de factores que regulan los procesos dentro de los depósitos de estériles y componentes relevantes que influyen en éstos.
  - 1.3. Identificación de los parámetros escalables en un depósito de estériles a partir de la determinación de los parámetros físicos, hidrológicos e hidrogeoquímicos recopilados de la revisión de antecedentes.
2. Desarrollo metodológico: identificación de las metodologías utilizadas para el escalamiento de concentraciones de elementos resultantes de pruebas cinéticas a partir del material rocoso de los depósitos de estériles en estudios anteriores. A partir de la revisión de estas, escoger las distintas metodologías a evaluar para el escalamiento de las concentraciones de cada elemento, estableciendo los parámetros escalables seleccionados con rangos de valores propuestos.
3. Evaluación de las metodologías seleccionadas: Aplicación de las metodologías seleccionadas a un caso de depósito de estériles específico en Chile, cuyos parámetros químicos y condiciones ambientales son conocidas (adquiridas por la consultora WSP), para caracterizar su potencial de generación de drenaje minero ácido a partir del escalamiento de resultados obtenidos en pruebas de laboratorio realizadas previamente (celdas de humedad).
4. Comparación de las metodologías desarrolladas aplicadas para el caso específico determinado anteriormente, evaluando el desempeño de los factores de escala aplicados y revisando la consistencia de los rangos de valores de los factores propuestos.

## 1.5. Alcances

El desarrollo de las distintas metodologías a evaluar presenta limitaciones con respecto a su interpretación de la realidad. En este caso, las principales limitaciones y supuestos corresponden a:

- El trabajo no considera el tiempo de permanencia de los elementos dentro del botadero, considerando así, que los elementos lixiviados serán inmediatamente expulsados de este.
- Debido a la falta de desarrollo de experimentos que entreguen datos específicos para el cálculo de distintos subfactores de escala, se utilizaron algunos subfactores propuestos en trabajos revisados, en los cuales, los botaderos en estudio tenían características similares al de este trabajo.
- Existe una incertidumbre de la composición química real de los distintos flujos de agua que interactúan con el botadero y del volumen real de material que interactúa con cada tipo de flujo conceptualizado en el botadero, por lo cual se asume y utilizan tasas de lixiviación obtenidas desde celdas de humedad para representar la composición de los distintos flujos.
- Se supuso un estado estacionario para los flujos de agua, es decir, que la velocidad del flujo, su volumen y la concentración de metales que estos contienen no cambian con el paso del tiempo, dado que, para ejemplos de ensayos de laboratorio cinéticos, existe un cambio de comportamiento de estado transitorio a un estado estable.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Depósitos de estériles

Las operaciones mineras generan una serie de residuos, como el material sin interés económico que se extrae para llegar al depósito mineral (roca estéril), así como el material que se desecha a partir del procesamiento de los minerales (relave minero). Estos deben ser depositados en zonas establecidas: para el caso de los primeros, se desechan en depósitos de estériles (o botaderos) y para el caso de los segundos, en depósitos de relave.

Los primeros son generados a partir de explosiones (tronaduras) realizadas con la finalidad de extraer el mineral, los cuales generan una considerable cantidad de rocas de diferentes tamaños, que van desde arcillas a grandes bolones. Estas se depositan en grande pilas o sitios definidos para su depósito generalmente cercano al rajo, denominados depósitos de estériles. Las propiedades físicas y mineralógicas de estas rocas dependen principalmente de la naturaleza de la formación geológica original y de los métodos usados en la operación minera.

Los depósitos de estériles, además de ser pilas de desechos estériles, son zonas generalmente de tamaños de partículas gruesos, no saturadas, de decenas a cientos de metros de altura que se componen de materiales física y químicamente heterogéneos, presentando gran variabilidad en tamaño, textura, permeabilidad, macroporos, fracturas y roturas capilares (Nichol et al., 2005). Además, la estructura interna de un depósito de estériles depende en gran medida del método con el que se deposita el material, que a su vez depende de las condiciones del sitio y la disponibilidad de equipos (Fala et al., 2003).

En un inicio, estos depósitos de estériles no eran caracterizados ni estudiados debido a la poca importancia económica que estos tendrían, pero en el último tiempo, muchos botaderos han sido objetos de estudios dado los posibles problemas de generación de acidez y lixiviación de metales, que podrían afectar a su entorno de depositación, así como también, por las posibilidades de reprocesamiento y aprovechamiento económico de estos materiales.

Los depósitos de estéril se ven afectados por agentes externos como, por ejemplo, el clima al que se ve expuesto el material, gatillando o acelerando los procesos de meteorización y oxidación del material rocoso depositado en éstos.

La estructura interna de un depósito de estériles va a ser determinante en cómo los agentes externos afectarán a éste, y se ve influenciada por diversos factores, como la geología original, el tipo de operación minera, las prácticas de construcción y las condiciones climáticas (Azam et al., 2006). Cabe destacar que la configuración interna del depósito irá variando según el tiempo, debido a los procesos de meteorización física y química sobre los materiales depositados (Molson et al., 2005).

## 2.1.1. Características de un depósito de estériles

### Características Físicas

Estructura interna y heterogeneidad: La heterogeneidad física y química y la estructura interna de un depósito de estériles afecta a los patrones de la meteorización química, como a la vez, a los procesos físicos de transporte, incluyendo el gas, agua y el calor. La heterogeneidad y la estructura interna están controlados por una serie de factores, incluyendo el carácter físico, mineralógico y carácter químico del mineral que se encuentra en las rocas del depósito. Las técnicas de construcción y depositación son los que definirán la estructura interna de éstos, la cual se basará en un ordenamiento a partir de la gravedad (mayores partículas tenderán a irse a la base). La construcción del botadero normalmente se lleva cabo en varios bancos, con grandes tamaños de roca que caen a su base, concentrándose las fracciones más finas en la parte superior. Además, se desarrollan superficies compactadas en la parte superior de cada banco debido al movimiento de equipos existentes en la superficie.

Tamaño de partícula: El tamaño de partícula de un depósito de estériles puede variar desde escalas de 1m (bolones) a milímetros (tamaño arcilla). Dentro de éstos, se pueden considerar prácticamente dos fracciones: la parte fina, donde la fuerza de capilaridad es importante, y la parte más gruesa donde esta última no es tan relevante. Las propiedades geoquímicas e hidrogeológicas de los botaderos dependerán de la fracción relativa de materiales finos a gruesos, y de la distribución de los tamaños partículas sin la fracción fina. Un importante aspecto del tamaño de partícula es la correlación con el área de superficie, siendo esta última un control primario en la tasa de oxidación de azufre (a mayor área de superficie, mayor será la exposición del azufre a agentes externos que pueden generar oxidación).

Conjugando ambas características físicas mencionadas, se puede observar que ambas se relacionan estrechamente. Los depósitos de rocas estériles tienen una gradación de fino a grueso desde lo alto a la base, implicando una reactividad que también estará gradada desde lo alto a lo bajo verticalmente. A partir de esto, nace la característica de heterogeneidad en la estructura interna de los depósitos de estériles de mina, por lo que son complementarias.

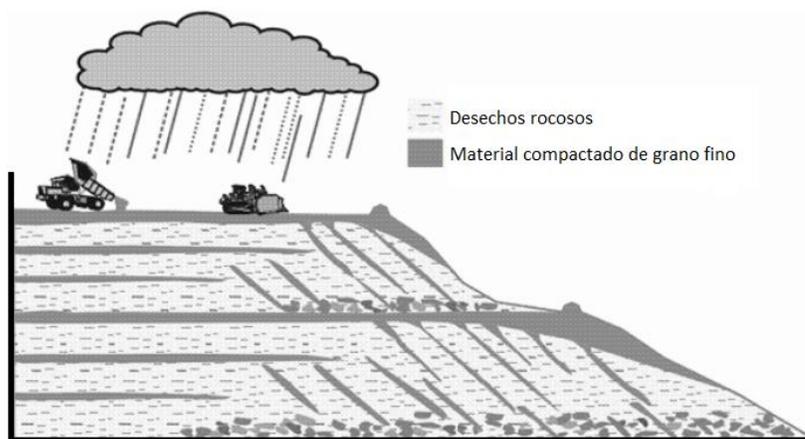


Figura 1: Representación conceptual de la estructura interna de un depósito de estériles (Modificado de Aubertin et al, 2005).

Permeabilidad: El flujo de fluidos y los procesos de transporte químico y térmico en los depósitos de estériles están fuertemente controlados por la permeabilidad existente en este, la cual se encuentra condicionada principalmente por el tamaño de grano y la estructura interna del mismo. En cada banco del depósito de estériles, existe una zona superior sub-horizontal de grano fino compactada por la circulación de maquinarias y equipos en la superficie, generando una capa de menor permeabilidad, donde la infiltración se hace mucho más lenta en comparación con las zonas existentes de material con grano más grueso, como, por ejemplo, la base de los depósitos de estériles (Fala et al., 2005).

Conductividad térmica: Es un parámetro importante que controla el transporte de calor en los depósitos de estériles. Este depende de otros parámetros, como el tipo de roca, el fluido de poro y la temperatura (Robertson, 1988). En un depósito de estériles, la conducción de calor se da principalmente a través del contacto entre partículas, donde un mayor contenido de agua crea una capa alrededor de los puntos de contacto que existen entre estas y mejora la conducción de calor entre los granos (Harries y Ritchie, 1981).

## Mineralogía

Dentro de los depósitos de estériles, existen minerales que ejercen influencia sobre la generación acidez producto de agentes externos. La oxidación de minerales sulfurados, la formación de minerales secundarios y las reacciones de acidificación/neutralización han sido bien documentadas en depósito de estériles con sulfuros. La pirita y la pirrotina son los minerales más comunes con azufre en estos desechos mineros, con la existencia de otros en menor cantidad, como la arsenopirita, esfalerita o calcopirita.

Los productos de alteración relacionados a estos minerales incluyen azufre nativo, marcasita y sulfatos de hierro que se encuentran como bordes de alteración en pirrotina inalterada. Oxihidróxidos de hierro también se encuentran como bordes de alteración. La oxidación continua dará como resultado el agotamiento de pirrotina y marcasita secundaria, y la oxidación de pirita con oxihidróxidos de hierro como producto de alteración primario. En las primeras etapas de la meteorización, comúnmente se observa una alteración en la biotita, pero no en moscovita ni feldespatos. Las etapas tardías de oxidación están marcadas por un agotamiento casi completo de pirrotina y aparición de goethita como el principal oxihidróxido de Fe. Además, minerales como el yeso o la jarosita van a contribuir a la generación de drenaje minero ácido por la apertura de los planos de foliación de la roca, lo cual incrementará el acceso de oxígeno a los cristales de pirita previamente encapsulados (Sracek et al., 2004).

## 2.1.2. Procesos geoquímicos dentro de un depósito de estériles

### Procesos relacionados a la oxidación de sulfuros y cargas de soluto

Geoquímica y tiempo de residencia de un flujo de agua: El estudio de los sulfuros de hierro es de gran importancia para depósitos de estériles de yacimientos tipo pórfido cuprífero. La exposición de estos minerales al oxígeno y agua generan cambios en las condiciones geoquímicas del depósito de estériles en cuestión. Estas condiciones están determinadas por la relación de los procesos de producción de acidez y los procesos de neutralización, las cuales además determinan la movilidad de los elementos y metales liberados. La liberación de metales es un proceso complejo, que depende de la mineralogía del depósito de estériles y la presencia de agua y oxígeno, siendo un importante factor la cantidad y el tiempo de residencia en que el agua está en contacto con la superficie de la roca y/o mineral, controlando la calidad del drenaje.

Existe una relación general entre el volumen de salida y la química en la roca estéril del depósito de estériles (Wagner et al., 2006). Los flujos de agua que fluyen más lentamente tendrán una mayor carga disuelta debido al mayor tiempo de contacto con una mayor área de superficie, mientras que los flujos que fluyen más rápido, asociados a eventos de precipitación, generaran un flujo vertical variable. Generalmente, el agua que se descarga en la base del depósito de estériles está compuesta típicamente por ambos tipos de flujo, pero puede estar dominado por un flujo u otro dependiendo de las condiciones del sitio, el contenido de humedad y la época del año (Smith y Beckie, 2003; Nichol et al., 2005).

Microbiología: Algunas especies de bacterias (como la Thiobacillus y la Acidithiobacillus) son conocidas por acelerar la generación de drenaje ácido. La oxidación del azufre contenido en la roca, mediado por una bacteria, puede ocurrir como mecanismo de contacto o no contacto (Hallberg and Johson, 2001). La oxidación a partir del mecanismo de contacto incluye la unión de una célula o bacteria a un mineral sulfurado y la generación de un agente oxidante ( $Fe^{+3}$ ) entre la pared celular y la superficie del mineral que oxida al mineral sulfurado (Rohwerder et al.; 2003). El mecanismo por no-contacto envuelve la oxidación de la disolución de  $Fe^{+2}$  a  $Fe^{+3}$  que subsecuente oxida al mineral sulfurado, devolviendo el  $Fe^{+2}$  al ciclo (Rohwerder et al.; 2003).

Hidrología: Dentro de un depósito de estériles, existen procesos hidrológicos que determinarán la cantidad y flujos de agua que circularán por este, generando procesos como disolución o precipitación al interactuar con las rocas. La cantidad de agua disponible para la oxidación de los sulfuros y lixiviación de elementos es función de varios procesos:

- Infiltración neta: La infiltración neta de un depósito de estériles va a estar dada por:

$$\text{Infiltración neta} = \text{Precipitación} - \text{Evaporación} - \text{Escorrentía}$$

Esta se estima realizando un balance hidrológico del depósito de estériles. A partir de la Figura 2, se observa que la precipitación puede infiltrar la superficie del depósito de estériles o fluir lateralmente por sus laderas como escorrentía superficial. El agua infiltrada se almacena en los poros que existen en la zona superficial, pudiendo ser removida debido a la evaporación. Finalmente, el agua que no es afectada por la evaporación ni escorrentía

superficial se mueve a través de los poros existentes en el depósito de estériles y se infiltra al interior de este, generándose la infiltración neta.

- Flujo de agua: Estos tipos de depósitos pueden presentar dos tipos de zonas: saturadas y no saturadas, dependiendo del contexto hidrológico, ubicación y balance hídrico conceptual del depósito, todas características sitio específicas. Debido a la distribución heterogénea de las partículas en la estructura interna, en las zonas de mayor tamaño de grano el agua no será retenida y fluirá a través de estas capas, generando condiciones de mayor humedad (zonas no saturadas) hasta llegar a las capas de grano fino, en donde será almacenada y transportada en condiciones de menor humedad y mayor saturación (zonas saturadas).

Así, se puede realizar un modelo conceptual simple de dos dimensiones de los parámetros hidrológicos relevantes que afectan en el comportamiento del flujo de agua que atraviesa el depósito de estériles (Figura 2).

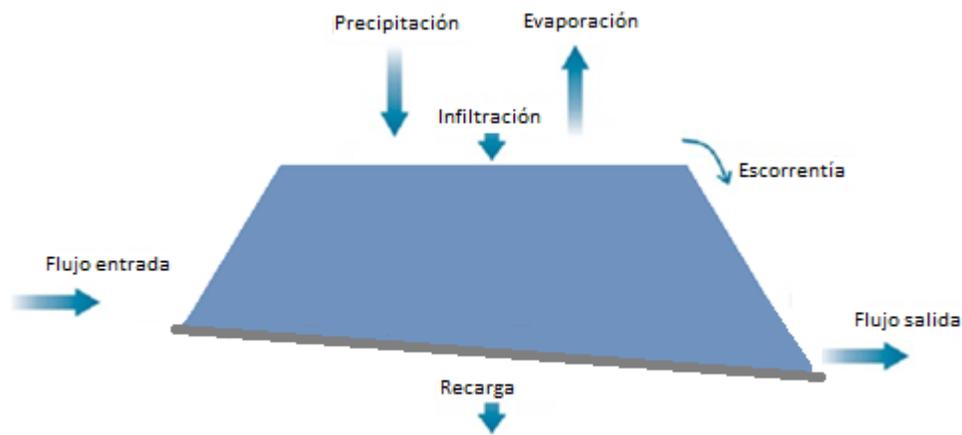


Figura 2: Perfil esquemático para modelo conceptual hidrológico de un depósito de estériles (Elaboración Propia).

Estos procesos van a determinar la movilización de los solutos, la velocidad de transporte de éstos y sus concentraciones en el lixiviado fuera del depósito de estériles. La activación de cada uno de estos dependerá de las propiedades físicas del botadero y de las condiciones hidrológicas, tanto como la magnitud y el momento de la precipitación (sólida y/o líquida) y la consecuente infiltración de ésta (Amos et al., 2015).

Transporte de gas: los gases, en general, pueden transportar una cantidad de calor significativa, la cual puede influenciar la temperatura del depósito de estériles. Dentro de éstos, el oxígeno es el primer reactante para la oxidación de un sulfuro y, por lo tanto, un factor controlador de la tasa de oxidación de éstos (Amos et al., 2015), siendo el principal gas que afecta a la oxidación. Los procesos de transporte de los gases incluyen: el transporte de gases disueltos en aguas infiltradas, transporte difusivo en la fase gaseosa, y transporte advectivo en la fase gaseosa (Amos et al., 2015). El proceso dominante estará determinado por las propiedades físicas y geoquímicas del depósito de estériles y de las condiciones ambientales (Amos et al., 2015).

Transporte de calor: Este proceso está directamente ligado a los procesos geoquímicos que ocurren dentro de un botadero, así como también al transporte de gas. Está controlado por las condiciones del ambiente donde se encuentra depositado el botadero, el contenido de sulfuros que éste contiene y sus propiedades físicas.

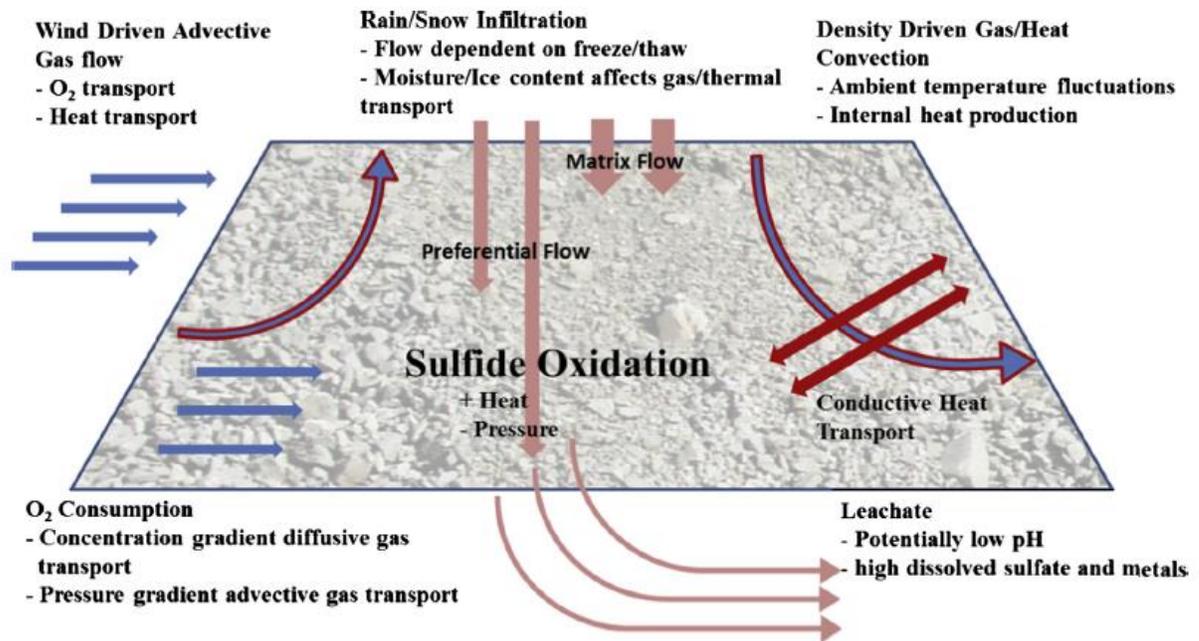


Figura 3: Esquema de los procesos físicos/químicos que ocurren dentro de un depósito de estériles. (Imagen extraída de Amos, et al. 2015).

## 2.2. Drenaje Minero

Se define como drenaje minero al efluente generado producto de la interacción entre las fuentes potencialmente generadoras y los factores ambientales. Existen distintos tipos de drenaje minero, siendo para el presente estudio, el drenaje más relevante el drenaje minero ácido. Este es uno de los principales problemas ambientales que genera la actividad minera. Se genera por la interacción de minerales (como sulfuros) con los factores ambientales (agua y oxígeno principalmente) dando como resultado en aguas infiltradas, una disminución del pH debido a la oxidación de los minerales sulfurados y la consecuente lixiviación de sulfato y metales existentes en las rocas de contacto. Este proceso se puede dar de forma natural, pero se ve favorecido por actividades mineras donde los residuos mineros quedan expuestos en la superficie, acelerándose y potenciando los procesos de oxidación de los sulfuros.

Cabe decir que no todos los residuos mineros contienen sulfuros, por lo que no todos generarán drenaje minero ácido. El principal mineral que actúa es la pirita ( $FeS_2$ ), dado que es uno de los sulfuros más abundantes y el que produce mayor acidez al reaccionar con los factores ambientales. Otros sulfuros que actúan, pero en menor importancia, son la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), arsenopirita ( $FeAsS$ ), esfalerita ( $ZnS$ ) y galena ( $PbS$ ). Este proceso continuará hasta que uno de los reactantes participantes se agote o no esté disponible para poder reaccionar.

## 2.2.1. Reacciones de generación de acidez

El proceso de oxidación de sulfuros se describe principalmente con la evolución de la oxidación de la pirita, debido a la importancia de este mineral en la generación de drenaje minero ácido en los depósitos de estériles. Su oxidación se puede caracterizar en 3 etapas en función del pH a partir del modelo presentado por Broughton y Robertson (1992), donde la duración de cada una de estas etapas dependerá de los factores involucrados, pudiendo variar desde días hasta años.

A continuación, se describen cada una de estas etapas (Sernageomin, 2015):

Etapa 1: Ocurre la oxidación de la pirita ( $FeS_2$ ) a partir del oxígeno ( $O_2$ ) (principalmente), liberando protones ( $H^+$ ), sulfatos e iones ferrosos al medio en que se encuentra, en condiciones neutras a alcalinas, generándose un pH del drenaje mayor a 4,5.



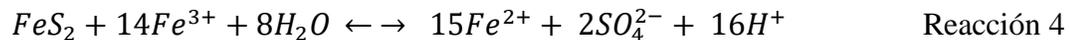
Además, un ion ferroso reacciona con oxígeno, formando un ion férrico:



Etapa 2: Ocurre la oxidación de hierro ferroso ( $Fe^{2+}$ ) a hierro férrico ( $Fe^{3+}$ ) en forma de hidróxidos y oxihidróxidos. La liberación de protones continúa y el pH disminuye en comparación a la etapa 1, variando entre 3,5 y 4,5.



Etapa 3: Ocurre la oxidación del hierro ferroso a hierro férrico debido a la presencia de bacterias aeróbicas. La liberación de protones aumenta ( $16H^+$ ) al igual que los sulfatos, por lo que la acidez del medio aumenta también. Una vez consumida la alcalinidad disponible, el ion férrico ya no hidroliza, por lo que pasa a ser un agente oxidante químico de los minerales sulfurosos, alcanzándose un pH menor a 1,5.



La solución química generada en esta etapa se caracteriza por tener una alta concentración de sulfatos y hierro total (MEND, 1995).

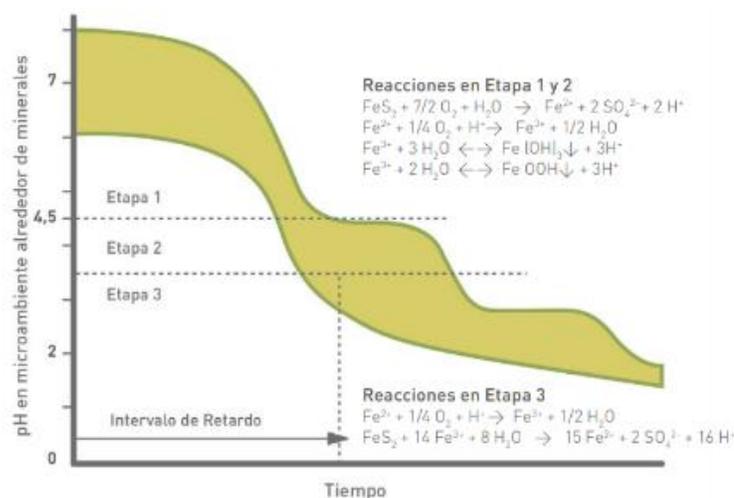
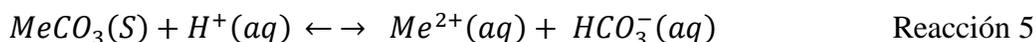


Figura 4: Etapas de la generación de DMA a partir de la oxidación de la pirita. Imagen extraída de Sernageomin 2015.

Así como existen minerales generadores de acidez, también existen minerales encargados de la neutralización de esta a través del consumo de protones. Este consumo se puede ver representado por la reacción (5), siendo los principales agentes consumidores de acidez los carbonatos. En la reacción 5, Me representa un catión divalente como  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ .



Como principales minerales neutralizadores se encuentran la calcita, la dolomita, silicatos y arcillas, los cuales tienen distintas eficacias de amortiguación de drenaje ácido.

## 2.2.2. Factores controladores de la generación de acidez

Los factores principales que controlan la generación de acidez son:

- **Minerales de sulfuros reactivos:** Los sulfuros más comunes son los de hierro, como la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), los cuales se encuentran muy presentes en los depósitos de tipo pórfido cuprífero, así como otros minerales de hierro en menor cantidad, que también pueden afectar la calidad del drenaje, pues podrían tener una cinética de reacción más rápida, acelerando el proceso.
- **Microambiente:** Teniendo en cuenta que los contenidos y distribución de los sulfuros son variables de un material a otro y la distribución dentro de un mismo material es heterogénea, los volúmenes de roca con altos contenidos de pirita y una buena circulación de aire y agua favorecerán una alta producción de acidez. A diferencia de materiales de igual volumen con menores concentraciones de pirita y/o completamente saturados en agua.
- **Agentes oxidantes:** El oxígeno es necesario, en ciertos rangos de pH, para la oxidación de los sulfuros de hierro y la generación de  $\text{Fe}^{3+}$ . Esto significa que, si el material con sulfuros de hierro es aislado del aire (oxigenación) o de las soluciones ricas en  $\text{Fe}^{3+}$ , la oxidación puede ser inhibida o disminuida notablemente, impidiendo la generación de aguas ácidas.

- pH: A valores de pH entre 4 y 7, la oxidación sin oxígeno de la pirita es lenta y la concentración de  $Fe^{3+}$  está limitada por la baja solubilidad de  $Fe(OH)_3$ . En sistemas cada vez más ácidos, el ion férrico es cada vez más soluble, oxidando rápidamente a la pirita a valores de pH muy bajos.
- Temperatura: A temperaturas bajas, la velocidad de oxidación, tanto química como biológica, es mucho más lenta de lo que podría ser a temperaturas ambientales. Por debajo de 4°C, las velocidades de oxidación medidas disminuyen considerablemente. En general, la generación de drenaje minero ácido aumenta con el incremento de la temperatura.
- Bacterias: En muchas situaciones, el control más importante en la generación del drenaje ácido es la oxidación bacteriana del ion ferroso a férrico (Reacción 2). A su vez la generación del ion férrico puede oxidar la pirita a través de la reacción 4. Existen varias bacterias que se desarrollan en este tipo de ambiente (como la *Sulfobacillus acidophilus*) que a pH inferiores a 4,5 son capaces de aumentar la velocidad de la oxidación de la pirita, oxidando el ion ferroso a férrico.

## 2.3. Técnicas de caracterización geoquímica

Actualmente, existen una serie de técnicas de predicción de generación de DMA, las cuales se dividen principalmente en técnicas de predicción de laboratorio y técnicas de predicción de campo. Para el presente trabajo se tendrán en cuenta solo las técnicas de predicción de laboratorio, más específicamente, los ensayos cinéticos de celdas de humedad.

Dentro de las técnicas de laboratorio, se tienen los ensayos estáticos y los ensayos cinéticos. Estos ensayos se pueden usar por separado, pero es recomendable utilizarlos complementariamente para una mejor claridad de los resultados. Las primeras se encargan de establecer un balance entre los componentes generadores y neutralizadores de drenaje minero para poder determinar la probabilidad de ocurrencia de éste (no entregan un resultado concreto con respecto a la tasa de producción), mientras que las segundas se encargan de entregar un valor preciso:

- a) Ensayos estáticos: Son una serie de análisis y pruebas que dan a conocer de forma rápida la reactividad de material, como las características químicas del material. Ayudan a determinar el potencial generador de acidez.
- b) Ensayos cinéticos: Estos ensayos, a diferencia de los ensayos estáticos de laboratorio, simulan las reacciones naturales de oxidación ajustándose a las existentes en terreno, requiriendo de un mayor volumen de muestra y de mucho más tiempo de ejecución. Proveen información respecto al índice de oxidación de sulfuros y, por lo tanto, de la producción de ácido del mineral, así como de la calidad del agua de drenaje. Los test cinéticos se pueden utilizar para determinar el impacto de diversas variables; por ejemplo, las muestras pueden ser inoculadas con bacterias; la temperatura ambiente de la muestra puede también ser controlada durante la prueba, también se puede incrementar la alcalinidad adicionando cal ( $Ca(OH)_2$ ), controlar la presión de oxígeno por medio de la aireación, controlar la humedad de los ciclos de aireación, etc. Sea cual sea la configuración de la prueba, es importante que ésta sea reproducible y estándar para todas las muestras de

un mismo lugar (yacimiento) y que los resultados sean complementados con la caracterización mineralógica y química de la muestra. Como, por ejemplo, incluyen el análisis del área superficial, la mineralogía de mena y ganga, texturas, asociaciones paragenéticas y análisis químicos. Tal información puede afectar la interpretación de los datos de la prueba y es importante hacer comparaciones espaciales y temporales entre las muestras basadas en los resultados de los ensayos.

Uno de los ensayos cinéticos de laboratorio más utilizados, son las celdas de humedad, las cuales tienen como principal objetivo el poder modelar los procesos geoquímicos de meteorización a nivel de laboratorio, además de determinar la tasa y variación temporal de la generación de ácido y de la calidad de aguas lixiviadas (Sernageomin, 2015). Consiste en una celda o cámara (Figura 6), dentro de la cual se pueden controlar las variables que pueden meteorizar un material, como el aire, el agua y la humedad. Estos agentes logran la oxidación del material, generando un lixiviado que es analizado químicamente, para poder determinar la tasa de generación de ácido, el comienzo de éste, la concentración de metales y otras especies en función del tiempo. El diseño de la celda va a depender según el material, si es estéril o relave. El principio de la prueba se basa en un ciclo de 7 días, que consiste en tres etapas:

1. La inyección de aire seco dentro de la celda durante 3 días, el cual evapora el agua, permitiendo la precipitación de partículas en la superficie.
2. La inyección de aire húmedo dentro de la celda durante 3 días, el cual genera la oxidación de los sulfuros.
3. Lixiviación de la muestra durante el último día del ciclo, generándose la disolución de algunas sustancias y la concentración de agua.

Este último se almacena y puede ser utilizado para analizarlo químicamente, de tal manera de poder medir parámetros como el pH, la conductividad, la concentración de sulfatos, alcalinidad, acidez, concentración de metales y potencial REDOX.

La repetición de este ciclo es durante 21 semanas, pudiendo ser más semanas según el objetivo del ensayo.

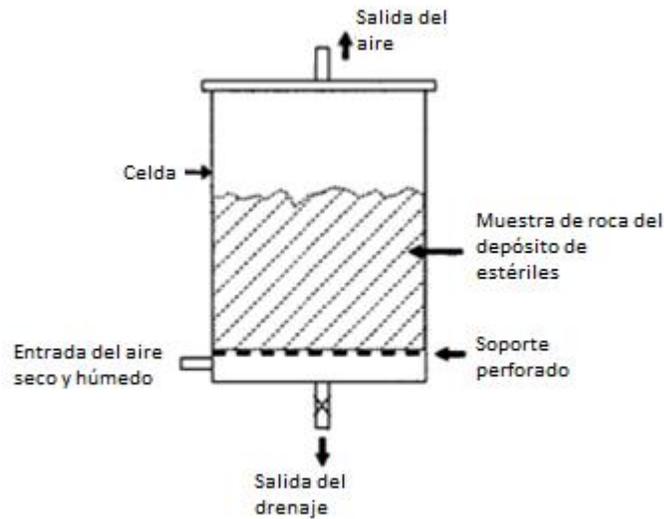


Figura 5: Celda húmeda para roca estéril. (Imagen extraída de MEND, 2000).

Por lo tanto, los cambios en la química de los lixiviados son una evidencia de que podría estar comenzando la generación de DMA, la cual puede ser observada graficando los valores de los diferentes parámetros controlados a lo largo del tiempo. En el caso de sulfatos, acidez, alcalinidad y metales, gráficas acumuladas de estos son comúnmente usadas para conocer sus valores en un determinado ciclo. Por otra parte, también se puede determinar la tasa de acidez, alcalinidad, generación de sulfatos y liberación de metales, a partir de la gráfica de estos parámetros. Las tasas pueden ser expresadas como tasas específicas, en unidades de peso, unidades de superficie y como contenido de sulfuro base (Sernageomin, 2015).

## 2.4. Factores de Escalamiento

Un factor de escala es un número con el cual se puede escalar una cierta cantidad. La investigación enfocada a escalar experimentos pequeños para sacar conclusiones sobre cuerpos más grandes ha sido de gran utilidad en los campos de la ciencia de la tierra. Un enfoque común en la minería implica la evaluación de características específicas de un sitio para derivar factores de escala, facilitando el uso de pruebas a pequeña escala para predecir la evaluación geoquímica de depósitos de estériles a gran escala.

Con respecto a estos últimos, los factores de escala utilizados normalmente incluyen consideraciones para los parámetros que influyen en las tasas de meteorización mineral, incluida la temperatura, la distribución del tamaño de partícula, el área de superficie, el contenido de sulfuro/mineral, el pH del agua de poro, el contenido de humedad, la concentración de oxígeno y el contacto de agua/roca (Kempton, 2012; Amos et al., 2015). Si bien la actividad microbiana se propone en algunos estudios como un parámetro que influye en la tasa, lo cual está comprobado, no existe mayor información con respecto a ésta como factor de escala.

La importancia de escalar los resultados de experimentos a pequeña escala radica en que éstos, en la predicción a largo plazo del comportamiento de los desechos de roca y la calidad del drenaje, están limitados por la escala en la que se llevan a cabo, siendo no representativo a las condiciones de campo. Es por esto, la importancia de que los resultados de laboratorio deban ajustarse a las condiciones de campo para las predicciones de drenaje. Además, se ha reconocido que los ensayos cinéticos de laboratorio tienden a sobreestimar las cargas geoquímicas reales de un botadero de estériles a escala de campo (Morin y Hutt 1994, Malmström et al. 2000, Kempton, 2012). Como ejemplo, se ha observado que las tasas de laboratorio para la meteorización mineral pueden ser hasta 1000 veces más rápidas que las tasas de campo (Ritchie 1994, Malmström et al. 2000, Smith y Beckie 2003). Esto último se observa en gran parte de las diferencias físicas entre pruebas de laboratorio y depósitos de estériles a escala de campo (Malmström et al. 2000, Kempton 2012, Kirchner y Mattson 2015) (Tabla 1).

Como todos los sitios de desechos mineros a gran escala son únicos, los factores de escala no pueden cuantificarse universalmente. Sin embargo, los factores de escala típicamente son <100% (Kirchner y Mattson, 2015) y pueden variar según los diferentes parámetros utilizados, por lo que en general, la predicción de drenaje al escalar los resultados de laboratorio tiende a tener un alto grado de incertidumbre (Kempton 2012, Kirchner y Mattson 2015, Lapakko y Olson 2015, Pearce et al. 2015).

Tabla 1: Resumen de cambios de condiciones entre laboratorio y campo (Tabla extraída de Muhammad 2018).

Parámetro	Laboratorio	Muestra Campo	Diferencias
Tamaño de partícula	0,6 cm (tamaño común celdas de humedad)	De mayor tamaño que laboratorio	Tasas de oxidación y disolución en minerales son más altas en el laboratorio debido al menor tamaño de grano y un área de superficie relativamente más grande, lo que lleva una sobreestimación de la oxidación de sulfuro y procesos de amortiguación de acidez.
Sistema geoquímico	Abierto	Abierto a cerrado	Sistemas abiertos descargan acidez; los sistemas cerrados almacenan esta, diferenciándose en la calidad del drenaje.
Medición del consumo de oxígeno	Basado en la liberación del sulfato	Basado en la medición in situ	La liberación de sulfato puede no proporcionar una predicción del consumo de oxígeno.
Masa de la muestra	Kg	Mt	La heterogeneidad masiva en pilas de roca residual no se contabiliza a escala de laboratorio.
Flujo de aire/Suministro de oxígeno	Difusión dominada, sin restricciones	Advección dominada, potencialmente restringido	Existe un suministro ilimitado en pruebas de laboratorio; las condiciones de campo pueden variar.
Temperatura	Temperatura habitación	Varía	Temperaturas de campo pueden ser significativamente más altas o más bajas que las de la habitación, afectando las velocidades de reacción geoquímica.
Relación líquido:sólido	> 1:1 por año	< 0,1:1 por año	Los lixiviados de laboratorio son más diluidos. El enjuague mejorado evita el desarrollo de microambiente ácidos. Las reacciones de campo pueden estar limitadas por el suministro de agua.

## 2.4.1. Factores de escala individuales y rango de valores

En el presente subcapítulo, se presenta cada factor de escala, con una explicación de cómo y por qué altera las velocidades de reacción o el transporte en condiciones de campo, seguido de rangos para el factor de escala en función de los parámetros recopilados en los estudios publicados. Los efectos de escala específicos que se consideran aquí son el contenido de humedad, el tamaño del fragmento, la temperatura, el contacto (es decir, la fracción de roca realmente enjuagada por los distintos tipos de flujo) y la concentración de oxígeno.

Cabe destacar que entre los factores que afectan al escalado de laboratorio a campo, los más importantes son la temperatura, el tamaño de partícula y el área de superficie de los minerales (Malmström et al. 2000).

### 1. Efecto del contenido de humedad

Este factor de escala tiene similitud con el factor de escala para el contacto con el agua, sin embargo, mientras que el contacto con el agua se relaciona con la eliminación y el transporte de los productos de reacción de las superficies de partículas de roca, este factor aborda si las reacciones dependientes del agua ocurren incluso en superficies de partículas de roca. Kempton (2012), señala que este factor de escala generalmente no se consideraba de mayor importancia dado que comúnmente existe la presencia de algo de humedad. A menos que algún cuerpo restrinja efectivamente la infiltración, la roca residual eventualmente debería humedecerse hasta ~4 a 6% de humedad gravimétrica, que es lo suficientemente alta como para que la oxidación mineral de sulfuro no se vea restringida por una baja humedad. Por lo tanto, la baja humedad, no restringirá la oxidación en las rocas residuales dado que aún existe suficiente agua para permitir reacciones acuosas, incluso si el volumen de agua es insuficiente para provocar un drenaje activo, a menos que una buena evidencia indique que la humedad gravimétrica está por debajo del 2%.

A este factor se le atribuye un valor de 1 a menos que las condiciones del sitio demuestren que el material rocoso del depósito de estériles será más seco que ~2% de humedad gravimétrica.

### 2. Tamaño de partícula

Se considera el factor más común para predecir la química del drenaje de minas, reflejando las diferencias en el tamaño de partícula en el cambio de escala. Esto dado que estudios publicados, demuestran que las tasas de oxidación mineral de sulfuro en los desechos mineros disminuyen drásticamente al aumentar el tamaño del fragmento, lo que es consistente con la proporcionalidad entre el área de superficie y las tasas de reacción heterogéneas.

Kempton (2012) utilizó los resultados obtenidos de un estudio del área superficial del material rocoso del depósito de estériles en la mina Antamina por Aranda (2010), en donde la proporción del área de superficie: masa en la fracción <6 mm fue 1,9, que es alrededor de 1,2 veces la proporción correspondiente de 1,6 para la fracción <20 mm, resultó en un valor para el factor de escala de tamaño de alrededor de  $1 / 1,2$ , o 0,83 (Kempton 2012). Sin embargo, como los tamaños de fragmentos identificados como portadores de la mayor parte del flujo no saturado tenían una gran variedad (de <5 a <30 mm), así como la distribución del tamaño de partícula del material rocoso del depósito de estériles, este factor de escala tenía un alto grado de incertidumbre (Kempton 2012).

Para resumir, las velocidades de reacción cinética a pequeña escala pueden aumentarse suponiendo que las escalas más grandes pueden tener partículas más grandes o menos partículas más finas, que son proporcionalmente menos reactivas.

Este factor de escala puede variar de <0,01 a 1; sin embargo, existe una vieja “regla de oro” con respecto a este tema, la cual indica que se podría esperar que entre un 5% y 20% de la roca arrojada en un depósito de estériles sea más fina que 0,6 cm (tamaño comúnmente utilizado en celdas de humedad) (Morin 2013). Esta regla sería típica y más común según estudios de casos y ejemplos.

### 3. Efecto de la temperatura

Corrige aumento o disminución de la tasa de oxidación causada por temperaturas de campo más altas o bajas en comparación con las temperaturas de laboratorio. El efecto de la temperatura sobre la velocidad de oxidación se describe mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k = A * e^{\left[-\frac{Ea}{RT}\right]}$$

En donde,

$k$  = Tasa de reacción [1/s, o la misma unidad utilizada para  $A$ ]

$A$  = Constante empírica, determinada por la temperatura dada [1/s]

$Ea$  = Energía de activación de la reacción [kJ/mol]

$R$  = Constante de gas universal [0,008314 kJ/mol/K]

$T$  = Temperatura [Kelvin]

El factor para corregir la velocidad de reacción medida en condiciones de laboratorio a la temperatura de campo se obtiene dividiendo la ecuación de Arrhenius bajo temperatura de campo por la ecuación a temperatura de laboratorio (Malmstrom et al. 2000):

$$k_T = k_{campo}/k_{lab} = e^{\left[\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{T_{lab}} - \frac{1}{T_{campo}}\right)\right]}$$

Según Kempton (2012), las temperaturas elevadas se observan típicamente en depósitos de estériles de desecho sulfídico en comparación con la temperatura ambiente promedio. Por ejemplo, en las condiciones árticas en la mina Aitik, se ha observado que la temperatura interna de los depósitos de estériles (contenido promedio de pirita gravimétrica ~ 1%, que varía de 0 a 5%; Bennett et al. 1994) es 1-4 ° C, a pesar de que la temperatura promedio del aire es de alrededor de 0 ° C (Kempton 2012).

Basado en Kempton (2012), el valor de este factor puede variar de ~0.3 (o menos) en condiciones árticas a ~6 en rocas de desecho con alto contenido de sulfuros. Más específicamente, Morin (2013) propone un rango de valores según la disminución de temperatura: el factor de escala para cada disminución de 10°C es de 0,33-0,5 y para diferencias de temperatura de 10°-20°C, los factores de escala irían entre los 0,17 y 0,5; proponiendo un rango mucho más ajustado que Kempton (2012).

#### 4. Contacto con el agua (roca en contacto con flujo no saturado):

En condiciones no saturadas, una parte del material rocoso del depósito de estériles no elimina completa y regularmente sus productos de reacción generados por la interacción del flujo de agua. En cambio, los productos de reacciones no lavados se acumularán a lo largo del tiempo, como una carga geoquímica que aumenta. Mientras que, en condiciones saturadas, una mayor proporción puede ser lavada regularmente, pero aspectos como la precipitación de minerales secundarios y las franjas capilares aún pueden generar cierta retención y acumulación. Como resultado, la tasa cinética de una prueba cinética a pequeña escala bien enjuagada se puede dividir en dos partes básicas para el escalamiento: la parte de la tasa liberada regularmente, y la parte retenida y acumulada a mayor escala.

Por otro lado, a partir de pintura blanca diluida sobre depósitos de estériles a menor escala, Elboushi (1975), encontró que menos del 20% de las superficies de roca estaban cubiertas con pintura por debajo de 1m, obteniendo un factor de escala de 0,2.

Dentro de este factor, a menudo no se suele considerar el efecto de los caudales de agua variables en el tiempo. Estos últimos pueden ser muy variables estacionalmente, anualmente o durante periodos más largos. Como resultado de esto, la cantidad de superficies de roca lavada depende en cierta medida del flujo. Un estudio de un caso a gran escala mostró que el lavado de la superficie de la roca era generalmente estable alrededor del 5% de las superficies a medida que aumentaba el flujo, hasta que se excedía un umbral de flujo alto y luego se lavaba hasta el 40% de las superficies (Morin y Hutt, 1994). Además, con un enfoque de balance de masa, los productos de reacción que no se lavan en un año con flujos de caudales menores que el promedio, podrían ser lavados en años posteriores por los flujos de mayor caudal (Morin et al., 2012).

En general, se observa que este factor puede ser complejo y variar con el tiempo y el caudal, por lo que generalmente se simplifica a un factor que represente el enjuague regular, sin tener en cuenta la acumulación del producto de reacción y las liberaciones máximas. Generalmente, este factor de escala simplificado está en un rango de 0,01 a 0,20, siendo posible valores de hasta 0,65.

#### 5. Concentración de oxígeno en botadero:

Las instalaciones de depósitos de estériles son típicamente heterogéneas, y el transporte de gas ocurre a través de una mezcla compleja de advección, difusión y convección (Garvie et al. 1997; Fala et al. 2003). Para las reacciones que requieren oxígeno como reactivo, el nivel de oxígeno en los poros puede afectar la velocidad cinética. Sin embargo, la forma en que se ve afectada la velocidad cinética no está bien definida.

A pesar de la poca claridad en cómo se ve afectada la velocidad cinética, a partir de estudios revisados, se estima un rango para este factor de escala que va de 0,1 a 0,5 para una roca con 1% a 5% de sulfuro aproximadamente. Sin embargo, la inhibición del flujo de aire convectivo podría dar lugar a factores de escala más bajos.

## 2.5. Estudios Previos

A partir de los estudios existentes con respecto a los factores de escala relacionados a ensayos cinéticos de laboratorio, se encontró que se suele utilizar dos enfoques principales para encontrar los factores de escala con los cuales se extrapolan las tasas generadas en laboratorio: el primer enfoque es el de utilizar la comparación entre tasas de lixiviación de laboratorio y campo y generar el factor de escala para cada elemento a partir del cálculo de un factor de excedencia; mientras que un segundo enfoque, se relaciona con el cálculo de factores individuales, los cuales tienen en consideración las diferencias como el tamaño de grano, la temperatura, etc; por lo que a continuación, la revisión de estudios previos se dividió en estos de enfoques mencionados.

### 2.5.1. Enfoque 1: Razón tasas de campo vs tasas de laboratorio

**“Scaling laboratory sulfate release rates to operational waste rock piles”**

**(Lapakko & Olson, 2015)**

Este trabajo, tiene como objetivo principal el cálculo de factores de escala para las tasas de liberación de sulfato de roca del Complejo Duluth ubicado en Minnesota; de forma empírica a partir de la comparación de las tasas de laboratorio con las tasas de campo. Las tasas de laboratorio fueron calculadas en base a la liberación de sulfato observada, durante las semanas 6 a 71 de operación de las celdas de humedad, adquiridas a partir de las ecuaciones expuestas a continuación, mientras que las tasas de campo anuales se determinaron para un periodo de 3 a 13 años para 5 depósitos de estériles con un contenido de sulfato estimado de 0,24 a 0,97%.

Para los depósitos de estériles, se calculó la liberación de masa de sulfato para cada día en que se midieron las concentraciones de sulfato. Los datos de flujo de las mediciones anteriores a este trabajo se utilizaron para determinar el volumen de flujo asociado con la concentración de sulfato, a partir de la ecuación siguiente:

$$\text{Masa de } SO_4 \text{ liberada, } M(SO_4) = [SO_4]_i \frac{Q_i + Q_{i-1}}{2} \frac{t_i + t_{i-1}}{2} + [SO_4]_i \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \frac{t_i + t_{i+1}}{2} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde

$M(SO_4)$  : Masa de sulfato asociada a la muestra  $i$  (mg).

$[SO_4]$  : Concentración de sulfato (mg/L).

$Q$  : Flujo (L/s).

$t$  : Tiempo (s).

La liberación de masa acumulada de sulfato para el año, luego se divide por el producto del peso molecular del sulfato, la masa anual de azufre en la cuenca y el tiempo durante el cual se produjo la liberación, para determinar las tasas anuales promedio de liberación de sulfato.

Entonces, la tasa anual de liberación de sulfato se calcula de la siguiente forma:

$$\left(\frac{dSO_4}{dt}\right)_A = \sum M(SO_4) / (96,1 * M(S)_{ws} * t) \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde

$(\frac{dSO_4}{dt})_A$  : Tasa media anual de liberación de sulfato (mg/(gS\*s)).

$\sum MSO_4$  : Suma de masa de sulfato liberada para periodos de muestreos individuales (mg).

$M(S)_{ws}$  : Masa de azufre en la cuenca del área de estudio.

Las tasas de laboratorio y de campo se expresaron por unidad de masa de azufre. Esta comparación, entre las 17 tasas de laboratorio y 42 tasas de campo anuales, dio como resultado 714 factores de escala que se mueven en un rango de [0,019;0,687] con 2/3 de valores entre [0,053;0,21]; los cuales se ajustaron a una distribución beta, para la cual la media y la desviación estándar fueron 0,127 y 0,083 respectivamente. Los factores de escala encontrados en el presente trabajo, en general se correlacionan con los valores empíricos determinados para el complejo Duluth.

### **“Scaling geochemical loads in mine drainage chemistry modeling: An empirical derivation of bulk scaling factors” (Kirchner & Mattson, 2015)**

En este trabajo, los datos de química de filtración de los depósitos de estériles de dos minas se comparan con los escalados a partir de la información entregada por el lixiviado de las celdas de humedad, con el objetivo de restringir mejor los factores de escalamiento. En el trabajo, no se define la locación específica de los depósitos de estériles en estudio, pero si los caracteriza según su tipo de drenaje, uno con drenaje ácido perteneciente a un yacimiento tipo pórfido de oro y otro con un drenaje neutro a partir de un yacimiento del tipo pórfido de cobre.

Como metodología, se convierten las concentraciones de lixiviados de pruebas cinéticas de laboratorio en una tasa de carga química (mg/kg/wk), la cual es escalada al tonelaje del depósito de estériles para predecir la calidad del drenaje a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Concentración Prevista} = \frac{\text{HC carga} \times \text{Tiempo} \times \text{Masa de roca en el botadero}}{\text{Volumen de agua infiltrada}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Las tasas de carga química del depósito de estériles se calcularon para una duración de 64 semanas. Las cargas de iones principales seleccionados e iones menores y traza se compararon con las tasas de carga derivadas de los ensayos cinéticos. Tanto las cargas de campo como de celdas de humedad se normalizan a las cargas derivadas de la filtración del botadero para calcular un factor de excedencia:

$$\text{Factor de excedencia} = \frac{\text{Carga prueba cinética}}{\text{Carga botadero}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde los factores de escala son calculados como la inversa del factor de excedencia.

Como resultado, obtiene un rango de valores de factores de escala que varían entre [0,0001-0,04], obteniendo valores significativamente menores a los reportados previamente en estudios anteriores. Además, destaca la importancia de la utilización de factores de escala individuales para cada elemento en específico que se quiera escalar.

## “Waste Rock Sulfate Release Rates at a Former Taconite Mine, Laboratory and Field-Scale Studies” (Hanna & Lapakko, 2012)

El presente trabajo describe una investigación realizada con respecto a la carga de sulfato liberada en la zona de estudio. Éste tiene como objetivo principal calcular las masas de sulfatos presentes en un pozo para estimar las tasas de liberación de roca residual en la cuenca hidrográfica estudiada a partir de un depósito tipo bandas de hierro, ubicada en Minnesota.

Las tasas de liberación de roca residual se estimaron para varias cuencas hidrográficas en función de flujos medidos en las corrientes que drenan las cuencas hidrográficas. Luego, se compararon entre sí ambas tasas de campo estimadas, además de incluir en la comparación las tasas observadas en los ensayos de celdas de humedad de 26 semanas de 7 muestras de sondajes de perforación. Como resultado, obtiene factores de escala de la tasa de sulfato que están en un rango de [0,3-1,2].

A modo de resumen, en la siguiente tabla se exponen los valores encontrados en los estudios previos para los factores de escala bajo el método de comparación de tasas de campo vs tasas de celdas de humedad:

Tabla 2: Resumen de rango/valores de factor de escala encontrados en estudios previos

Estudio	Rango o valor de factor de escala
<b>Lapakko &amp; Olson (2015)</b>	0,019 - 0,687 (solo para el sulfato)
<b>Kirchner &amp; Mattson (2015)</b>	0,0001-0,04
<b>Hanna &amp; Lapakko (2012)</b>	0,3 - 1,2 (solo para el sulfato)

## 2.5.2. Enfoque 2: Cálculo de factores individuales

### “Resolving the scale-dependence of mineral weathering rates” (Malmstrom et al., 2000)

En este trabajo se cuantifican los factores de escala asociados con las diferencias identificadas en las características fisicoquímicas, como la temperatura, pH, contenido mineral, flujo hidrológico y distribución del tamaño de partícula. El autor propone utilizar los factores de escala para extrapolar los coeficientes de velocidad,  $k^b$  e independientemente (es decir, sin ninguna calibración del modelo a los resultados observados) prediciendo las tasas de lixiviación a escala de laboratorio/campo,  $R^{L/C}$ , como:

$$\frac{R^{\bar{L}/\bar{C}}}{a_{sm}^{\bar{L}/\bar{C}}} = \alpha^{\bar{L}/\bar{C}} * \beta_T^{\bar{L}/\bar{C}} * \beta_{pH}^{\bar{L}/\bar{C}} * \beta_{PS}^{\bar{L}/\bar{C}} * k^b \quad \text{Ecuación 5}$$

En donde el factor  $\alpha^{\bar{L}/\bar{C}}$  es hidrológico y explica la existencia potencial de vías de flujo preferenciales y agua inmóvil. Para el caso del área de estudio (Aitik), se ha cuantificado experimentalmente como la relación entre el contenido de agua móvil y total en pruebas hidrológicas utilizando trazadores no reactivos ( $\alpha^F=0.65$  y  $\alpha^L=1$ ). Los diferentes factores representan una corrección del coeficiente de velocidad,  $k^b$ , para temperatura, pH y tamaño de partícula.

La corrección para la temperatura se cuantifica como se observa en la ecuación 6 según la ecuación de Arrhenius, siendo  $E_a$  la energía de activación,  $R_g$  la constante de gas universal y  $T$  La temperatura absoluta en cada escala.

$$\beta_T^{\bar{L}/\bar{C}} = e^{\left[ -\frac{E_a}{R_g \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^B} \right)} \right]} \quad \text{Ecuación 6}$$

El efecto del pH se calcula con la ecuación 7, siendo  $n$  el orden de reacción con respecto a los protones. Para los minerales individuales, usaron energías de activación y órdenes de reacción de la literatura.

$$\beta_{pH}^{\bar{L}/\bar{C}} = 10^{n(pH^B - pH^{\bar{L}/\bar{C}})} \quad \text{Ecuación 7}$$

La corrección para el efecto del tamaño de partícula se cuantifica como se observa en la ecuación 8, siendo  $x_i$  la fracción de tamaño de partícula que está asociada con el coeficiente de frecuencia  $k_i$ . El producto  $x_i k_i$  se suma sobre la distribución completa del tamaño de partícula en la escala considerada. Los coeficientes de tasa,  $k_i$ , se obtuvieron de los experimentos de lotes, en los que las fracciones individuales de tamaño se estudiaron por separado.

$$\beta_{PS}^{\bar{L}/\bar{C}} = \sum_i \frac{x_i k_i}{(k^b)} \quad \text{Ecuación 8}$$

La cuantificación del área de superficie mineral específica se calcula según la ecuación 9, donde  $\gamma_m$  es el contenido mineral y  $a_s$  es el área de superficie específica total, que implica un factor de escala adicional, contando las diferencias en la distribución mineral entre las escalas de observación. Para el caso de Aitik,  $\gamma_m$  se determinó mediante el recuento de puntos utilizando microscopía óptica y  $a_s$  se ha determinado utilizando el método BET-método.

$$a_{sm}^{\frac{L}{c}} = \gamma_m^{L/c} a_s$$

Ecuación 9

**“Waste rock and lean ore geochemical characterization plan NorthMet Project, Minnesota” (SRK Consulting, 2006)**

En este trabajo, se tiene como principal objetivo la predicción de la calidad del agua para la evaluación de impactos ambientales y posibles diseños de mitigación de éste, dado que se espera que la calidad del drenaje que salga del depósito de estériles sea del tipo ácido. Este depósito de estériles tendrá material proveniente del depósito NorthMet, ubicado en el intrusivo Complejo Duluth, al norte de Minnesota, USA; en donde se extraen principalmente sulfuros de cobre, níquel y hierro diseminados.

Para la predicción, utilizaron ensayos de laboratorio cinéticos, específicamente, celdas de humedad; mientras que, para evaluar los efectos del tamaño de grano, utilizaron un reactor MDNR. Además, recopila datos tanto teóricos como prácticos con respecto a lo que se esperarían en la calidad del agua liberada por un depósito de estériles con características similares.

Se utilizan subfactores de escala para escalar las tasas de lixiviación obtenidas a partir de las celdas de humedad, de los cuales se escogen la temperatura, el tamaño de grano y el contacto con el agua. Para el subfactor de la temperatura, se aplica en base a la ecuación de Arrhenius utilizando una temperatura promedio para el sitio, sin embargo, no se aplica una corrección a la temperatura, obteniendo un valor de 1; mientras que, para el subfactor del tamaño de partícula, se utiliza la relación entre la masa reactiva de grano fino ( $M_r$ ) y la masa total ( $M$ ), con la que se obtiene un valor de 0,1:

$$\text{Subfactor tamaño de grano} = M_r/M$$

Ecuación 10

Por último, para el subfactor de contacto con el agua, se asume un valor de 0,2 a partir de estudios previos revisados. Además de estos subfactores, se utiliza un modelo de equilibrio termodinámico para identificar aquellas concentraciones que no son compatibles termodinámicamente.

Como resultado de la escalación de las tasas de lixiviación a partir de estos subfactores, se obtienen valores inusualmente altos de concentraciones, recomendando la evaluación de las concentraciones individuales de cada elemento teniendo en cuenta las interacciones químicas y los resultados obtenidos en otros sitios bajo esta misma metodología

### **“Eagle Gold geochemical source term predictions: Model description and results” (StrataGold, 2014)**

Este trabajo tiene como principal objetivo realizar una caracterización geoquímica con respecto a la calidad de agua que interactuará con el depósito de estériles. Este depósito, será construido a partir de una mina a cielo abierto, la cual extrae principalmente oro.

Para la predicción se utilizan tres herramientas: el escalamiento de los ensayos cinéticos de laboratorio, la modelación geoquímica del control de los minerales secundarios y por último, la química del flujo de agua en campo. Para la utilización de ensayos cinéticos de laboratorio, las muestras las dividen en las distintas unidades de roca que serán depositadas.

Los valores para los diferentes subfactores de escala elegidos se calculan de la siguiente forma:

Para la temperatura, se utiliza la fórmula de Arrhenius utilizando la energía de activación de la piritita como sulfuro principal, calculando un subfactor de escala para cada mes del año según la temperatura promedio que presenta cada uno; obteniendo una mediana de 0,21.

$$\text{Subfactor de temperatura} = e^{\left[\frac{Ea}{R}\left(\frac{1}{T_{lab}} - \frac{1}{T_{campo}}\right)\right]} \quad \text{Ecuación 11}$$

Para hacer la corrección del tamaño de grano, utilizan la revisión de estudios previos en comparación con las características de su caso de estudio, implementando un valor de 0,2; para encontrar el subfactor de contacto con el agua, utilizaron el volumen de infiltración de cada mes que debiera tener el botadero, con una mediana de valor 0,04; mientras que para el valor de la cobertura del depósito de estériles, la cual se encarga de corregir las posibles infiltraciones que puedan ocurrir en el sitio del depósito de estériles, utiliza un valor de 0,75 el cual es obtenido a partir de estudios anteriores.

A partir de estos valores, se escalan las tasas de lixiviación de los ensayos cinéticos utilizados (celdas de humedad y barriles de campo), de los cuales se obtienen valores bajos para algunas especies, como el sulfato.

### **“Geochemical source term predictions: Palmer Project, Alaska” (Phase Geochemistry, 2018)**

Este trabajo tuvo como principal objetivo generar una predicción del agua de contacto para estimar la química del drenaje en el sitio de estudio tanto en las paredes de la mina como en el depósito de estériles que se construiría, con material proveniente de un yacimiento del tipo sulfuro masivo volcanogénico, enfocado a la extracción principalmente de cobre, zinc, oro y plata, ubicado en Alaska.

Para lograr esta predicción, se utilizan dos bases de datos de ensayos cinéticos, correspondientes a celdas de humedad y barriles de campo; además de información con respecto a la calidad de agua de un punto de monitoreo ubicado en el sitio. Como subfactores de escala escogidos, se utiliza el subfactor de temperatura, de tamaño de grano y de contacto con el agua, con los cuales se escalan las tasas de lixiviación que luego son transformadas a concentración (mg/l).

Con respecto a la obtención de los valores para los subfactores de escala, en el trabajo se obtienen de la siguiente forma:

Para el subfactor de tamaño de grano, se asigna un valor de 0,2, basado en una suposición a partir de la experiencia profesional en otros lugares y similitudes de otros estudios previos; mientras que para el subfactor de temperatura, se utiliza la ecuación de Arrhenius con la energía de activación de la pirita, obteniendo un valor de 0,2. Por último, para el subfactor de contacto con el agua, se asumió que toda el área de la superficie de la roca será lavada, asumiendo un factor de 1 (no especifica en que se basa esta asunción).

A partir de estos subfactores, se escalan las tasas de lixiviación obtenidas a partir de los ensayos cinéticos de laboratorio, donde se obtiene como resultado valores razonables para las concentraciones de  $SO_4$  y Cu con respecto a las concentraciones monitoreadas en aguas subterráneas y valores de pH neutro/alcalino esperables.

A modo resumen, en la siguiente tabla se presentan los métodos que utilizan los estudios revisados anteriormente para calcular/obtener los valores para los subfactores de escala individuales escogidos:

Tabla 3: Resumen métodos para encontrar valores de subfactores de escala individuales

Estudio	Factor temperatura	Factor contacto	Factor tamaño de grano	Factor pH	Factor cubierta
<b>Malmstrom et al.</b>	$e^{\left[ \frac{Ea}{R_g \left( \frac{1}{T^F} - \frac{1}{T^B} \right)} \right]}$	Trazadores no reactivos	$\gamma_m^{L/F} a_s$	$10^{n(pH^B - pH^F)}$	-
<b>SRK Consulting</b>	$e^{\left[ \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T_{lab}} - \frac{1}{T_{campo}} \right) \right]}$	Estudios previos	$M_r/M$	-	-
<b>StrataGold</b>	$e^{\left[ \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T_{lab}} - \frac{1}{T_{campo}} \right) \right]}$	Infiltración mensual	Estudios previos	-	Estudios previos
<b>Phase Geochemistry</b>	$e^{\left[ \frac{Ea}{R} \left( \frac{1}{T_{lab}} - \frac{1}{T_{campo}} \right) \right]}$	No específica	Estudios previos	-	-

## 3. Metodología de aplicación al caso estudio

Las metodologías utilizadas para escalar los ensayos de laboratorio cinéticos se pueden aplicar en todos los depósitos de estériles, con los ajustes apropiados para reflejar las diferencias en las condiciones de temperatura, tamaño de partícula, contacto con el flujo de agua, etc.

Los pasos para evaluar las metodologías existentes utilizadas en el escalamiento de ensayos de laboratorio cinéticos a partir del caso estudio de un depósito de estériles, son los siguientes:

- A) Selección de un caso estudio de depósito de estériles, con su caracterización hidrogeológica y celdas de humedad pertinentes.
- B) Generación de una base de datos de tasas de lixiviación a partir de ensayos cinéticos de laboratorio (celdas de humedad) de muestras de roca que serán/están depositadas en el depósito de estériles.
- C) Selección y/o cálculo de los valores de factores de escala (o corrección) para los parámetros seleccionados según las condiciones existentes en el sitio en que se encuentra el depósito de estériles y las características de este mismo.
- D) Cálculo de las tasas de liberación de campo multiplicando las tasas de lixiviación obtenidas en las celdas de humedad por el factor de escala acumulativo.
- E) Calculo las concentraciones en base a la tasa de liberación de campo calculada y consideraciones hidrológicas del depósito de estériles (modelo hidrogeológico).
- F) Verificación de la factibilidad de las distintas metodologías seleccionadas, calibrando con valores in situ de concentración en comparación con los resultados obtenidos.

A continuación, se describe en mayor detalle la metodología de aplicación de cada uno de los pasos indicados al caso de estudio, mientras que, en el Capítulo 4 se presentan los resultados de esta aplicación.

### 3.1. Caracterización del caso estudio

Para evaluar las metodologías encontradas en la revisión bibliográfica, se realizó la aplicación de éstas a un caso real de depósito de estériles de la minería chilena. Específicamente, se trabaja con un depósito de estériles situado en el Norte de Chile.

#### 3.1.1. Clima y meteorología del sector

La cuenca completa en donde se encuentra el depósito de estériles en estudio, posee un clima de alta montaña dominado por precipitaciones del tipo nival principalmente durante los meses de invierno (mayo a agosto). La estación meteorológica más cercana a este depósito de estériles muestra una precipitación anual promedio de 333,6 mm/año y una temperatura media promedio de 4,2 °C.

Los valores de precipitación promedio mensual medidos en la estación meteorológica perteneciente a la zona de estudio, se puede observar en la Figura 6:

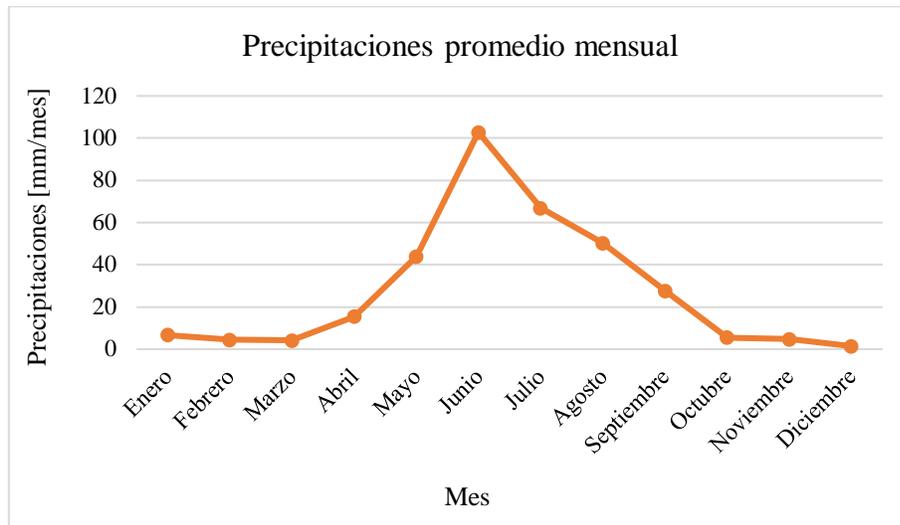


Figura 6: Valores de precipitaciones promedio mensual del sector.

Mientras que los valores de temperatura promedio mensual medidos en la estación meteorológica perteneciente a la zona de estudio, se pueden observar en la Figura 7:

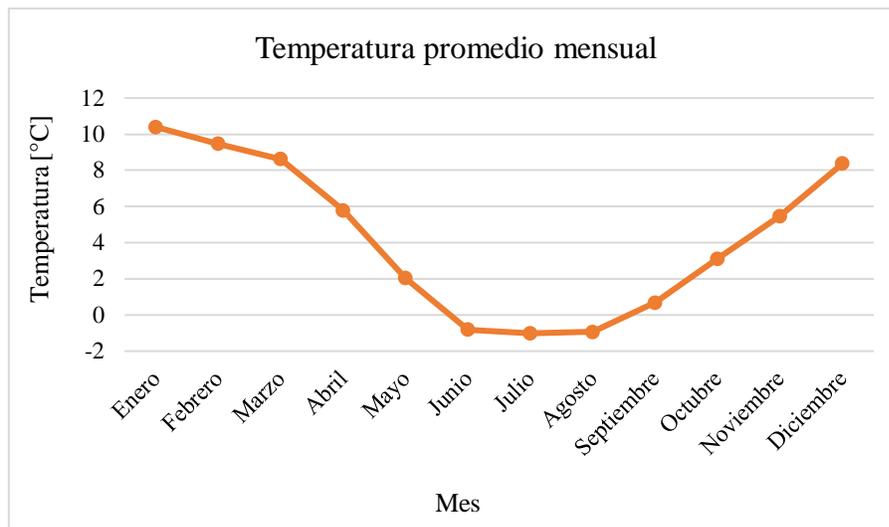


Figura 7: Valores de temperaturas promedio mensual del sector.

### 3.1.2. Hidrología

Debido a que el depósito de estériles en estudio se ubica en una sub-cuenca, se hace indispensable un modelo hidrológico, el cual integre los principales procesos hidrológicos que están involucrados. Para el caso de estudio, se utiliza un modelo hidrológico desarrollado por WSP, que abarca el depósito de estériles en estudio con los procesos hidrológicos principales que afectan a éste, el cual se observa en la Figura 8.

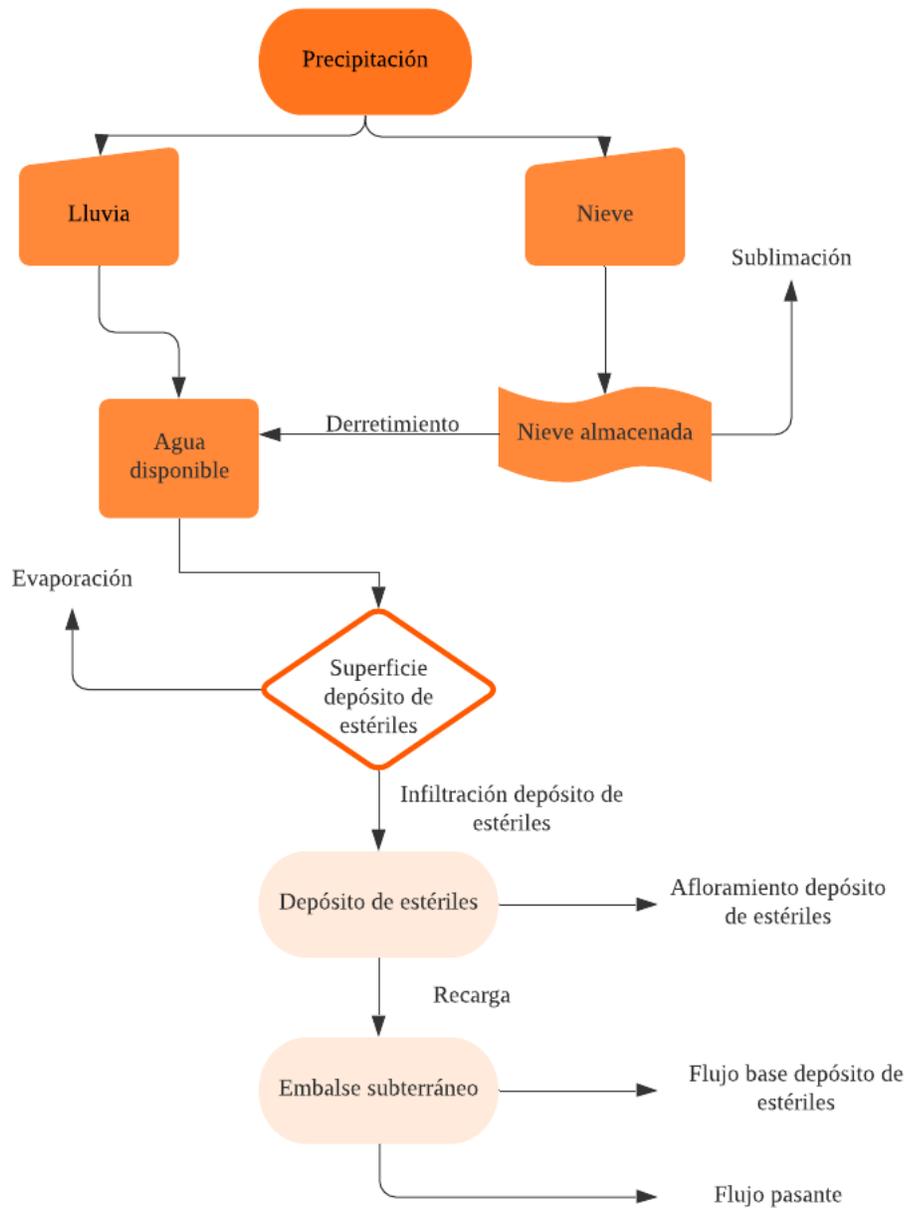


Figura 8: Modelo hidrológico simple del depósito de estériles del caso estudio.

Como se observa en la Figura 8, una parte del derretimiento de nieve en la superficie del depósito de estériles infiltra a través de la superficie de éste, escurriendo hasta el punto más bajo de éste, formando una superficie freática y una zona de saturación dentro de la masa de roca, por lo que la descarga del depósito de estériles ocurre a través de dos formas principalmente: como flujo no saturado y como flujo saturado (o flujo base).

El punto de control de calidad química y caudales se encuentra a pie del depósito de estériles, en el cual confluyen tanto el flujo pasante, el flujo base y el afloramiento del depósito de estériles; sin embargo, para el presente trabajo se utilizaron los dos flujos principales que interactúan con el material rocoso del depósito de estériles, la recarga como flujo no saturado y el flujo base como flujo saturado.

### 3.1.3. Material depositado

Este depósito de estériles fue construido en base al material extraído de una mina tipo rajo abierto, en la cual se explota un yacimiento del tipo pórfido cuprífero afanítico, caracterizado por tener principalmente una mineralización de sulfuros de cobre, molibdeno y en menor cantidad oro y plata.

Se cuenta con un modelo de bloques con respecto a este depósito de estériles, el cual proporciona la cantidad de tonelaje de material depositado mensualmente desde enero 2016 a diciembre 2019 según tres variables de litología (L), alteración (A) y mineralización (M) (unidades geológicas o unidades LAM) que definen el comportamiento geoambiental de las rocas depositadas con respecto a su potencial de generación de drenaje ácido.

### 3.1.4. Ensayos cinéticos

WSP generó una campaña de muestreo geoquímico de roca estéril destinada al depósito de estériles en estudio, las cuales se caracterizaron mineralógicamente y fueron sometidas a diversos ensayos y estudios con el fin de poder estimar su potencial de generación de drenaje minero ácido.

Luego de ser sometidas a ensayos estáticos, análisis químicos, mineralógicos y granulométricos, las muestras fueron derivadas a ensayos cinéticos de celdas de humedad.

La prueba de celda de humedad es una prueba cinética para el estudio de la degradación de una muestra de roca potencialmente generadora de ácido (Dold, 2003) y, en consecuencia, de la posible movilización de determinados metales al medio ambiente.

El drenaje extraído de la celda fue analizado en un laboratorio, entregando resultados sobre los siguientes parámetros:

-Parámetros generales (pH, conductividad, carbonatos, bicarbonato, cloruro, dureza, sulfato, fluoruro, sólidos totales disueltos).

-Metales (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, V, Zn).

Para el presente trabajo, se utilizó la información de una serie de celdas de humedad realizadas entre el 2011 y el 2019. Estas celdas, que contienen a las diferentes unidades LAM depositadas, están agrupadas en dos grupos diferente según su comportamiento de meteorización: unidades con mineralización primaria (Pr) y no primarias (NPr).

Las unidades con mineralización primaria muestran altas tasas de liberación de sulfato en comparación con las unidades no primarias, debido a la presencia de sulfuros (principalmente pirita) que al oxidarse disminuyen el pH; y a la presencia de vetillas/diseminaciones de anhidrita a un nivel poco evidente en la mineralización secundaria.

Resumiendo el comportamiento geoquímico entre el material primario (o mineralización primaria) y no primario (o mineralización no primaria); se tiene que el material no primario lixivia soluciones con menores cantidades de sulfato y mayores cantidades de cobre; además de poseer menores valores de conductividad eléctrica y de pH (más ácidos) que el material primario (Figura 9).

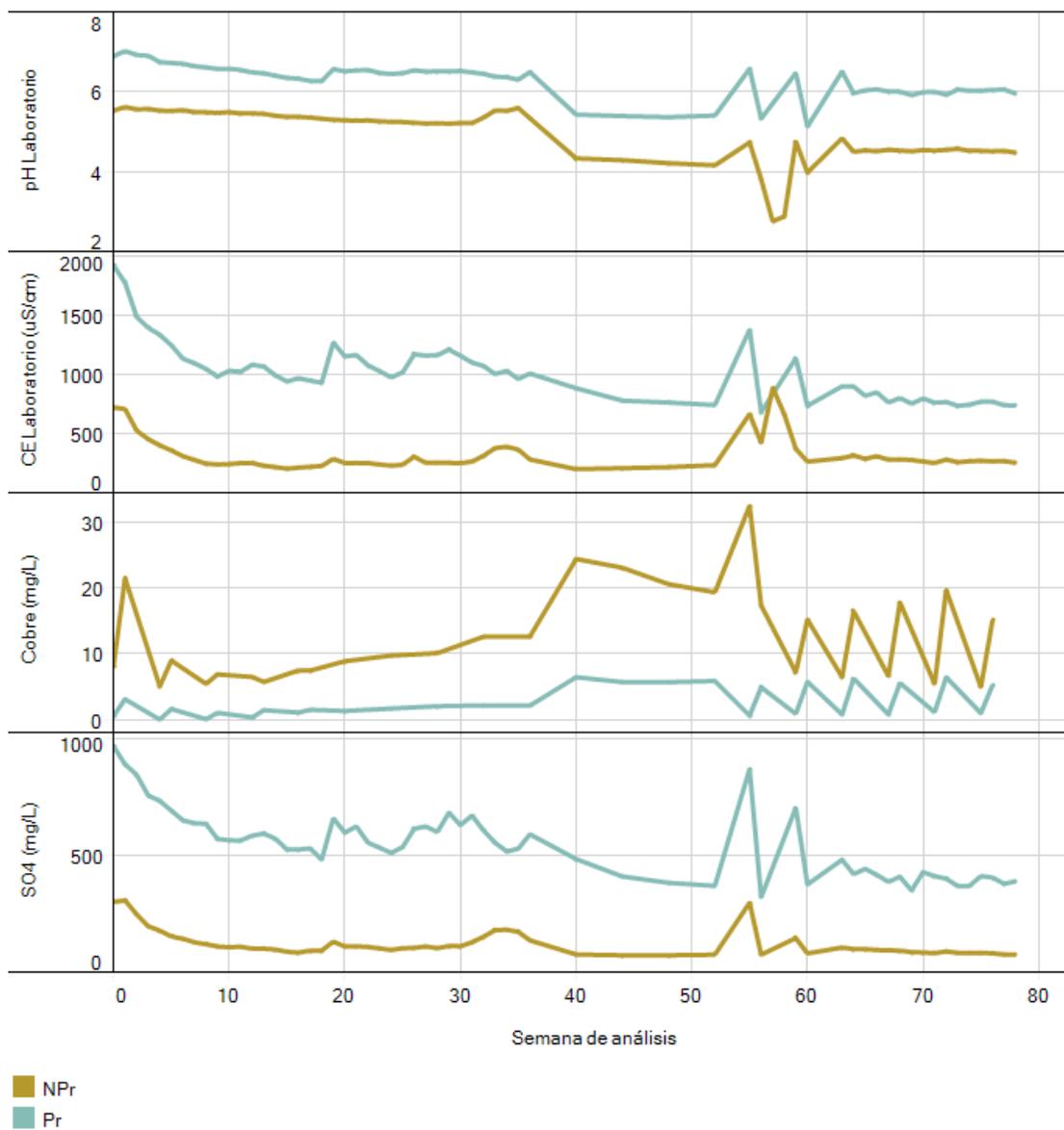


Figura 9: Promedios de pH, conductividad eléctrica, sulfato y cobre por semana de análisis para celdas de humedad con material primario y no primario,

## 3.2. Base de datos de tasas de lixiviación

Para la generación de una base de datos de tasas de lixiviación, se utilizó la información obtenida de las celdas de humedad descritas anteriormente, a partir de las cuales se calcularon las tasas mencionadas para cada parámetro analizado mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de lixiviación metal} \left( \frac{mg}{Kg * semana} \right) = \left( \frac{[Metal] \left( \frac{mg}{L} \right) * Volumen salida (L)}{Masa muestra (Kg) * Tiempo (wk)} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde,

[Metal]: Concentración de metal de interés (mg/L)

Volumen salida: Volumen lixiviado de salida (L)

Masa muestra: Masa de muestra de la HCT (Kg)

Tiempo: Tiempo de lixiviación en semanas (wk)

Para cada celda de humedad se calculó su correspondiente tasa de lixiviación (TL) que se visualizó por semana para cada metal a lo largo de la duración del programa, con la Ecuación 12.

Tanto para el grupo de las celdas de humedad con material primario, como para las celdas de humedad con material no primario, se calculó un promedio de las tasas de lixiviación de cada parámetro medido, generándose así dos grupos de tasas de lixiviación según su comportamiento de meteorización.

Además de calcular tasas de lixiviación según el comportamiento de meteorización de cada celda, se calcularon dos tasas diferentes para representar los distintos flujos de agua que atraviesan el botadero: tasas de lixiviación para el “primer lavado” o first flush, y tasas de lixiviación “estables”; donde las tasas de lixiviación para el first flush se utilizaron para representar periodos de mayor flujo en el depósito de estériles, correspondientes a flujos no saturados, calculándose como el promedio de las 10 primeras semanas de las celdas de humedad; mientras que las tasas de lixiviación estables, se utilizaron para representar un flujo estable en el depósito de estériles, correspondiente a un flujo saturado, calculándose como el promedio de todas las semanas de las celdas de humedad.

Así, se obtuvieron 4 promedio de tasas de lixiviación, como se observa en el siguiente esquema (Figura 10).

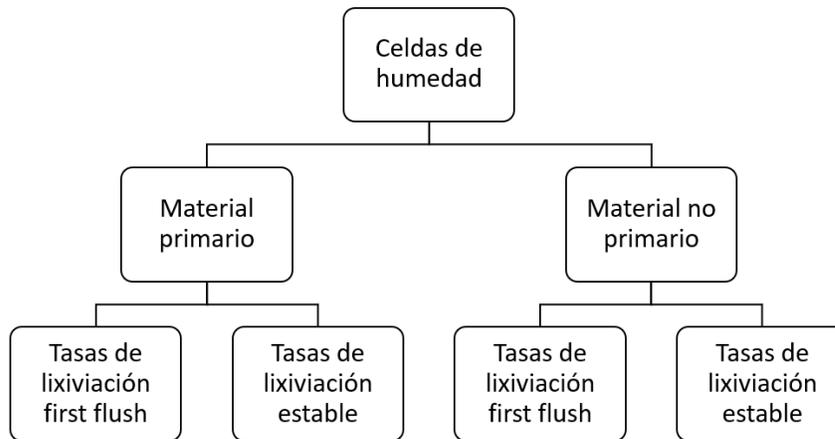


Figura 10: Diagrama con tasas de lixiviación utilizadas.

### 3.3. Obtención de un factor de escala

En la literatura y trabajos existentes con respecto a los factores de escala relacionados a ensayos cinéticos de laboratorio para la caracterización del tipo de drenaje de depósitos de estériles, se han utilizado dos enfoques principales para escalar las tasas generadas en laboratorio: el primer enfoque es el de utilizar la comparación entre tasas de lixiviación de laboratorio y campo y generar el factor de escala para cada elemento a partir del cálculo de un factor de excedencia:

$$\text{Factor de excedencia} = \frac{\text{Tasa lixiviación prueba cinética}}{\text{Tasa lixiviación botadero}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Factor de escala} = \frac{1}{\text{Factor de excedencia}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Una segunda forma de obtener estos factores se relaciona con el cálculo de factores individuales, los cuales tienen en consideración las diferencias como el tamaño de grano, la temperatura, etc. Kempton (2012) realizó una revisión de la literatura enfocada a los factores de escala para la liberación de masa química de roca residual, incluyendo así el contenido de humedad y la concentración de oxígeno en los poros. Para la obtención del valor de cada parámetro individual, en los diversos estudios se propusieron tanto fórmulas como formas de obtener estos subfactores, por lo que la selección del método para encontrarlo va a definir qué tan cercano a la realidad de encuentra el valor.

A partir de la revisión de estudios previos y sus respectivos métodos para encontrar los factores de escala y, a partir de los datos e información disponibles para el caso estudio, se seleccionaron aquellas metodologías aplicables pertenecientes a ambos enfoques nombrados anteriormente, de manera de obtener factores de escala en general, así como también subfactores de escala individuales.

Una vez encontrados los factores de escala individuales (o subfactores) a partir de las distintas fórmulas propuestas en los estudios revisados, se compararon los valores calculados con los rangos de estos valores propuestos en la literatura, los cuales se presentan en la (Tabla 4), a modo de validación.

Tabla 4: Rango de valores propuestos para cada factor de escala

Factor	Rango/Valor
Contenido de humedad	1
Tamaño de partícula	0,05 - 0,2
Temperatura	0,17-0,5
Contacto con el agua	0,01 – 0,65
Concentración oxígeno	0,1 – 0,5
Efecto pH	-

Obtenidos los valores de los subfactores, estos se multiplicaron para obtener un factor de escala acumulativo (CSF), el cual va a depender de los subfactores elegidos que representen los efectos de las diferencias entre las condiciones de laboratorio y de campo con respecto a los factores de escala escogidos. Cabe mencionar que, si bien existen varios factores de escala para extrapolar las condiciones de un depósito de estériles, se recomienda no exceder los 3 factores de escala al momento de calcular el CSF, dado que su valor disminuye a medida que se consideran más factores de escala individuales (Morin, 2013) debido a la multiplicación entre estos, generando una subestimación en la química del drenaje a gran escala.

Para el presente trabajo, se evaluaron ambas metodologías para la obtención de factores de escala; siendo para el caso del cálculo del factor de escala a partir de subfactores, la utilización de la fórmula de Arrhenius para el caso del factor de temperatura y la utilización de los rangos de valores encontrados en la bibliografía que más se asemejan al caso de estudio para los demás parámetros, dado que no se cuenta con los datos que se requieren para utilizar las fórmulas propuestas por los diferentes autores para encontrar los distintos subfactores. Mientras que, para el caso de la comparación de tasas, se utilizaron tanto las tasas de campo, calculadas a partir de las concentraciones (mg/L) del punto de medición a pie de botadero (punto denominado ABDP), el caudal existente en éste y la cantidad de roca depositada en el botadero; como las tasas calculadas a partir de las celdas de humedad, generando así un factor de excedencia a partir de la Ecuación 13, y luego los consiguientes factores de escala por elementos a partir de la Ecuación 14.

### 3.4. Aplicación de factores de escala

Para el cálculo de las tasas de lixiviación escaladas a partir de subfactores de escala, fue necesario contar con un modelo de bloques de la mina (proporcionado por WSP), para así tener conocimiento de la cantidad de roca estéril (dividida en las diferentes unidades geoambientales) que será depositada en el depósito de estériles en un tiempo específico.

Además, para la obtención de la concentración de cada elemento químico, se hizo necesario tener conocimiento del volumen o tasa de infiltración a la que está sometida el depósito de estériles durante el mismo periodo de tiempo del material depositado.

Teniendo la cantidad de roca estéril (masa reactiva de material que estará en contacto con el volumen de agua infiltrada), las tasas de lixiviación calculadas por grupo Pr y NPr; y por tipo de flujo representativo (first flush o estable) y el factor de escala, se procedió a escalar las tasas de lixiviación, y a la vez, transformarlas en masa liberada por mes (mg/mes) usando la siguiente ecuación:

$$M_{campo} \left( \frac{mg}{mes} \right) = \left( (TL_{NPr} * M_{NPr}) + (TL_{Pr} * M_{Pr}) \right) * SF * N \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde  $M_{campo}$  es la masa liberada en campo (masa liberada escalada), TL es la tasa de lixiviación del correspondiente al tipo material en (mg/kg/semana), M es la cantidad de material depositado correspondiente al tipo de material en kg, SF el factor de escala y N el número de semanas del correspondiente mes en estudio.

Esta ecuación se utilizó para calcular tanto las masas liberadas escaladas a partir de las tasas de lixiviación de first flush, como a partir de las tasas de lixiviación estables.

Una vez obtenidas las masas liberadas escaladas, estas fueron convertidas a concentración (mg/L), multiplicando las masas liberadas escaladas por el caudal mensual existente con respecto al flujo que representa:

- Para el caso de las masas liberadas escaladas a partir de las tasas de lixiviación de first flush, se utilizó el caudal mensual existente para el flujo no saturado que atraviesa el depósito de estériles.
- Para el caso de las masas liberadas escaladas a partir de las tasas de lixiviación estables, se utilizó el caudal mensual existente para el flujo saturado que atraviesa el depósito de estériles.

Así, se calculó la concentración escalada para cada flujo a partir de la Ecuación 16

$$C = \frac{\text{Masa liberada} \left( \frac{mg}{mes} \right)}{Q \left( \frac{L}{mes} \right)} \left( \frac{mg}{L} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

A partir de estas concentraciones encontradas, se realizó una mezcla de aguas proporcional de estos dos flujos según el mes correspondiente, de tal forma de obtener solo una concentración escalada final que represente al mes calculado.

Todo este procedimiento se realizó para el rango de meses desde enero 2016 hasta diciembre 2019.

Para el cálculo de las concentraciones escaladas a partir de los factores de escala encontrados con la metodología de razón campo/celda de humedad, se utilizó el mismo procedimiento, haciendo la diferencia en la Ecuación 13, en donde cada tasa escalada de un parámetro en específico, se calculó con el factor de escala específico encontrado para ese parámetro; y no utilizando un factor de escala general para todas las tasas de los elementos como se hizo en el escalamiento a partir de los subfactores de escala.

### 3.5. Validación de las metodologías

Para determinar si las concentraciones escaladas a través de los factores de escala encontrados a través de las diferentes metodologías son factibles, los resultados obtenidos de concentración se compararon con las concentraciones de muestras de agua extraídas del punto ABDP ubicado aguas abajo del botadero estudiado (a pie de botadero), obtenidas a partir de campañas de monitoreo por WSP.

El presente trabajo, la validación se enfocó principalmente para la simulación del pH, Cu y  $SO_4$ , dado que estos parámetros son buenos indicadores de un potencial generador de drenaje ácido, por lo que se utilizaron estos parámetros del punto de monitoreo ABDP (Tabla 5) para calibrar las concentraciones escaladas cuya variación temporal se presenta en la Figura 11. Como se observa, el cobre, sulfato y la conductividad eléctrica tienen a ir aumentando a medida que pasa el tiempo, mientras que, en el pH, se observa una notable disminución, llegando hasta aproximadamente 4, siendo catalogado como ácido.

Tabla 5: Promedio de parámetros químicos principales monitoreados entre 2016 y 2019 del punto de monitoreo ABDP

Parámetro	Unidad	Valor
pH	-	4,8
Cu	mg/l	1,485
$SO_4$	mg/l	270,2

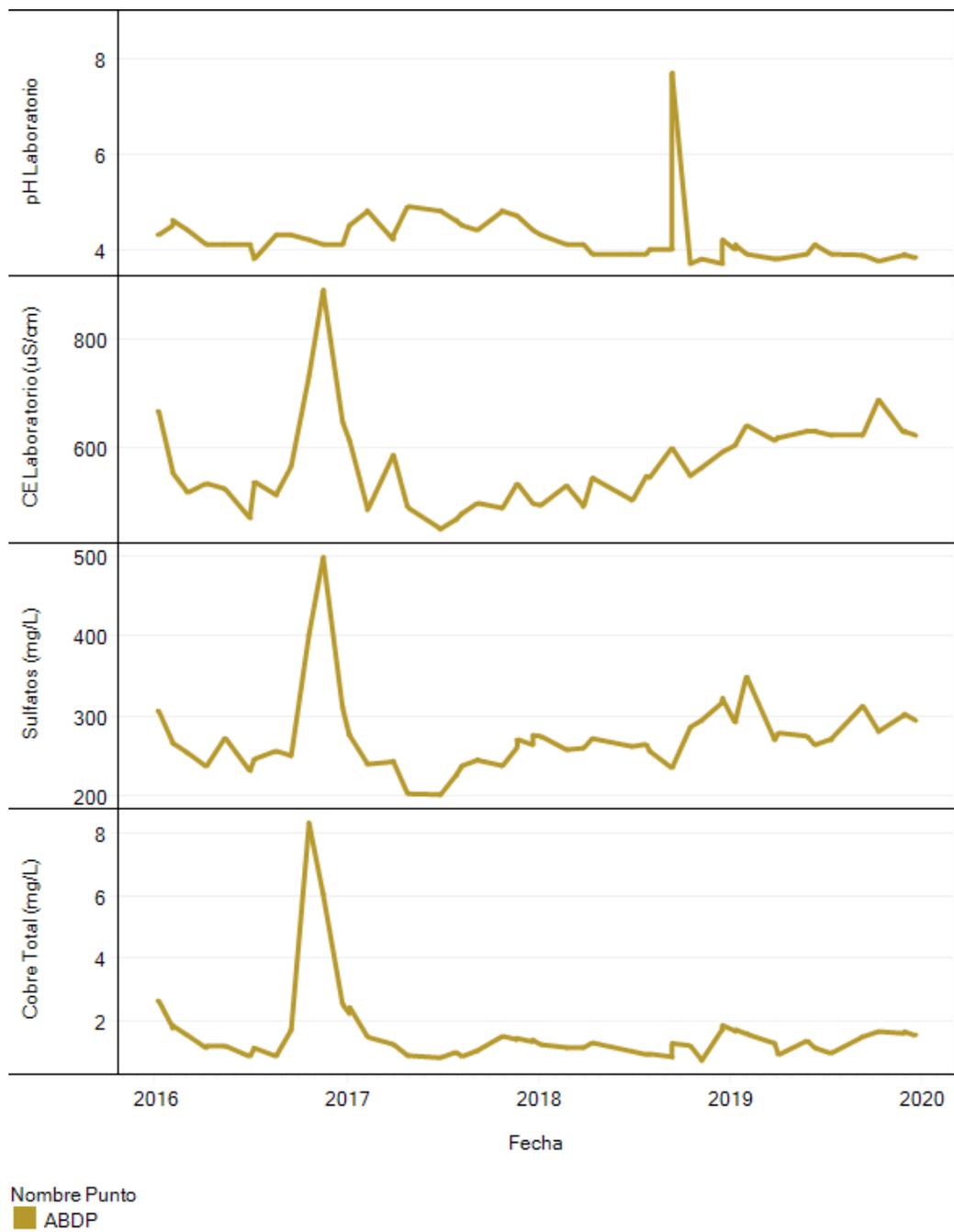


Figura 11: Variación temporal de pH, conductividad eléctrica, sulfato y cobre para el punto de monitoreo ABDP.

## 4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados tanto para la selección de metodología utilizada, para el cálculo de factores de escala a partir de las dos diferentes metodologías seleccionadas y para el escalamiento de las celdas de humedad a partir de estos últimos.

### 4.1. Metodologías seleccionadas

A partir de la revisión de estudios previos en la sección de antecedentes, se determinó utilizar ambos enfoques de metodología existentes: tanto la razón de tasas de lixiviación de campo vs tasas de lixiviación de celda de humedad, como la utilización de subfactores de escalamientos obtenidos a partir de fórmulas y/o antecedentes de estudios similares. Dado que para esta última metodología existen varias formas de obtener estos subfactores, se determinó la utilización de 4 subfactores de escala utilizando las siguientes formas de obtención, debido a la disponibilidad de datos e información del caso estudio:

1. Para el subfactor de temperatura, se seleccionó el método de cálculo a partir la ecuación de Arrhenius debido a que esta es la más utilizada en los estudios previos, además de poder ser utilizable a partir de la información que se tiene del caso estudio.
2. Para el subfactor de tamaño de grano, se seleccionó el método de revisión de estudios anteriores y sus características, y en base a esto, proponer un valor para este subfactor que se adecua a las características del depósito de estériles en estudio. No fue posible utilizar alguna fórmula debido a la falta de información con respecto a la distribución y tamaño de partícula existente en campo para poder hacer la comparación con el tamaño de partícula existente en las celdas de humedad.
3. Para el subfactor de contacto con el agua, se utilizó un modelo hidrológico generado anteriormente por WSP, con el cual se determinó el porcentaje de masa de roca que está en contacto con el flujo de agua, según la zona a la que perteneciera (zona saturada o zona no saturada).
4. Por último, se introdujo un cuarto subfactor de escala, correspondiente a la concentración de oxígeno, el cual, si bien, está presente en la revisión de trabajos anteriores, este se presenta en los estudios relacionándolo a depósitos de estériles por medio de modelos de oxidación, por lo que es factible su utilización como subfactor de escala.

Para el caso del enfoque con respecto a la razón de tasas de lixiviación de campo vs tasas de lixiviación de celda de humedad; se utilizó el método utilizado por Kirchner & Mattson (2015) debido a la simplicidad de su forma de calcular las tasas de lixiviación de campo y a la disponibilidad de datos con respecto al caso estudio.

## 4.2. Factor de Escala

Los métodos seleccionados y base de datos descritos en la sección de metodología, se utilizaron para tener un mayor acercamiento con respecto a las características del drenaje a escala de campo a partir de factores de escala encontrados a través de dos metodologías seleccionadas: razón campo/celda de humedad, y el cálculo empírico de estos a través de fórmulas y/o valores de estudios anteriores.

### 4.1.1. Método razón Campo/Celda de humedad

Para los siguientes resultados, se utilizó el promedio de las tasas calculadas del punto ABDP para un total de 17 variables, que corresponden a elementos mayores (Mg, Na, K, Fe, Al, Ca,  $SO_4$ ), elementos menores y trazas (As, Ba, Cd, Co, Mo, Cu, Ni, Zn, Se) y  $H^+$ ; y el promedio de las tasas obtenidas en las celdas de humedad, donde se escogieron estos grupos de elementos a partir de los estudios previos revisados.

Se encontraron un total de 1224 factores de escala (72 muestras x17 elementos) con datos in situ tomados entre 2014 y 2019, los cuales se presentan en la Tabla 5 promediados según el elemento al que pertenecen y con sus respectivos máximos y mínimos.

Tabla 6: Promedio de factores de escalas calculados a partir de la razón campo/celda

Elemento	Promedio factor de escala	Máximo factor de escala	Mínimo factor de escala
Al	2,96893E-05	6,74102E-05	5,86746E-06
As	2,84169E-05	0,00015453	7,48957E-06
Ba	9,61767E-05	0,000170859	3,34608E-05
Ca	0,000130606	0,000718333	3,82932E-05
Cd	0,000108305	0,000293893	1,03438E-05
Co	4,46945E-05	7,99845E-05	1,5664E-05
Cu	1,98264E-05	0,000214143	1,47816E-06
Fe	3,13197E-05	0,000418391	4,02876E-07
K	2,86601E-05	0,000139198	7,05756E-06
Mg	0,000327909	0,002066524	5,81247E-05
Mn	0,000212695	0,001662803	3,01639E-06
Na	3,97438E-05	0,000136421	1,21873E-05
Ni	0,00015215	0,00026769	5,2424E-05
Se	2,57415E-05	5,21875E-05	8,28639E-06
$SO_4$	0,000132615	0,000701844	4,02733E-05
Zn	9,85568E-06	8,1955E-05	2,43632E-07
$H^+$	5,67432E-05	0,000318193	1,26558E-06

De la tabla anterior, se observa que los factores de escala se pueden agrupar en 3 grupos según el número decimal que tienen (Tabla 7). Con respecto al desglose, la mayor cantidad de factores encontrados se encuentran en el grupo de la cienmilésima ( $10^{-5}$ ) representando a un 59% de los resultados, seguidos por el grupo de la diezmilésima ( $10^{-4}$ ) que representa el 35% del total de datos, y en menor cantidad, el grupo de las millonésimas ( $10^{-6}$ ) representando solo un 6% (Figura 12).

Tabla 7: Grupos de factores de escala según lugar del decimal

Decimal	N° datos	% con respecto al total
$10^{-4}$	6	35%
$10^{-5}$	10	59%
$10^{-6}$	1	6%
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>100%</b>

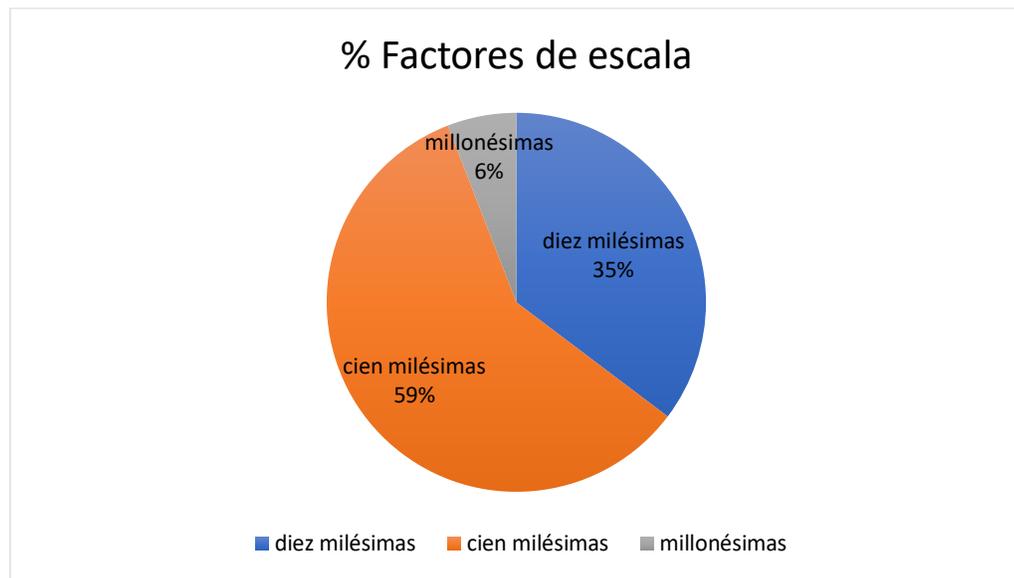


Figura 12: Porcentajes de grupos de factores de escala según lugar del decimal

#### 4.1.2. Método cálculo empírico

Si bien existen varias características de los depósitos de estériles escalables, se recomienda no exceder los 3 factores de escalamiento al momento de calcular el CSF, dado que su valor disminuye a medida que se consideran más factores de escala individuales (Morin, 2013) debido a la multiplicación entre estos, por lo que, para el presente trabajo, se utilizaron los factores que se consideraron los más relevantes para escalar las tasas de lixiviación. Es por esto, que se obtuvieron cuatro factores de escala distintos: factor de contacto, de temperatura, de tamaño de grano y de concentración de oxígeno. Se propuso utilizar los 3 primeros para escalar las tasas, dada la recomendación de la bibliografía de no exceder los 3 factores, sin embargo, se introdujo un cuarto para ver como variaban los valores obtenidos.

##### a) Factor de contacto:

A partir de un modelo conceptual hidrológico simplificado, se proponen dos factores de contacto, debido a que el depósito de estériles en estudio presenta una zona saturada y una no saturada (Figura 13). La zona no saturada, abarca el 90% superior del total de masa del depósito de estériles, estando los flujos de agua en contacto solo con el 10% del material rocoso correspondiente a esta zona, mientras que la zona saturada, abarca el 10% inferior del total de masa del depósito de estériles, estando los flujos de agua en contacto con el 100% del material rocoso correspondiente a esta zona.

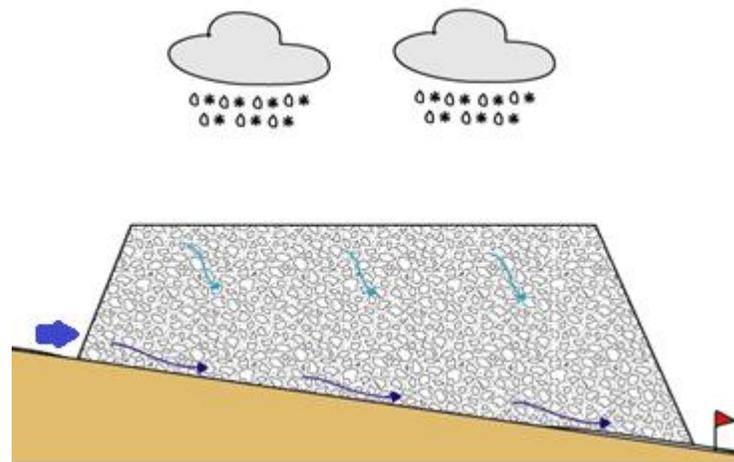


Figura 13: Distribución de flujos en el depósito de estériles estudiado. Flechas celestes indican flujo no saturado. Flechas azules indican flujo saturado. Bandera roja indica punto ABDP de monitoreo.

Esto significa que un 10% del material del depósito se encuentra en contacto con el flujo saturado y que un 9% se encuentra en contacto con el flujo no saturado, teniendo factores de escalas diferentes para los distintos flujos: de 0,1 para el flujo saturado y 0,09 para el flujo no saturado.

Teóricamente, el factor de contacto puede tener un rango de 0 a 1, pero la probabilidad de que el agua entre en contacto con el 0% o el 100% de la roca del botadero es cero.

b) Factor de temperatura:

El factor de temperatura para el depósito de estériles en estudio (basado en la ecuación de Arrhenius revisada en antecedentes, en las temperaturas de campo, laboratorio y en la energía de activación de un mineral específico) dio un resultado de aproximadamente de 0,2 para efectos de escalamiento.

Este factor de escala se calculó a partir de la temperatura promedio de cada mes del sitio donde se encuentra el depósito de estériles (Tabla 8), calculándose un factor de escala mensual y obteniendo una mediana de todos estos datos.

La temperatura para las celdas húmedas que se utilizó, corresponde a la temperatura que tiene la habitación en la que se realizan los tests, que normalmente rodea los 20° aproximadamente (MEND,2000). Para la constante de gas universal, en términos de [kJ/mol/K], se tiene conocimiento que es 0,008314.

Para el caso de la energía de activación, se observa que los minerales sulfurados que más se presentan en los depósitos de estériles generados a partir de un yacimiento tipo pórfido cuprífero, son la pirrotina y la pirita. Se utilizó la energía de activación de esta última dada la existencia de una mayor cantidad de esta en las muestras de roca del botadero. Según la literatura (MEND, 2006), se observa que la pirita tiene una energía de activación que va de los 50 a 60 kJ/mol (Figura 14), por lo que se usa una media de 55 kJ/mol.

Tabla 8: Resumen de los factores de escala de temperatura por mes

Mes	Temperatura Promedio Mensual (°C)	Factor de Escala
Enero	10,39	0,34
Febrero	9,45	0,31
Marzo	8,6	0,29
Abril	5,79	0,23
Mayo	2,03	0,16
Junio	-0,81	0,13
Julio	-1,01	0,12
Agosto	-0,92	0,12
Septiembre	0,68	0,14
Octubre	3,10	0,18
Noviembre	5,47	0,22
Diciembre	8,37	0,29

Los factores obtenidos por mes se encuentran en un rango de 0,12 y 0,34, resultando una mediana de 0,2 para el factor de temperatura.

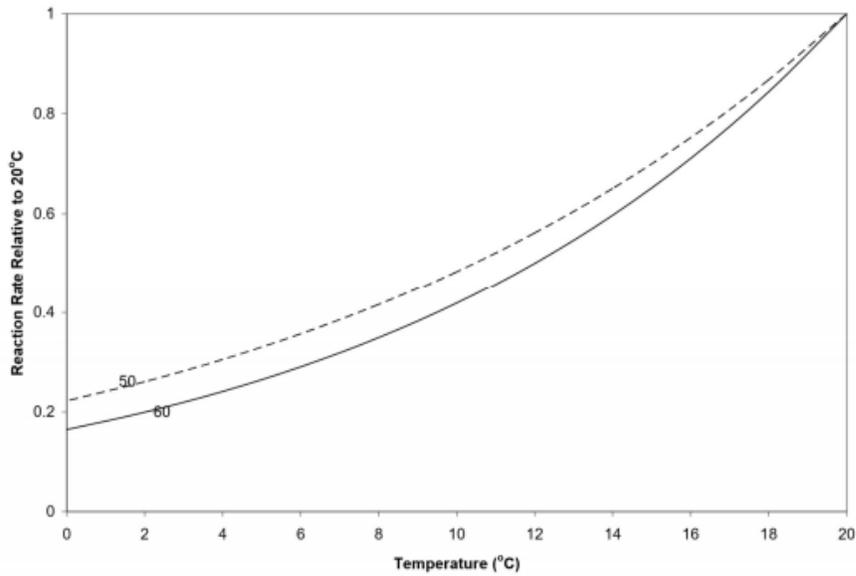


Figura 14: Tasa de reacción de la pirita en función de la temperatura a partir de la energía de activación de la pirita en 50 y 60 KJ/mol. (Información extraída de MEND,2006).

c) Factor de tamaño de grano:

Según el tipo de mina de donde se extrae el material que será depositado (que influye en el tipo de tronadura) este factor va a variar, dado que las minas a cielo abierto suelen tener tamaños de granos mayores a aquellas del tipo subterráneo, debido al tipo de tronadura que se le aplica para extraer el material estéril. A partir de los estudios revisados, se estima que la fracción de <25mm representa entre el 10% y 40% en masa de un depósito de estériles típico. Dada la falta de trabajo detallado sobre la distribución del tamaño de grano del botadero estudiado y en base a que el material extraído proviene de una mina del tipo cielo abierto, de un yacimiento tipo pórfido cuprífero, se implementó un factor de escala conservador de 0,1 (10%) para hacer la diferencia entre los distintos tamaños de roca que se encuentran depositados en el depósito de estériles.

d) Factor de concentración de oxígeno

Debido a la falta de información con respecto a este parámetro en el depósito de estériles estudiado, y en base a que en general en los trabajos estudios no se implementa este tipo de factor, se implementó un factor de escala conservador de 0,1 (10%) para la corrección entre la diferencia de concentraciones entre las celdas de humedad y el depósito de estériles.

Considerando solo la multiplicación de los tres primeros parámetros, se obtuvo un factor de escala acumulado de 0,002 para la extrapolación de las tasas de lixiviación entregadas por las celdas de humedad para el caso del flujo saturado y un factor de escala acumulado de 0,0018 para el caso del flujo no saturado.

Considerando el cuarto parámetro (concentración de oxígeno), se obtuvo un factor de escala acumulado de 0,0002 para la extrapolación de las tasas de lixiviación entregadas por las celdas de humedad para el caso del flujo saturado y un factor de escala acumulado de 0,00018 para el caso del flujo no saturado.

### 4.3. Tasas de lixiviación

Se calcularon dos tipos de tasas de lixiviación para el material Pr y NPr a partir de las celdas de humedad para elementos mayores (Mg, Na, K, Fe, Al, Ca, SO<sub>4</sub>), elementos menores y trazas (As, Ba, Cd, Co, Mo, Cu, Ni, Zn, Se) y H<sup>+</sup>. Esto, para representar los distintos tipos de flujo (el flujo inicial o “first flush”, correspondiente a un flujo no saturado, y un flujo estable, correspondiente a un flujo saturado). En las Tablas 9 y 10 se observan los promedios calculados para las tasas según tipo de material (Pr o NPr) para el “first flush” y para las tasas “estables”, respectivamente.

- a) Promedio tasas de lixiviación de “first flush” (considera las 10 primeras semanas de análisis de las celdas de humedad)

Tabla 9: Promedio tasas de lixiviación de “first flush” por elemento para material primario y no primario.

Promedio tasa HCT Elemento (mg/kg/semana)	Pr	NPr
Al	0,219	0,454
As	0,005	0,0006
Ba	0,009	0,006
Ca	155,554	34,018
Cd	0,001	0,002
Co	0,007	0,014
Cu	0,434	3,553
Fe	0,050	0,123
K	4,500	3,750
Mg	2,785	1,582
Mn	0,097	0,071
Na	11,615	6,462
Ni	0,002	0,004
H <sup>+</sup>	2,0251E-06	6,373E-06
Se	0,0004	0,003
SO <sub>4</sub>	342,426	86,023
Zn	0,273	0,907

b) Tasas de lixiviación “estables” (considera todas las semanas de análisis de las celdas de humedad)

Tabla 10: Promedio tasas de lixiviación de “estables” por elemento para material primario y no primario

Promedio tasa HCT Elemento (mg/kg/semana)	Pr	NPr
Al	0,337	0,942
As	0,013	0,0004
Ba	0,007	0,003
Ca	119,521	18,947
Cd	0,001	0,001
Co	0,005	0,008
Cu	0,835	4,109
Fe	0,096	0,355
K	2,379	1,683
Mg	1,674	0,783
Mn	0,087	0,036
Na	5,752	3,125
Ni	0,001	0,002
$H^+$	6,5395E-06	3,2352E-05
Se	0,0003	0,001
$SO_4$	272,885	55,116
Zn	0,199	0,548

Se tiene una gran variedad de tasas de lixiviación, en donde se destacan las tasas de  $SO_4$  y Cu. Las tasas de lixiviación estables para el caso de  $SO_4$  son menores con respecto a las tasas de first flush, con valores de 272 y 55 mg/kg/semana para el material Primario y No Primario respectivamente, mientras que para las tasas de first flush se tienen valores de 342 y 86 mg/kg/semana para el material Primario y No Primario respectivamente. Para el Cu, se tienen valores para las tasas estables de 0,83 y 4,1 mg/kg/semana para el material Primario y No Primario respectivamente, mientras que para las tasas de first flush se tienen valores de 0,4 y 3,55 para el material Primario y No Primario respectivamente.

## 4.4. Tasas de lixiviación escaladas

Como se destacó en la metodología, dado que el presente trabajo pretende evaluar las metodologías de escalamiento, enfocadas a la caracterización de un potencial generador de drenaje ácido, se utilizaron principalmente los resultados obtenidos para el  $\text{SO}_4$ , Cu y pH desde esta sección en adelante, dado que son los parámetros más relevantes en la caracterización del potencial de generación de drenaje minero ácido.

Se escalaron las tasas de lixiviación encontradas anteriormente, convirtiéndolas en masa liberada por mes, considerando el número de semanas de cada mes y la cantidad de material depositado desde enero 2016 hasta diciembre 2019. Este procedimiento se realizó tanto para las tasas de “first flush”, como para las tasas generales. A continuación, los resultados de las tasas de lixiviación escaladas se dividen según la metodología utilizada para calcular los factores de escala utilizados (Tabla 11).

Tabla 11: Promedio de tasas escaladas para  $\text{SO}_4$ , Cu y  $\text{H}^+$  por tipo de flujo, tipo de metodología de factores de escala y tipo de material

Tipo metodología	Tipo Flujo	Parámetro	NPr (mg/kg/semana)	Pr (mg/kg/semana)
Razón campo/celda de humedad	Flujo Saturado	$\text{SO}_4$	0,003	0,01
		Cu	3,1e-5	6,3e-6
		$\text{H}^+$	1,4e-9	2,9e-10
	Flujo No saturado	$\text{SO}_4$	0,005	0,02
		Cu	2,6e-5	3,2e-6
		$\text{H}^+$	2,8e-10	9e-11
Cálculo Empírico	Flujo Saturado	$\text{SO}_4$	0,11	0,5
		Cu	0,008	0,001
		$\text{H}^+$	6,4e-8	1,3e-8
	Flujo No saturado	$\text{SO}_4$	0,15	0,61
		Cu	0,006	0,0007
		$\text{H}^+$	1,1e-8	3,6e-9

## 4.5. Concentraciones escaladas

Los siguientes resultados están basados en las masas liberadas escaladas anteriormente y en los caudales mensuales promedio simulados en otro estudio del flujo en la zona saturada y no saturada del depósito de estériles. Para esta sección se realizó una mezcla de ambos flujos existentes con sus respectivas tasas de lixiviación otorgadas anteriormente, de manera de simular el comportamiento de estos flujos. Se dividen según la metodología utilizada para calcular los factores de escala utilizados.

### 4.5.1. Método razón Campo/Celda de humedad

De la Figura 17, se observa que, para el  $SO_4$ , las concentraciones varían entre valores de 1192 y 44 mg/L; para el Cu, las concentraciones varían entre valores de 5,4 y 0,1 mg/L, y para el pH, los valores se encuentran entre 5,2 y 3,7 (Tabla 12), donde los dos primeros parámetros tienden a ir en aumento a medida que pasa el tiempo, mientras que el pH tiene a ir disminuyendo su valor.

Tabla 12: Valores de concentraciones escaladas de  $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda.

Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo
pH	-	4,4	5,22	3,7
Cu	mg/l	1,6	5,4	0,1
$SO_4$	mg/l	406	1192	44

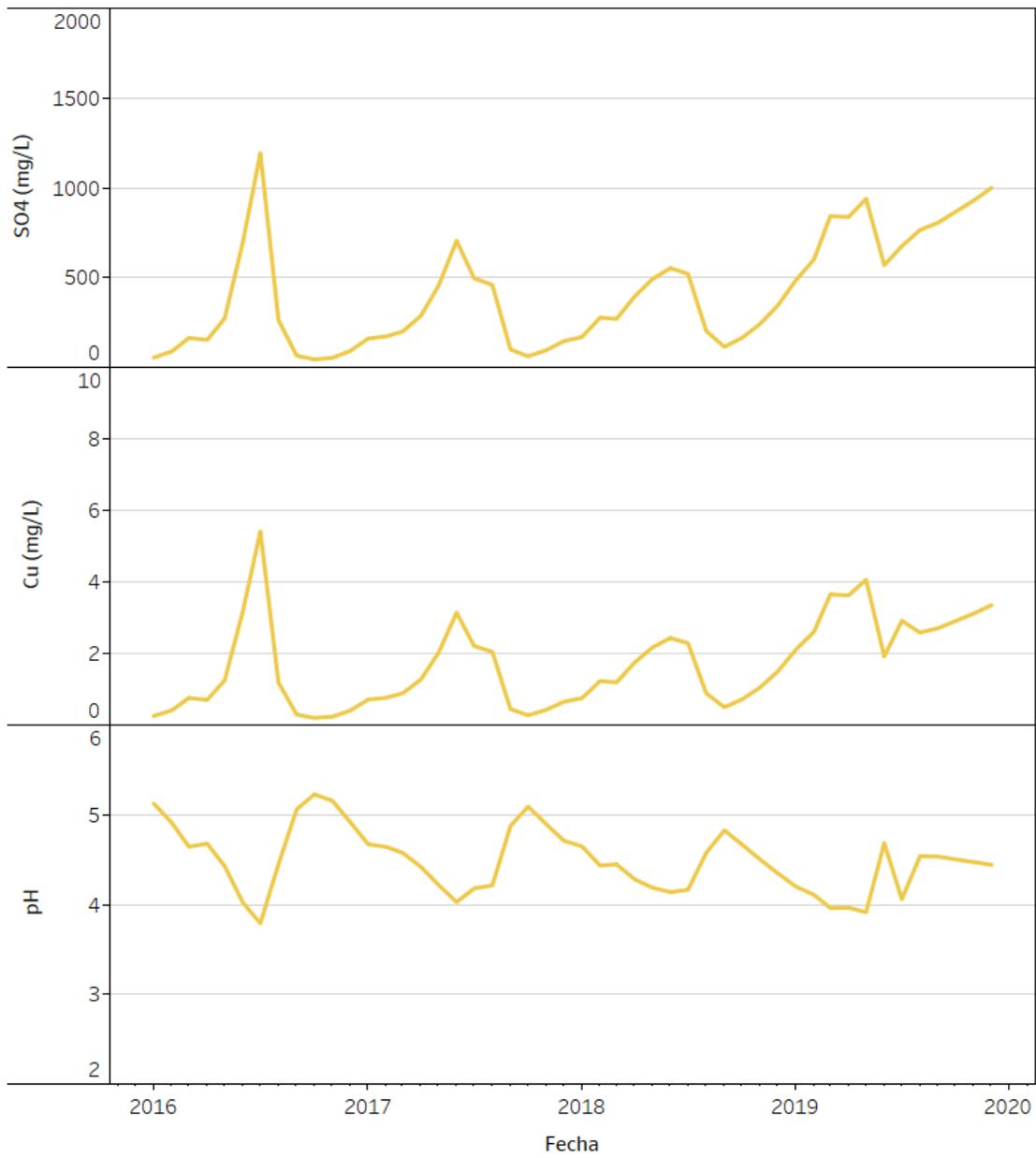


Figura 15: Variación temporal de las concentraciones escaladas de  $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda.

#### 4.5.2. Método cálculo empírico a partir de 3 subfactores de escala

Se observa que, para el  $SO_4$ , las concentraciones varían entre valores de 34.053 y 1.262 mg/L; para el Cu, las concentraciones varían entre valores de 1.369 y 50 mg/L, y para el pH, los valores varían entre 3,5 y 2,1 (Tabla 13), donde los dos primeros parámetros tienden a ir en aumento a medida que pasa el tiempo, mientras que el pH tiene a ir disminuyendo su valor (Figura 18).

Tabla 13: Valores de concentraciones escaladas de  $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica.

Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo
pH	-	2,8	3,5	2,1
Cu	mg/l	422	1.369	50
$SO_4$	mg/l	11.477	34.053	1.262

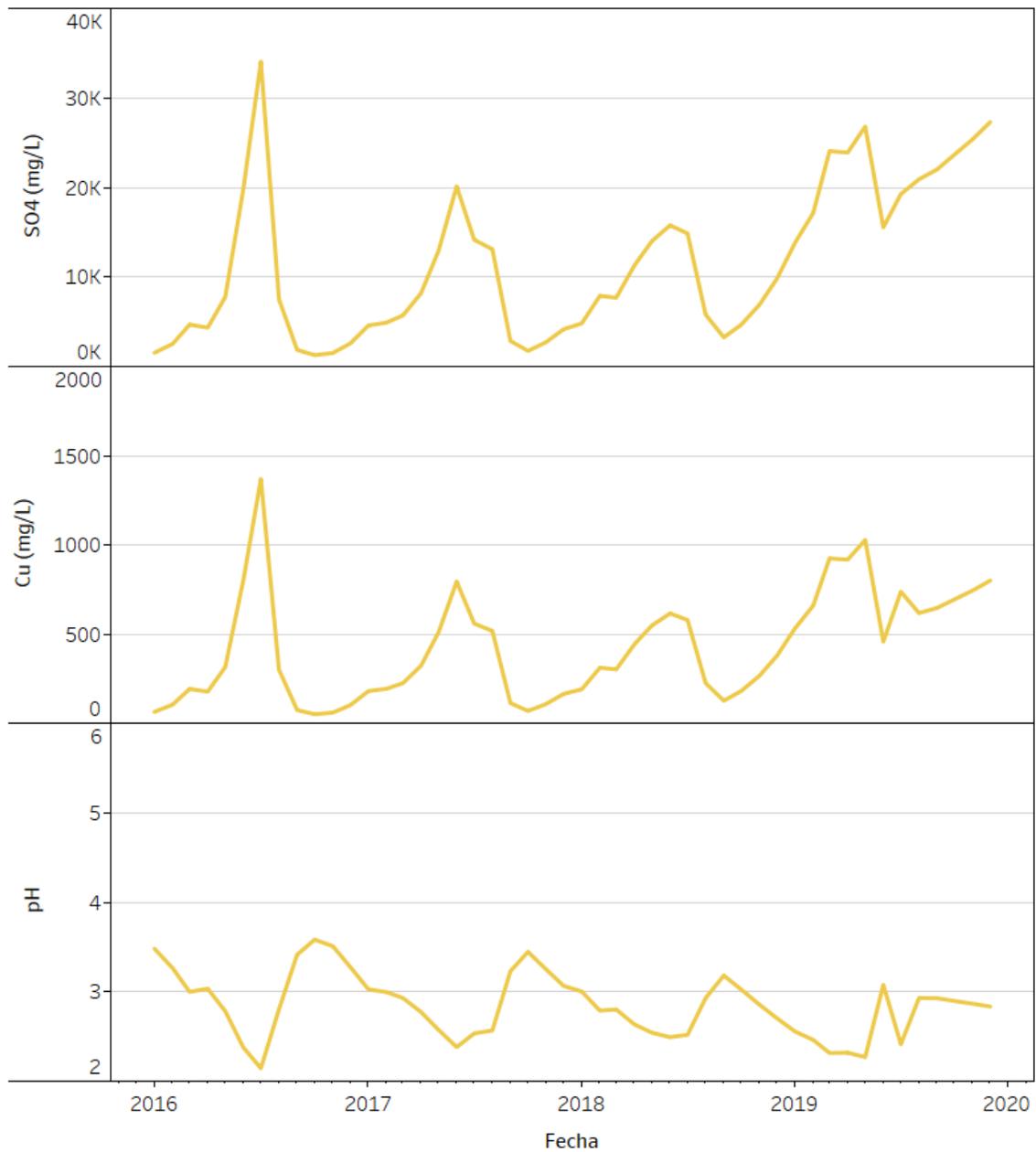


Figura 16: Variación temporal de las concentraciones escaladas de  $SO_4$ , Cu y pH a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica.

En general, para las Figuras 15 y 16, se observa que las concentraciones escaladas presentan un comportamiento oscilatorio parecido con respecto a la variación temporal, sin embargo, presentan distinto rangos de valores para las concentraciones de  $SO_4$ , Cu y pH.

## 5. Discusión

### 5.1. Metodologías seleccionadas

A partir de las metodologías seleccionadas, a modo de discusión se compararon tanto las ventajas como desventajas de cada una al momento de seleccionarlas para ser utilizadas.

La selección de la metodología a utilizar se basó principalmente en los datos disponibles del caso ejemplo de depósito de estériles que se utilizó, sin embargo, existen ciertas ventajas y desventajas de las metodologías revisadas en caso de que se contase con todos los datos que éstas requieren para su utilización.

Por un lado, se tienen las metodologías basadas en la razón campo/celda de humedad, las cuales se presentan a continuación:

Para el caso de Lapakko (2015), su principal ventaja es que el cálculo de los factores de escala se basa principalmente en la comparación de datos de terreno vs los datos entregados por el laboratorio; sin embargo, como desventaja para este trabajo, dentro de los datos de laboratorio, además de ocupar celdas de humedad utiliza un reactor como apoyo de éstas, en donde en el presente estudio no se contaba con este aparato. Además, para obtener los datos de terreno, utiliza fórmulas para calcular específicamente la masa liberada de sulfato anual, a partir de las concentraciones de sulfato liberada y el volumen de agua diario, las cuales Para el caso del presente trabajo, estas fueron las desventajas principales para no ocupar este método, sin embargo, si se contara con los datos que se utilizan en esta metodología, podrían llegar a ser beneficiosos debido a una mayor exactitud que se le estaría otorgando al cálculo de los factores de escala.

Por otro lado, para el caso de Kirchner & Mattson (2015), si bien se decidió utilizar esta metodología debido a la simpleza del cálculo de la tasa del elemento en estudio; no se utilizó completamente, ya que además de utilizar celdas de humedad, éste utiliza columnas y barriles de campo para comparar la eficacia de cada ensayo cinético a diferentes escalas, teniendo un mejor alcance de los resultados encontrados y de la validación que podría llegar a tener cada uno de estos ensayos cinéticos con respecto al sitio en el cual se están empleando, siendo esta una desventaja para el presente trabajo debido a la falta de ensayos cinéticos de mediana escala empleados, pero podría ser una gran ventaja para algún estudio que tenga la disponibilidad de utilizar estos ensayos, debido a que otorgan información con respecto a la calidad química del drenaje liberado a distintas escalas.

Ahora, con respecto al trabajo de Hanna & Lapakko (2012), este utiliza fórmulas distintas para calcular la tasa de liberación de sulfato de laboratorio y de campo, en las cuales, asume que todo el sulfuro existente está presente como pirita. Esto puede ser considerado como una limitación del método, debido a que podrían existir otros tipos de sulfuros, menos reactivos, que no se estarían reflejando en el cálculo de las tasas de lixiviación de sulfato. Como ventaja, se puede destacar que si el hecho anterior fuera real (que todo el sulfuro correspondiese a pirita), se tendría un mejor ajuste con respecto a las tasas de lixiviación de sulfuro que si no se utilizara esta normalización con respecto a la pirita.

Ahora bien, para las metodologías que obtienen los factores de escala a partir de fórmulas, en general se utiliza la misma base que es multiplicar los subfactores de escala que van a representar

a los distintos parámetros a corregir, pero en los distintos estudios revisados, difieren principalmente en la forma en que calcula u/o se encuentra los valores de estos subfactores.

Con respecto al trabajo de Malmstrom et al. (2000), utiliza 4 parámetros a corregir: la cantidad de material que están en contacto con el agua, la temperatura, el pH y la diferencia de tamaño de grano entre campo y celda de humedad. Para el caso del primer subfactor nombrado, este utiliza trazadores no reactivos, técnica que no siempre es utilizada, sin embargo, muestra datos más cercanos a la realidad con respecto a las potenciales vías de flujo preferencial y agua inmóvil existente dentro del depósito de estériles, por lo que es considerado una desventaja solo en el caso que no se contase con esta técnica. Luego, para el factor de temperatura, utiliza la ecuación de Arrhenius, la cual es utilizada en todos los estudios que calculan el factor de escala, siendo esta una ventaja debido a la simpleza de los datos que esta utiliza (las temperaturas tanto de campo como de laboratorio). Por otro lado, el cálculo del subfactor de pH, utiliza órdenes de reacción con respecto a protones, además de energía de activación y orden de reacción obtenidos a partir de literatura para cada mineral individual; información que, si no se maneja con claridad, puede llegar a tener confusiones y confundir los valores de estos datos para el cálculo del valor de corrección del pH. Por último, para la corrección del tamaño de partícula, utiliza datos de fracciones de tamaño de partícula asociadas a coeficientes de frecuencias, datos que no son considerados simples debido a que se debe tener una base de datos con las distintas fracciones de tamaño y sus porcentajes existentes. En general (omitiendo el cálculo de factor de temperatura), se observa que la información utilizada en las fórmulas propuestas tienen un mayor grado de complejidad, y que no necesariamente todos los casos a estudiar tendrán a disposición toda esta información (como lo es el caso del presente estudio), es por esto, que si bien las fórmulas incluyen más información con respecto a los parámetros estudiados, lo cual puede ser considerado una ventaja si se cuenta con la información necesaria debido a la exactitud que esta podría otorgar, en general no todos los estudios cuentan con esta información, por lo que es considerado una desventaja al momento de querer utilizar estas ecuaciones.

En los próximos tres trabajos analizados, estos utilizan los mismos tres parámetros a corregir: la temperatura, el tamaño de grano y la cantidad de material rocoso que está en contacto con el agua, donde, StrataGold (2014) incluye un cuarto parámetro con respecto a la cobertura del depósito de estériles. Cabe destacar que en estos 3 estudios se calculó el subfactor de escala con respecto a la temperatura a partir de la misma fórmula de Arrhenius, siendo esto una ventaja en estos tres trabajos debido a la simpleza de los datos que utiliza esta fórmula.

En el trabajo de SRK Consulting (2006), el valor del subfactor para el tamaño de grano, se calculó la relación entre la masa reactiva de grano fino ( $M_r$ ) y la masa total ( $M$ ), lo cual es una ventaja de este método debido a que se obtiene un valor exacto para esta razón existente entre ambas escalas, mientras que el subfactor de contacto con el agua se determinó a partir de trabajos anteriores. Esto último puede ser considerado como una desventaja, ya que, si bien se estima a partir de caso de depósitos de estériles estudiados anteriormente con similitudes en su mineralogía/tipo de yacimiento/ambiente, etc; los parámetros escalables nunca van a ser iguales en distintos casos de estudios, por lo que el asignar un valor calculado a partir de características similares, pero no iguales, puede interferir en la exactitud del valor del parámetro escalable.

Por otro lado, StrataGold (2014), el valor para el subfactor de contacto con el agua, lo determinó a partir de la infiltración mensual existente en el depósito de estériles (considerando solo el valor

mensual de las precipitaciones), considerándose una ventaja debido a la exactitud que tiene este método con respecto al agua infiltrada. Podría ser considerado una desventaja, si el caso fuera, por ejemplo, que el depósito de estériles tuviera un flujo de agua en la cabecera de éste, agregando otro aporte de agua (aparte de las precipitaciones), siendo poco realista entonces utilizar solo las precipitaciones como flujo entrante en el depósito de estériles; mientras que, para el factor de tamaño de grano, se determinó a partir de estudios anteriores, lo cual es considerado una desventaja debido a las razones que se explicaron anteriormente con respecto a la similitud y exactitud de las características escalables.

Por último, Phase Geochemistry (2018), en general no tiene ventajas con respecto a los métodos que utiliza para calcular los subfactores de escala utilizados, debido a que para el parámetro del factor de contacto con el agua, si bien obtiene un valor, no especifica como lo obtuvo; mientras que para el parámetro del tamaño de grano, al igual que el trabajo de StrataGold (2014), se basa en estudios anteriores para obtener el valor asignado; utilizando para ambos parámetros nombrados, metodologías consideradas desventajosas debido a la poca claridad con que encuentra estos valores.

## 5.2. Factores de Escala

### 5.2.1. Método razón campo/celda de humedad

A partir de la Tabla 7, en general se observa una gran variedad de factores de escala encontrados para los distintos elementos, dejando en claro que no es certero proponer un solo factor de escala por igual y la importancia que tiene el asignar un factor de escala específico para cada elemento. Estos factores de escala encontrados varían en un rango de entre 0,01% y 0,00008%, los cuales son considerablemente más bajos que el rango de 5% a 60% (0,05 y 0,6) definido por Morin (2013).

En el trabajo de Kirchner & Mattson (2015), en el cual realizan este procedimiento para el uso de celdas de humedad como para otras pruebas cinéticas, estudian dos diferentes casos en el que uno de ellos corresponde a un botadero a partir de un yacimiento tipo pórfido de oro con drenaje ácido. Para este depósito de estériles, la metodología entrega un rango de factores de escala de entre 0,17% y 0,002%, los cuales son mayores que los encontrados en el presente estudio, pero siguen siendo menores que el rango propuesto por Morin (2013), donde las diferencias se pueden deber a los distintos tipos de material que se encuentran en el depósito de estériles y la mineralización predominante en cada uno de estos, como en la cantidad de material de roca depositada.

Sin embargo, se observa un comportamiento parecido tanto en los elementos mayores como en los menores entre los resultados de Kirchner & Mattson (2015) y del presente estudio (Figura 17), donde los elementos menores tienden a tener valores de factores de excedencia relativamente más altos que los elementos mayores; es decir, que los elementos menores tienen valores de factores de escala menores a los elementos mayores (ya que son inversamente proporcionales) (Figura 17 y Figura 18). Esto sucede debido al control de los elementos mayores por parte de la solubilidad existente en las condiciones ácidas de ambos botaderos.

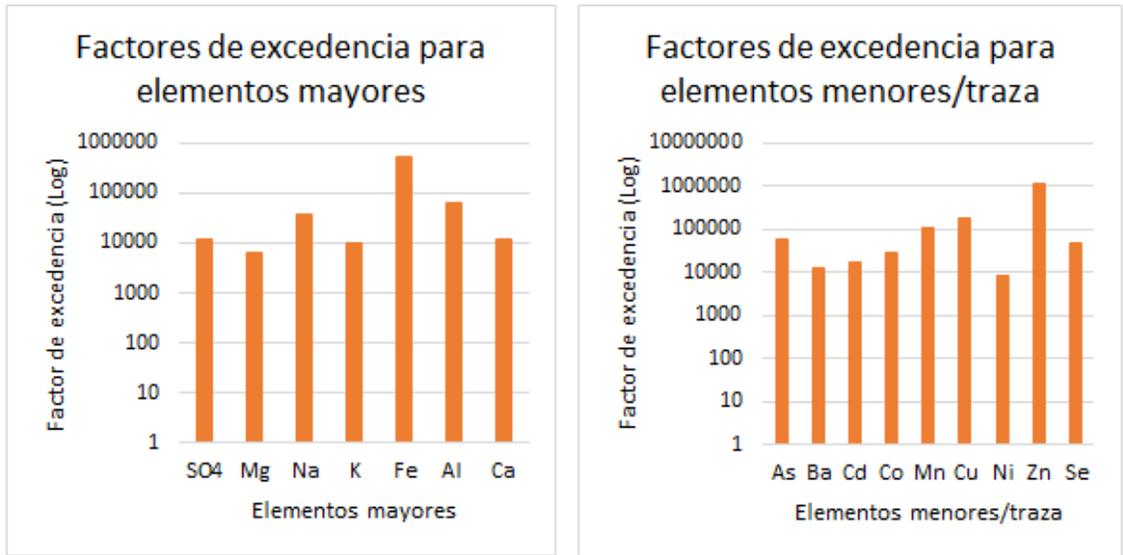


Figura 17: Resultados de factores de excedencia obtenidos para elementos mayores y menores/traza para celdas de humedad.

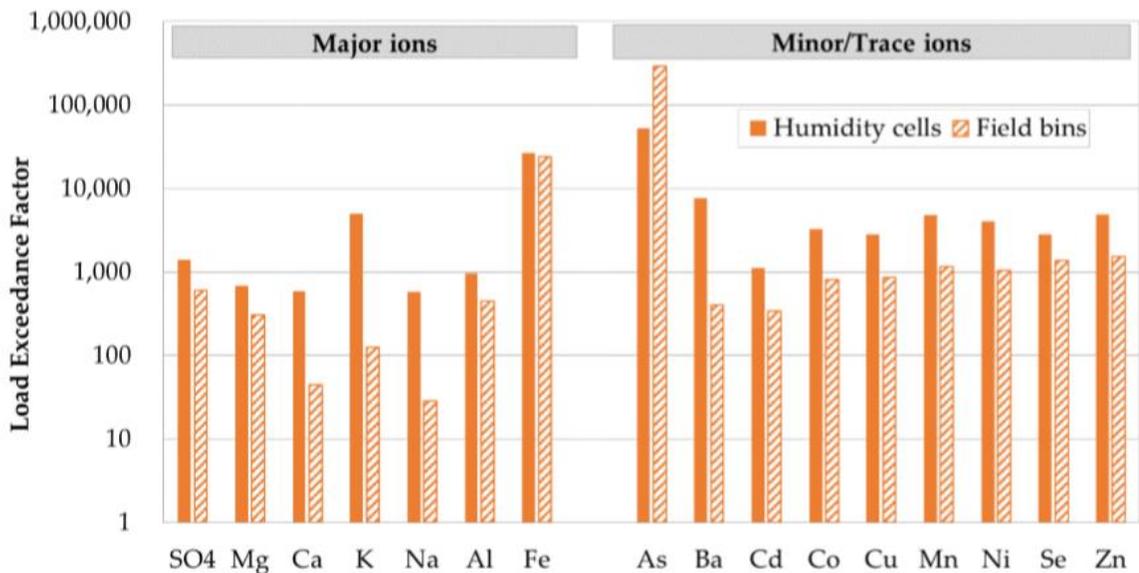


Figura 18: Factores de excedencia para elementos mayores y menores de Kirchner & Mattson 2015 para celdas de humedad y barriles.

Las diferencias entre los valores de los factores de escala por cada elemento, en comparación con los obtenidos por Kirchner & Mattson (2015), se deben a la mineralogía dominante existente en el depósito de estériles, dado que el material de ambos provienen de distintos tipos de yacimientos: pórfido cuprífero para el presente trabajo y pórfido de oro para Kirchner & Mattson (2015), llegando a tener este último un drenaje ácido con un pH parecido al depósito de estériles en estudio, con un valor de 3,2, mientras que a pie del depósito de estériles del presente estudio, se ha llegado a tener un valor de hasta 3,6.

Con respecto al trabajo de Lapakko (2015), el cual se centra en escalar las concentraciones de sulfato, este obtiene un rango de valores de factores de escala para este compuesto que va entre 0,019 y 0,687, concentrándose la mayor parte entre 0,053 y 0,21 (Figura 19). En comparación con el promedio obtenido para el sulfato en el presente trabajo, con un valor de 0,00013 promedio, se observa que este último queda totalmente bajo el rango encontrado por Lapakko (2015).

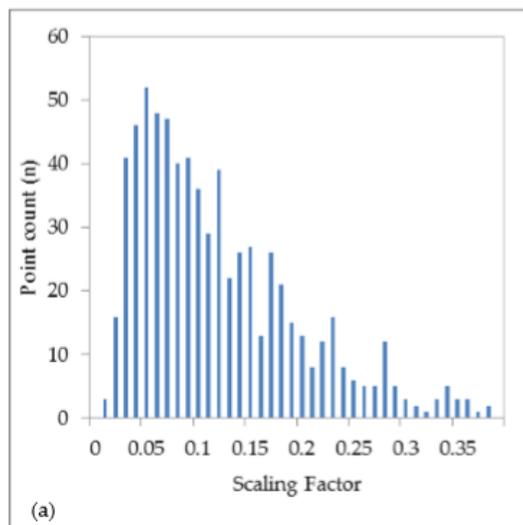


Figura 19: Histograma de factores de escala calculados por cantidad, obtenidos por Lapakko 2015.

La gran diferencia entre ambos valores se puede deber a que Lapakko (2015) utiliza una fórmula con la cual calcula la tasa anual de lixiviación de sulfato liberada a partir de una sumatoria de la masa liberada de sulfato por periodo; considerando de manera más directa la masa de sulfato liberada que la fórmula aplicada en el presente trabajo para encontrar las tasas de lixiviación de campo.

A partir de estos dos estudios revisados, se observa que los resultados obtenidos para los factores de escala por elemento no se parecen, pero con respecto a Kirchner & Mattson (2015) si se encuentra una similitud en el comportamiento de los factores de escala agrupados por elemento mayor y menor/traza.

Esto sucede ya que cada trabajo estuvo ligado a la disolución de un tipo de roca en específico en las celdas de humedad y a las diferentes condiciones específicas de clima y estructura del depósito de estériles en campo, lo que hace entender la importancia de las condiciones del sitio en que se encuentra el depósito de estériles, el material de éste y otros factores, que inciden en el cálculo de los factores de escala y que no es posible aplicar los mismo factores de escala para sitios distintos, pero si la misma metodología.

### 5.2.2. Método cálculo empírico

Con respecto a los valores encontrados en la sección de resultados para cada subfactor, estos se analizaron individualmente con respecto a los valores propuestos y/o encontrados en diferentes estudios revisados.

- a) Factor de contacto: Se obtuvo un valor de 0,1 para la zona saturada del depósito de estériles y un factor de 0,09 para la zona no saturada del depósito de estériles para el escalamiento de la diferencia del contacto del agua con las partículas rocosas que se encuentran en el depósito de estériles. Con respecto a la bibliografía revisada, se propuso un rango de valores para este factor de 0,01 a 0,65, dentro del cual se encuentran los valores adquiridos para el presente trabajo, siendo entonces estos, aceptables para su utilización. Este tipo de factor, normalmente se considera para flujos no saturados dentro de los depósitos de estériles, considerando solo como infiltración en el depósito de estériles el agua proveniente de precipitaciones. Para el caso de SRK Consulting (2006) utiliza un factor de escala de 0,2, basado en estudios anteriores que realizaron cálculos simples para trayectos de flujos largos que indicarían este valor (Morin 1991; Morin y Hutt 1997); mientras que, por otro lado, el trabajo de Phase Geochemistry (2018) obtiene un valor de 1 para corregir la diferencia del contacto de agua, asumiendo una posición muy conservadora con respecto a la realidad, ya que es casi imposible que un flujo de agua interactúe con el 100% de la roca depositada en el depósito de estériles. Otro caso muy distinto es el del trabajo de StrataGold 2014, el cual para calcular el factor de contacto utiliza el volumen de infiltración de cada mes dada las diferencias de volumen de agua precipitada por estación; además de considerar el crecimiento del volumen del depósito de estériles anual, el cual tiene sentido ya que mientras mayor es su volumen, menor va a ser el porcentaje de contacto del agua con la roca (Tabla 14).

Tabla 14: Factores de escala para el contacto con el agua a través del tiempo para Eagle Gold (Extraído de StrataGold 2014)

	Factor de Escala anual
Year 1	25%
Year 2	22.5%
Year 3	20%
Year 4	17.5%
Year 5	16%
Year 6	15%
Year 7	14%
Year 8	13%
Year 9	12%
Year 10	10%
PC	10%

Si bien, su promedio anual es de 16% (0,16) el cual está entre los factores de 0,1 y 0,2 obtenidos en los resultados y en los estudios anteriores, el hecho de que calcule un factor de escala mensual a partir del volumen de agua infiltrada y del depósito de estériles, hace la diferencia con todos los otros valores de factores utilizados tanto por el presente estudio como para los trabajos revisados, dando que se tiene una escala mucho más exacta con respecto a la cantidad de volumen de agua mensual que atraviesa el depósito de estériles,

por lo que este método sería mucho más realista. Sin embargo, esta metodología no se pudo aplicar en el presente trabajo, dado que en el estudio no se detalla el método de la obtención de estos subfactores mensuales, mostrándose solo la Tabla 14.

El valor obtenido en los resultados, si bien es el de menor valor con respecto a los factores de escala para el contacto con el agua de los trabajos comparados, este sigue estando dentro del rango aceptable, por lo que es aceptable para su utilización.

- b) Factor de temperatura: Se obtuvo un rango de valores que se encuentran entre 0,12 y 0,34, obteniéndose una mediana de 0,2 para el escalamiento de la diferencia entre temperaturas correspondientes al sitio en que se encuentra ubicado el depósito de estériles y la sala en que se desarrollan las celdas de humedad. Con respecto a estudios anteriores, se propuso un rango de valores para este factor que va de 0,17 a 0,5, dentro del cual, si bien algunos factores de escala mensuales para la temperatura escapan del valor mínimo del rango propuesto (5 factores de 12), la mayoría, incluyendo la mediana de estos valores, cae dentro del rango de valores aceptados. Valores similares al obtenido se observan para los trabajos de Phase Geochemistry (2018) y StrataGold 2014, los cuales encontraron factores de escala de 0,2 y 0,21 respectivamente. StrataGold 2014, al igual que el presente trabajo, calcula los factores de escala para la temperatura mensualmente, teniendo así factores de escala dependientes de la temperatura mensual, los cuales varían estacionalmente (Tabla 15). Por otra parte, el trabajo de SRK Consulting (2006), asume un factor de escala para la temperatura de 1, es decir, que no se aplicó una corrección para la temperatura, pero no se justifica el hecho de no considerarlo.

Tabla 15: Resumen de los factores de escala para corregir la temperatura (Extraído de StrataGold 2014)

Month	Mean Monthly Temperature (deg. C)	Up-scale Temp. Correction factor
Jan	-3.7	16%
Feb	-3.45	17%
Mar	-2.81	18%
Apr	-0.52	21%
May	0.66	23%
Jun	1.7	25%
Jul	2.04	26%
Aug	1.35	25%
Sep	0.52	23%
Oct	-1.3	20%
Nov	-2.18	19%
Dec	-3.72	16%
Average		21%

En comparación con estos trabajos, el valor para el factor de escala para la temperatura calculado en el presente trabajo está bien definido y por lo tanto es aceptable su utilización.

- c) Factor de tamaño de grano: Dado que este factor no se pudo calcular debido a la falta de información existente con respecto a la granulometría del depósito de estériles, se utilizó un factor conservativo de 0,1, que responde bien a las características de extracción del material rocoso y a estudios de depósitos de estériles con características similares. Este, a su vez, cae dentro del rango de valores propuestos para escalar la diferencia de tamaño de grano entre las celdas de humedad y el botadero, que va de 0,05 a 0,2; siendo entonces, aceptable para su utilización. El trabajo de StrataGold 2014, utiliza un factor de 0,2, el cual

basa a partir de estudios anteriores ya que al igual que el presente trabajo, no cuenta con la información suficiente sobre la distribución de tamaño de grano de su depósito de estériles. Con este ejemplo, parece razonable la utilización de factores de escala otorgados por la bibliografía, siendo estos de gran ayuda para estudios con falta de información. Por otro lado, el trabajo de SRK Consulting (2006), utiliza un factor de escala con un valor de 0,1 que encuentra a partir de la razón entre masa reactiva de grano pequeño vs la masa total, en donde a través de un gráfico, presenta el área de superficie de las partículas en función del tamaño de las partículas (pensando en estas como cubos) (Figura 20).

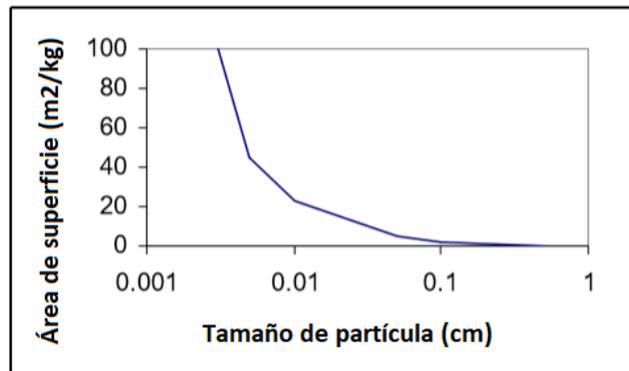


Figura 20: Área de superficie de partícula en función del tamaño de partícula para partículas cúbicas (Extraído de SRK Consulting (2006))

Este valor de factor de escala respaldaría la utilización del valor propuesto para este trabajo, dadas las condiciones similares de extracción del material que fue depositado en el depósito de estériles y por consiguiente, distribución de tamaños similares.

Por último, se tiene el trabajo de Phase Geochemistry (2018), el cual, al igual que StrataGold 2014, utiliza un factor con un valor de 0,2 basado en trabajos realizados en otros lugares, siendo similar a la referenciada en la literatura, como lo es el trabajo de Morin 2013.

De los 3 factores de escala con respecto al tamaño de grano, solo uno obtuvo este valor a partir de la información de distribución de tamaño de grano de su depósito de estériles, lo cual lleva a creer que la utilización de factores de escala a partir de la bibliografía es bien aceptada y, por lo tanto, el resultado para el factor de escala para corregir el tamaño de partícula está bien definido.

- d) Factor de concentración de oxígeno: Dado que este factor no se pudo calcular debido a la falta de información existente con respecto a la concentración de oxígeno dentro del depósito de estériles, se utilizó un factor conservativo de 0,1 de acuerdo con las características observables del depósito de estériles. El rango de valores propuestos para escalar las diferencias de concentraciones de oxígeno entre el depósito de estériles y las celdas de humedad varía entre de 0,1 a 0,5; donde el valor utilizado de 0,1 se encuentra dentro del rango aceptable, siendo el mínimo valor para este. Debido a la poca bibliografía con respecto a este, se utiliza solo el rango de valores propuestos para la validación de su valor.

En general, para los valores de los subfactores de las tres primeras columnas (Tabla 16), todos se encuentran dentro del rango aceptable de valores propuestos según la característica a la que representa, y entre los trabajos comparados se tienen valores similares, donde el valor del factor para la temperatura de SRK Consulting (2006) y el valor del factor para el contacto con el agua de Phase Geochemistry (2018) son diferentes. Cabe mencionar que, para los valores de factores pertenecientes al presente trabajo y a StrataGold 2014, se presentan las medianas de éstos, dado que para los valores de temperatura de ambos trabajos se calculó un factor de escala según la temperatura del mes correspondiente, y para los valores de contacto con agua, StrataGold 2014 calculó el valor del factor considerando el volumen de infiltración de agua mensual y el crecimiento del volumen del depósito de estériles.

Tabla 16: Valores de subfactores de escala para trabajos comparados

Fuente de información	Contacto con agua	Tamaño de grano	T°	Concentración oxígeno	Cobertura	Factor de escala acumulativo
Este estudio	0,1/0,09	0,1	0,2	0,1	-	0,002/0,0018
SRK Consulting (2006)	0,2	0,1	1	-	-	0,02
Phase Geochemistry (2018)	1	0,2	0,2	-	-	0,04
StrataGold 2014	0,04	0,2	0,2	-	0,75	0,0012

De la tabla anterior, se observa que StrataGold (2014), al igual que el presente estudio, introdujo un cuarto factor de escala, con el cual corrige la cobertura de suelo que tiene el depósito de estériles, reduciendo así la infiltración de este. Con esto, obtiene un valor para el factor de escala acumulativo de 0,0012 aproximadamente, el cuál es parecido al obtenido en los resultados, con el que logra buenos resultados para la escalación de las concentraciones. Esto da un indicio de que agregar un cuarto factor de escala, si bien puede generar una subestimación de los resultados, también puede ayudar a no sobrestimar las concentraciones escaladas con la ayuda de la comparación de estudios similares.

### 5.3. Concentraciones escaladas

A modo de discusión, y para evaluar las concentraciones escaladas a partir de los factores de escala encontrados con respecto a los valores medidos en campo, éstas se compararon con las concentraciones existentes en el punto de monitoreo ABDP entre el año 2016 y 2019, para los parámetros de  $SO_4$ , Cu y pH a través de gráficos, comparado así el comportamiento de las curvas y el nivel de correlación entre ambas.

#### 5.3.1. Concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 3 subfactores de escala.

En la Figura 21, se presenta la variación en el tiempo de las concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con la utilización de 3 subfactores de escala y de las concentraciones del punto ABDP. La simulación indica que las concentraciones de sulfato irán aumentando con el tiempo, alcanzando valores de 27.301 mg/l para diciembre del 2019 para el  $SO_4$ , de 799 mg/l para el Cu y de 2,8 para el pH, los cuales no se condicen con los valores monitoreados para la fecha indicada. Además, se observa una mala correlación de las distintas curvas en el tiempo, llegando a presentar diferencias de hasta dos órdenes de magnitud en las concentraciones para el  $SO_4$  y el Cu, mientras que, para el pH, se observan leves diferencias en los valores entregados, aun así, estos valores comparados no son correlacionables entre sí. En la Tabla 14 se presentan los rangos de valores de concentraciones, donde claramente los valores para las concentraciones escaladas son excesivamente mayores y poco realistas, obteniéndose valores máximos escalados de 3,5, 1.369 mg/l y 34.053 mg/l para el pH, Cu y  $SO_4$ , respectivamente y para el punto ABDP 5,4, 8,3 mg/l y 498 mg/l para el pH, Cu y  $SO_4$  respectivamente (Tabla 17).

Si se hiciera una proyección con estos resultados; si bien se podría decir que el  $SO_4$  y Cu tienden a tener un comportamiento de aumento de sus concentraciones en el tiempo, mientras en pH presenta una disminución, los valores que entregaría la proyección no ajustarían a la realidad, generándose una interpretación completamente errónea con respecto a la calidad de las aguas a pie del depósito de estériles, por lo que para este caso, el escalamiento de las celdas de humedad a partir de los factores de escala encontrados por la metodología empírica ocupando 3 factores de escala, no es útil para la caracterización de un potencial generador de acidez del presente depósito de estériles, debido a la sobreestimación de los valores de las concentraciones.

Tabla 17: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y  $SO_4$  para concentraciones escaladas a partir de metodología empírica con 3 subfactores y Punto ABDP.

	Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo
Concentración escalada a partir de metodología empírica con 3 subfactores	pH	-	2,8	3,5	2,1
	Cu	mg/l	422	1.369	50
	$SO_4$	mg/l	11.477	34.053	1.262
Punto ABDP	pH	-	4,3	5,4	3,6
	Cu	mg/l	1,54	8,3	0,7
	$SO_4$	mg/l	275	498	202

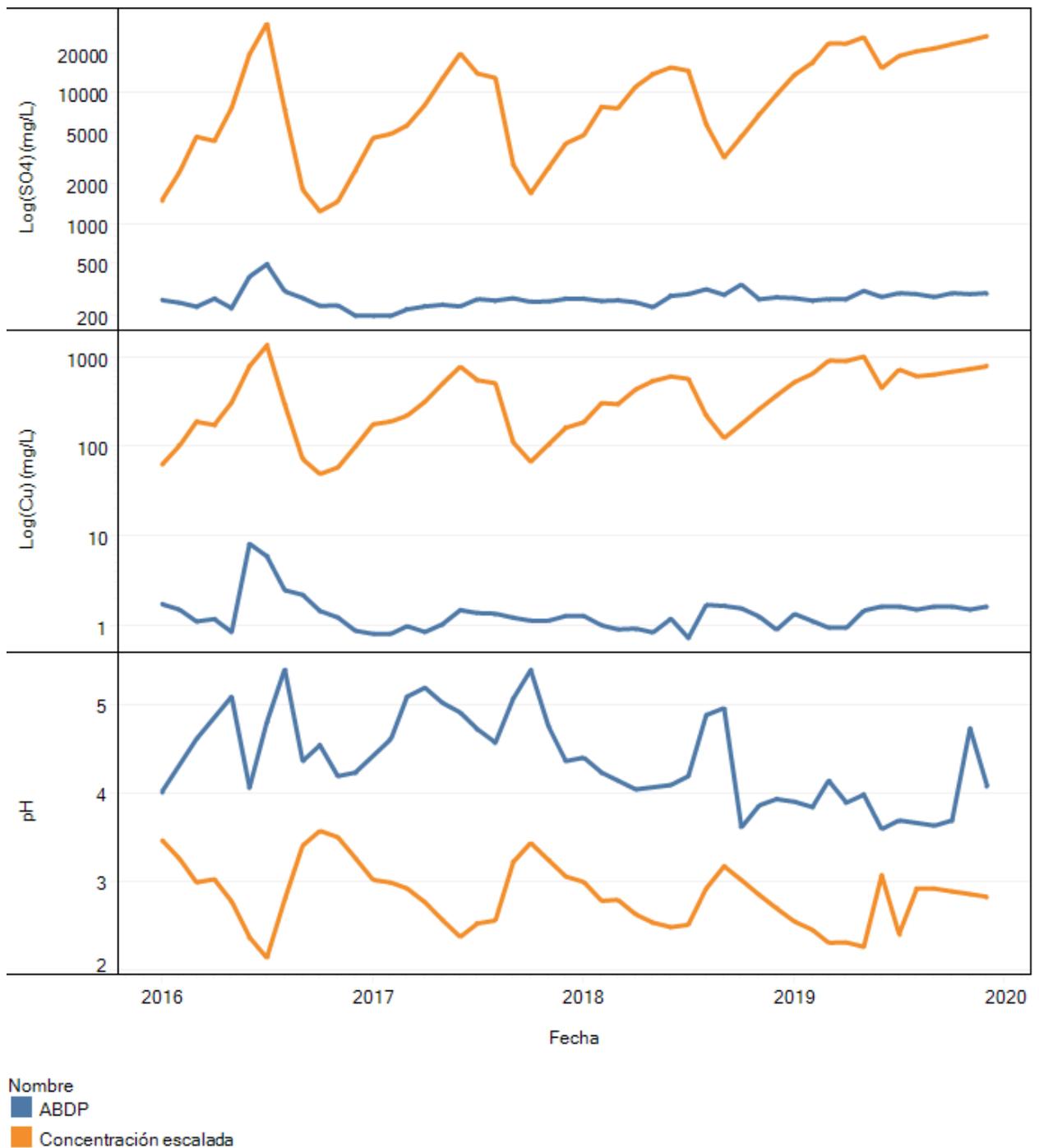


Figura 21: Variaciones temporales para las concentraciones de  $\text{SO}_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 3 factores de escala.

Es por esto, que, a pesar de que la bibliografía propone no utilizar más de 3 subfactores de escala, se propuso utilizar 4 subfactores de escala, incluyendo a los tres ya propuestos el contenido de oxígeno, a modo de discusión para observar cómo se comportaría la nueva curva y si esta llegaba a tener mejor comportamiento en comparación con los datos de campo obtenidos en el punto ABDP (Figura 22).

De esta nueva figura, se observan valores más cercanos que los obtenidos a partir de 3 subfactores de escala (Tabla 18), donde la simulación indicaría que las concentraciones de sulfato y cobre irán en aumento con el tiempo, alcanzando valores de 2730 mg/l para diciembre del 2019 para el  $SO_4$ , de 79 mg/l para el Cu, mientras que el pH alcanzaría un valor de 3,8; por lo que a pesar de que los valores por sí solos son más realistas, seguirían sin ajustarse a los valores monitoreados.

Con respecto a la evolución de las curvas, se observan peaks para el  $SO_4$  simulado que se escapan totalmente de la media a lo largo del tiempo sin lograr ajustarse a la curva real del punto ABDP; donde al igual que para el caso del Cu, se sigue observando una gran diferencia entre los valores de concentración y poca correlación entre sus curvas, pudiéndose interpretar erróneamente una sobreestimación de las concentraciones simuladas. Para el pH, los valores simulados (o escalados) son menores a los monitoreados en el punto ABDP, lo que significaría pH más ácidos en comparación a los reales (Tabla 18).

Si se hiciera una proyección con estos resultados; si bien se podría decir que el  $SO_4$  y Cu tienden a tener un comportamiento de aumento de sus concentraciones en el tiempo, mientras en pH presenta una disminución, y si bien, los valores que entregaría la proyección serían más cercanos que los obtenidos con 3 factores de escala, siguen siendo poco realistas, lo que podría causar una interpretación completamente errónea con respecto a la calidad de las aguas a pie del depósito de estériles, por lo que para este caso, el escalamiento de las celdas de humedad a partir de los factores de escala encontrados por la metodología empírica ocupando 4 factores de escala, no es útil para la caracterización de un potencial generador de acidez del presente depósito de estériles, debido a la poca claridad del comportamiento de las concentraciones con el paso del tiempo, y además, la sobreestimación de la mala calidad del drenaje, entregando valores de pH más ácidos que los observados, y caracterizándolo con mayores concentraciones de Cu y de  $SO_4$  que las monitoreadas a pie del depósito de estériles.

Tabla 18: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y  $SO_4$  para concentraciones escaladas a partir de metodología empírica con 4 subfactores y Punto ABDP.

	Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo
Concentración escalada a partir de metodología empírica con 4 subfactores	pH	-	3,8	4,5	3,1
	Cu	mg/l	42	136	5
	$SO_4$	mg/l	802	3405	126
Punto ABDP	pH	mg/l	4,3	5,4	3,6
	Cu	mg/l	1,54	8,3	0,7
	$SO_4$	-	275	498	202

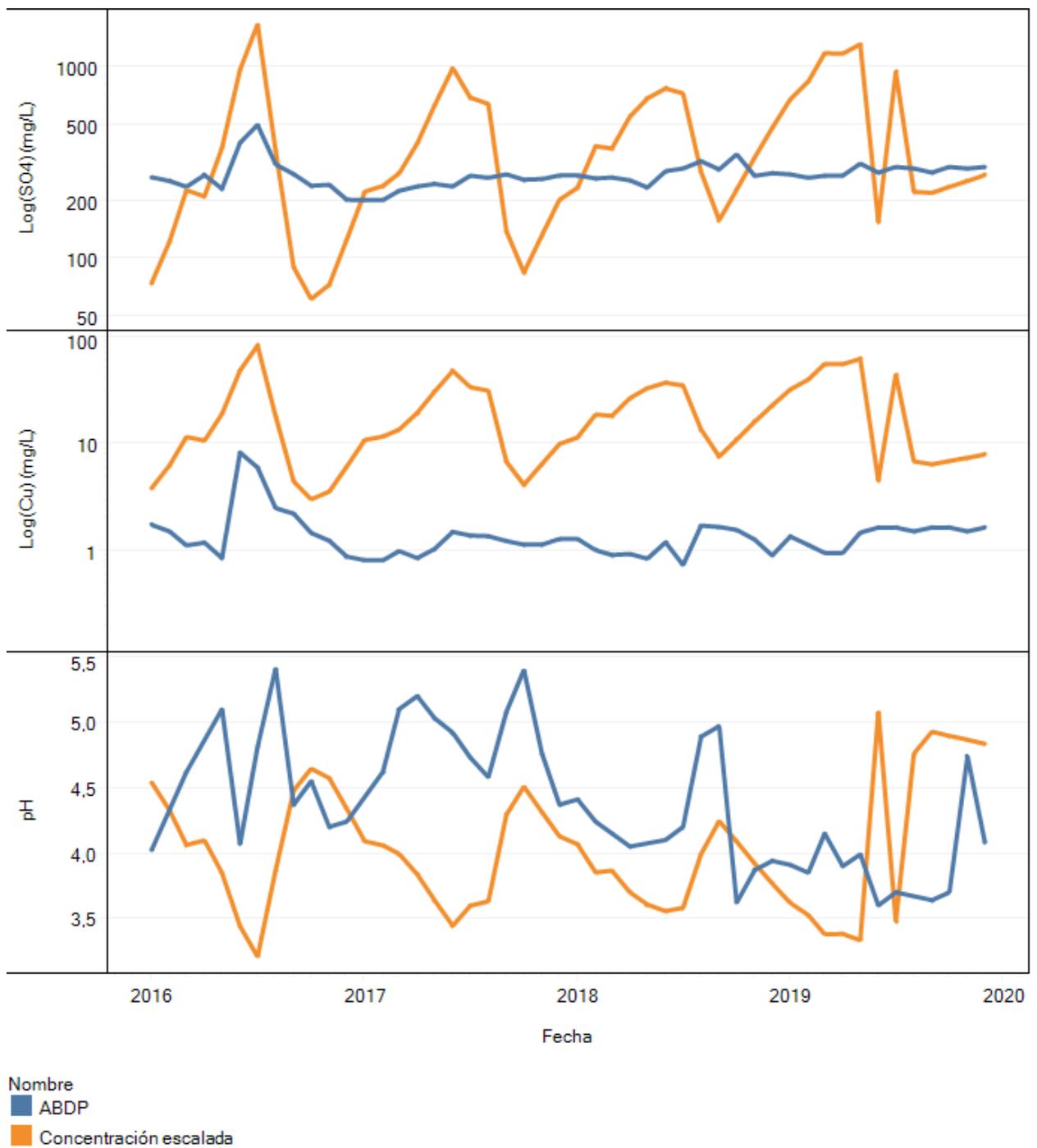


Figura 22: Variaciones temporales para las concentraciones de  $SO_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología empírica con 4 factores de escala.

### 5.3.2. Concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología de razón campo/celda.

En la Figura 23, se presenta la variación en el tiempo de las concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología de razón campo/celda de humedad y de las concentraciones del punto ABDP. La simulación indica que las concentraciones de sulfato irán aumentando con el tiempo, alcanzando valores de 1000 mg/l para diciembre del 2019 para el  $SO_4$ , de 3,3 mg/l para el Cu y de 4,4 para el pH, de los cuales, solo el pH y el Cu simulados se acercarán a los valores monitoreados, mientras que el  $SO_4$  presentaría concentraciones mayores, teniendo para esta fecha, una concentración de 301 mg/l en el punto ABDP.

En general, se observa una mejor correlación de las distintas curvas con el paso del tiempo en comparación con el escalamiento de los factores encontrados por la metodología empírica, llegando a presentar algunos desfases en las curvas, pero bajas diferencias en las concentraciones para el  $SO_4$ , Cu y el pH, llegando a ser más correlacionables que la simulación con los otros factores. En la Tabla 16 se presentan los rangos de valores de concentraciones, donde claramente los valores para las concentraciones escaladas se ajustan medianamente bien a los valores monitoreados, con valores promedio de las concentraciones escaladas de 4,4, 1,6 mg/l y 406 mg/l y para el punto ABDP 4,3, 1,5 mg/l y 275 mg/l para el pH, Cu y  $SO_4$  respectivamente (Tabla 19).

Si se hiciera una proyección con estos resultados; se podría decir que el  $SO_4$  y Cu tienden a tener un comportamiento de aumento de sus concentraciones en el tiempo, mientras en pH presentaría una disminución con respecto a este. Además, los valores que entregaría la proyección podrían llegar a ser muy cercanos a la realidad, pudiéndose generar una interpretación más realista con respecto a la calidad de las aguas a pie de botadero, por lo que para este caso, el escalamiento de las celdas de humedad a partir de los factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda de humedad, podría ser útil para la caracterización de un potencial generador de acidez del presente botadero, sin embargo, la diferencia de la correlación entre las curvas de concentración podrían generar problemas en las proyecciones, identificado periodos simulados de altas concentraciones que no serían realistas con los valores entregados a pie de botadero.

Tabla 19: Valores máximos, mínimos y promedio para pH, Cu y  $SO_4$  para concentraciones escaladas a partir de metodología razón campo/celda y Punto ABDP.

	Parámetro	Unidad	Promedio	Máximo	Mínimo
Concentración escalada a partir de metodología razón campo/celda	pH	-	4,4	5,22	3,7
	Cu	mg/l	1,6	5,4	0,1
	$SO_4$	mg/l	406	1192	44
Punto ABDP	pH	-	4,3	5,4	3,6
	Cu	mg/l	1,54	8,3	0,7
	$SO_4$	mg/l	275	498	202

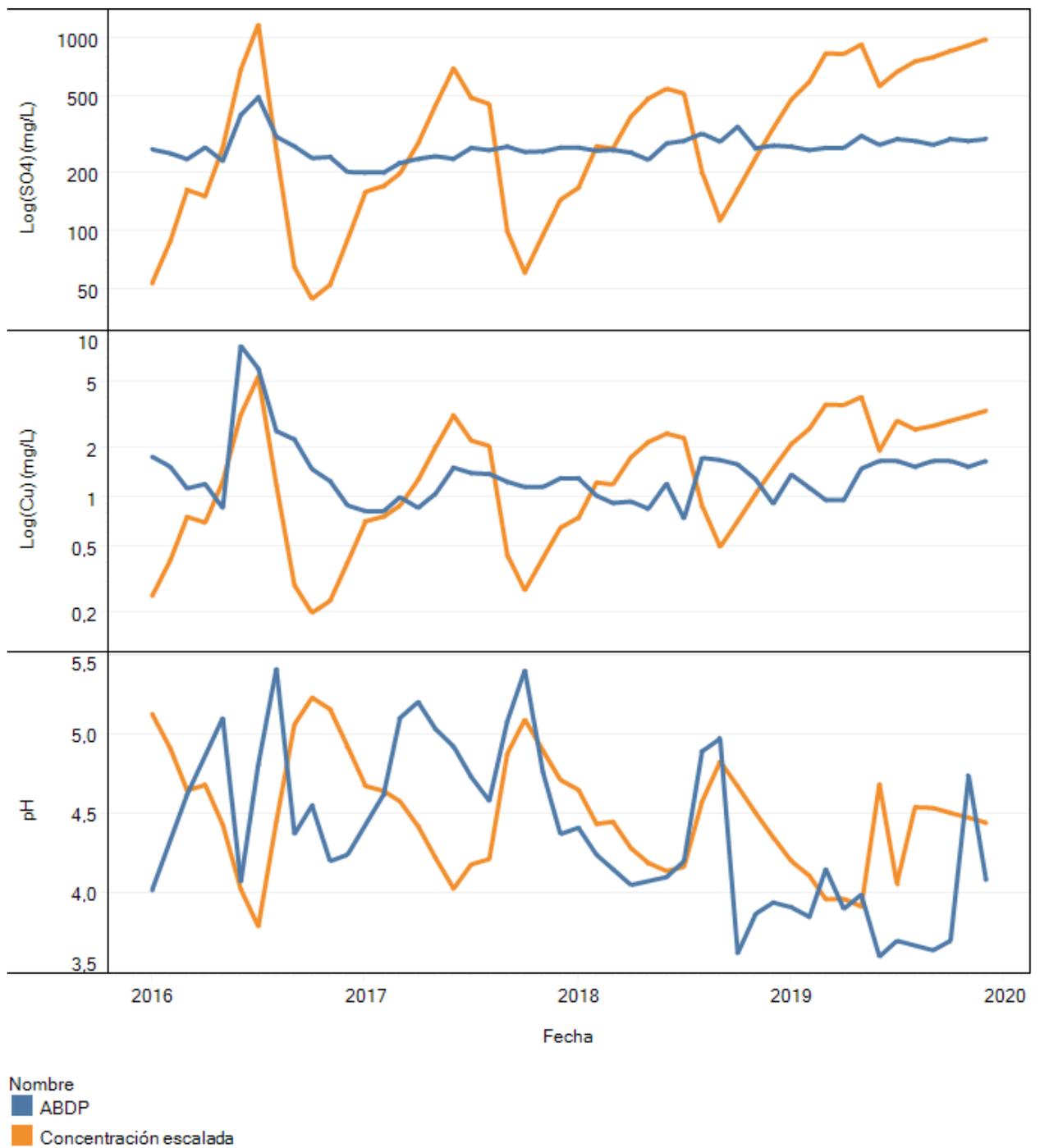


Figura 23: Variaciones temporales para las concentraciones de  $SO_4$ , Cu y pH del punto ABDP y escaladas a partir de factores de escala encontrados por la metodología razón campo/celda

Observando las concentraciones escaladas entregadas tanto por la metodología de razón campo/celda como por la metodología empírica; si bien ninguna metodología se ajusta exactamente a los valores monitoreados en campo como se observan en los gráficos presentados anteriormente (Figura 21, 22 y 23), la metodología que tiene un mejor ajuste con respecto a estos valores corresponde a la de razón campo/celda. Esto se debe a que el valor del factor de escala encontrado se obtiene directamente de la diferencia entre valores de campo y laboratorio, además de ser un valor específico para cada elemento escalado; mientras que la metodología empírica calcula un solo factor de escala general para todos los parámetros, pudiendo generar sobreestimaciones o subestimaciones con respecto a las diferentes concentraciones de los elementos en estudio.

Como se observa en los gráficos expuestos para ambas metodologías estudiadas (Figura 22 y Figura 23), existe un control en el comportamiento de las curvas por parte del caudal simulado más que de la mineralogía y/o contenido de elementos de la roca, donde se observan grandes peaks en las concentraciones simuladas en comparación con las monitoreadas en el punto ABDP. Estos peaks de concentración anuales, coinciden con los periodos de mayor precipitación del sector, en donde debido a estas, existe un mayor aporte de agua tanto para el flujo no saturado como para el flujo saturado (Figura 24).

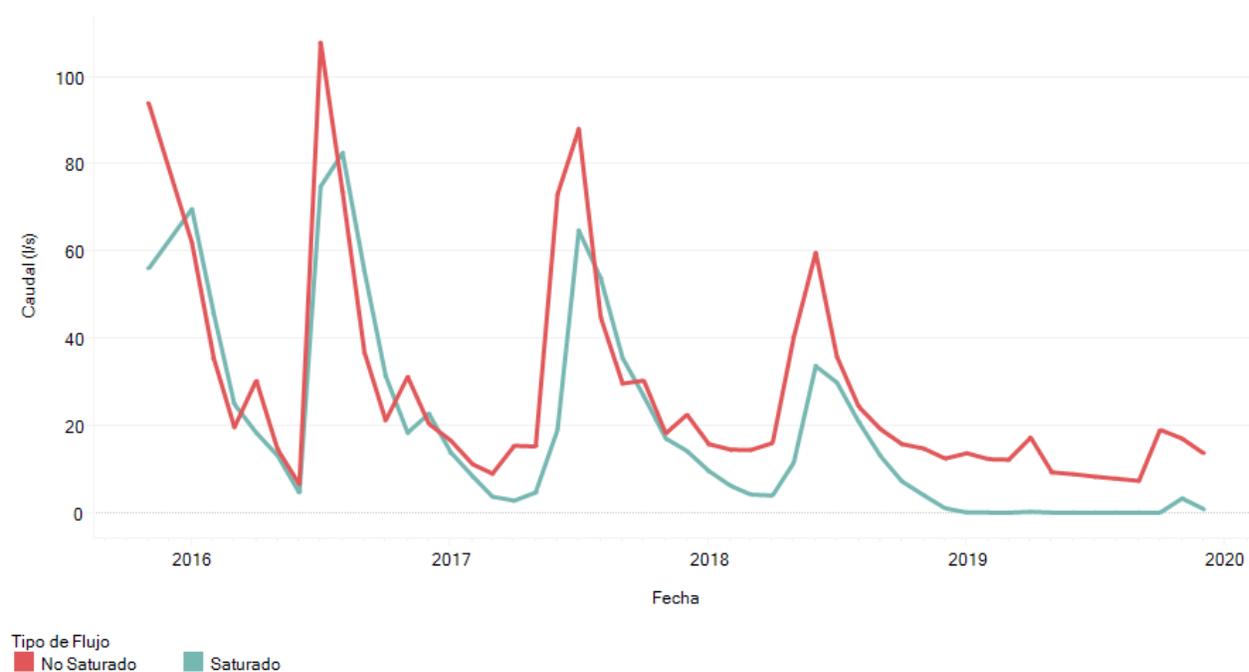


Figura 24: Variación en el tiempo de caudal para flujo saturado y flujo no saturado

En comparación con la realidad, es de esperar que estos peaks solo se presenten en algunos años en los cuales existan periodos de deshielos o precipitaciones intensos; como se observa para los peaks de las concentraciones monitoreadas entre junio y julio del 2016 para el Cu y SO<sub>4</sub>.

Los desfases existentes entre algunos peaks de las Figuras 22 y 23, se pueden deber al tiempo de residencia del agua dentro del botadero, como también a las diferentes reacciones que ocurren al momento que el agua interactúa con la roca, afectando a la calidad del drenaje que será descargado a pie de botadero.

Entre las concentraciones escaladas a partir de las diferentes metodologías para encontrar los factores de escala, se observa que la que mejor se ajusta a los valores observados son las concentraciones escaladas a partir de factores de escala encontrados por el método razón campo/celda. Si bien, estos factores no consideran las características del botadero y del sitio donde se encuentra depositado éste, éstos tienen en cuenta la diferencia entre los elementos estudiados, quedando claro que no es factible utilizar un mismo factor de escala para todos los elementos.

Sin embargo, comparando los resultados obtenidos con otros estudios expuestos con respecto a la utilización de factores de escala para la caracterización de un potencial generador de drenaje ácido, la gran mayoría utiliza los factores de escala encontrados a través de la metodología empírica, basándose en las características del botadero y del área donde éste se encuentra que se diferencia con las características que tienen las celdas de humedad.

Los factores encontrados por estos trabajos, al igual que los resultados obtenidos, se encuentran fuera del rango de valores de factores de escala propuesto por Morin 2013, que corresponde a valores entre 0,05 y 0,6. En el trabajo realizado por SRK Consulting (2006), se destaca que el cálculo de los factores de escala utilizando el método empírico suele dar como resultado valores inusualmente altos de concentraciones, utilizando un valor de 0,02 para escalar, por lo que recomienda la evaluación de las concentraciones individuales de cada elemento, teniendo en cuenta las interacciones químicas y los resultados obtenidos en otros sitios bajo esta misma metodología. Además, utiliza un modelo de equilibrio termodinámico (MINTEQ, PHREEQC), con el objetivo de identificar las concentraciones que no son compatibles termodinámicamente. En este mismo trabajo, SRK Consulting (2006) compara los datos obtenidos luego del escalamiento, con concentraciones de otros pórfidos cupríferos similares, demostrando una sobreestimación de las concentraciones calculadas (concentraciones de  $\text{SO}_4$  entre los 1.633 mg/l y los 26.978 mg/l, con respecto a un promedio de 1.526 mg/l para los otros sitios). Estos resultados, concuerdan con los obtenidos en este estudio, en relación a la sobreestimación de las concentraciones esperadas, indicando que algunos productos de las reacciones producidas por la meteorización permanecerían alojados en la roca y no serían lixiviados por los flujos de agua.

En otro estudio realizado para el escalamiento de celdas de humedad, Phase Geochemistry (2018) estudia la caracterización del tipo de drenaje que producirá un botadero generado a partir de un yacimiento del tipo VMS (sulfuros masivos volcanogénicos) donde el sulfuro principal corresponde a la pirita. Este obtiene un factor de escala de 0,04 a través del método empírico, el cual, al igual que SRK Consulting (2006), se encuentra fuera del rango de valores propuesto por Morin 2013. A pesar de esto, como resultado obtiene valores razonables para las concentraciones de  $\text{SO}_4$  y Cu con respecto a las concentraciones monitoreadas en las aguas subterráneas y valores de pH neutro/alcalino esperables. La diferencia de los resultados obtenidos por Phase Geochemistry (2018) en comparación con los obtenidos en este trabajo, radica en que Phase Geochemistry (2018), además de utilizar celdas de humedad, utiliza barriles de campo (otro tipo de prueba cinética), con los cuales interpreta valores de concentraciones de infiltración, teniendo estas pruebas, valores más cercanos a la realidad que las celdas de humedad.

Sin embargo, el trabajo de StrataGold 2014 utiliza un factor de escala de 0,0012 aproximadamente (ya que éste va cambiando según el mes), el cual se acerca bastante al valor utilizado en el presente trabajo, saliéndose completamente del rango propuesto por Morin 2013 y del supuesto de no exceder los 3 factores de escala (dado que ocupa 4 como se vio anteriormente). Además de utilizar factores de escala, utiliza un modelo termodinámico de solubilidad utilizando PHREEQC para tener en cuenta los controles de solubilidad mineral y así evitar cálculos de concentraciones excesivamente altas de especies que se tiene conocimiento que forman fases secundarias en el drenaje minero. La gran diferencia se visualiza en los resultados: en vez de obtener concentraciones sobreestimadas como es el caso del presente estudio, obtiene concentraciones subestimadas con respecto a las esperadas, lo que pondría en evidencia que la utilización de más de 3 factores puede llegar a la subestimación de los resultados.

En general, se observa que el presente trabajo, en el cual se utilizó una base de datos propia, en comparación con los estudios externos, entregan resultados muy diferentes a pesar de aplicar la misma metodología. Esto último debido a que, si bien existe el supuesto que la mineralogía tiene una fuerte influencia en la calidad del agua, por lo tanto, la comparación de los depósitos minerales con una mineralogía similar puede llegar a ser útil para instalaciones con el mismo entorno geológico, los procesos de formación de minerales pueden variar como resultado de la interacción con diferentes tipos de rocas, así como los diferentes volúmenes de flujos de agua y el ambiente en que estos se encuentren.

Además, la principal diferencia entre los trabajos estudiados y el presente estudio es la utilización de un modelo termodinámico, con el cual además de escalar las concentraciones, se comprueba que estas sean compatibles termodinámicamente, teniendo en cuenta los controles de solubilidad de los minerales, ajustando de mejor manera las concentraciones simuladas en comparación con las concentraciones monitoreadas.

## 6. Conclusiones

A partir de la revisión de estudios previos, se determinó utilizar la metodología basada en la razón de tasas de lixiviación de campo vs tasas de lixiviación de celda de humedad, y la metodología que utiliza el cálculo de subfactores de escalamientos obtenidos a partir de fórmulas y/o antecedentes de estudios similares; debido a la disponibilidad de datos e información del caso estudio.

Los factores de escala encontrados a través de la metodología razón campo/celda son diferentes para todos los elementos, destacando la importancia de la utilización de factores de escala específicos para cada uno. Las concentraciones escaladas a partir de estos factores se adaptaron de mejor manera que los factores encontrados a través de la metodología empírica, obteniendo valores cercanos a los monitoreados en el punto de control ABDP. Sin embargo, las curvas simuladas (series temporales) no se lograron ajustar correctamente a las concentraciones reales de campo.

Los factores de escala encontrados a través de la metodología empírica, cada uno por sí solo cumplió con el rango de valores aceptables propuesto, sin embargo, la utilización en conjunto de 3 subfactores para escalar las concentraciones, entregó concentraciones muy sobreestimadas para los tres parámetros ( $\text{SO}_4$ , Cu y pH). Por otro lado, con la utilización de 4 subfactores se obtuvo valores promedios más ajustados para el  $\text{SO}_4$ , mientras que para el Cu y pH los valores no se lograron ajustar. Así mismo, si bien las tendencias reflejan el comportamiento general observado en el punto de control, las curvas simuladas no se lograron ajustar correctamente con respecto a las concentraciones reales de campo.

A pesar de que las curvas de concentraciones escaladas no se ajustaron correctamente con respecto a los valores y al comportamiento estacional de las concentraciones reales, en todas las curvas simuladas a partir de los distintos factores de escala se observa un comportamiento similar, en el cual el  $\text{SO}_4$  y el Cu tenderían a ir en aumento, mientras que el pH tendería a ir a la baja con el paso de tiempo, donde estos resultados en conjunto con las pruebas estáticas, podrían indicar así un comportamiento de un posible potencial generador de drenaje ácido; sin embargo, para poder realizar predicciones a futuro, es necesario seguir ajustando el modelo y evaluar los factores que no han sido considerado, los cuales podrían llegar a mejorar la calibración.

Finalmente, se establece que las metodologías seleccionadas aplicadas para el escalamiento de ensayos de laboratorio cinéticos, utilizando los factores de escalamiento apropiados descritos anteriormente, no son viables por sí solas para el caso estudio. Si bien los factores de escala cumplen con los valores revisados en la bibliografía, los datos simulados no se adaptan correctamente a los datos de campo. Dado esto, se recomienda la utilización de programas de modelación geoquímica e hidrológica como complemento para tener un mayor acercamiento con respecto a la evolución química y mezclas asociadas, así como de la dinámica de los flujos de circulan a través de los depósitos de estériles. Además, se recomienda la generación de estudios con respecto a las características escalables del depósito de estériles en estudio, así como la generación de otros tipos de ensayos cinéticos de mayor escala que las celdas de humedad para complementar los resultados, como por ejemplo, ensayos de barril de campo, que se ven utilizados en los estudios previos.

## 7. Glosario

**Depósito de estériles:** Lugares destinados a la depositación de material estéril provenientes de la mina (Elaboración propia).

**DMA:** Drenaje minero ácido (Sernageomin 2015).

**Drenaje:** Manera en que las aguas de un área existen y se mueven, incluyendo corrientes superficiales y subterráneas. Un término global para todos los flujos de agua, ya sean concentrados y/o difusos.

**Factor de escala:** Un factor de escala es un número que escala o multiplica cierta cantidad. En la ecuación  $y = Cx$ , C es el factor de escala para x. (Wikipedia.com)

**HCT:** Celdas de humedad (Humidity cell test por sus siglas en inglés) (Elaboración propia).

**Lixiviado:** Es una solución obtenida desde el proceso de lixiviación. También corresponde a un líquido que ha percolado o drenado a través de un residuo y que contiene componentes solubles de éste (Sernageomin 2015).

**MEND:** Mine Environment Neutral Drainage por sus siglas en inglés, es un programa canadiense, creado para desarrollar tecnologías para prevenir y controlar el drenaje ácido (mend-nedem.org).

**Meteorización:** Proceso por el cuál las partículas, rocas y minerales son alterados por exposición de la superficie a temperatura, presión y a los agentes atmosféricos tales como el agua, el aire y la actividad biológica (Sernageomin 2015).

**Modelo de bloques:** Modelo con el cual se logra discretizar el yacimiento minero en paralelepípedos regulares o bloques. Este contiene las coordenadas, el tonelaje y la ley de mineral que presenta cada bloque (Elaboración propia).

**Tasa de lixiviación:** Es un coeficiente que expresa la relación entre la cantidad y la frecuencia de la extracción de constituyentes solubles por percolación a través de un solvente. Puede ser un proceso natural o inducido (Sernageomin 2015).

## 8. Bibliografía

- Aduvire, 2006. Drenaje ácido de mina: generación y tratamiento. Instituto geológico y minero de España. Dirección de recursos minerales y geoambiente.
- Amos, R.T., Blowes, D.W., Bailey, B.L., Sego, D.C., Smith, L., Ritchie, A.I.M., 2015. Wasterock hydrogeology and geochemistry. *Appl. Geochem.* 57, 140–156.
- Aranda, C., 2010. Assessment of Waste Rock Weathering Characteristics at the Antamina Mine Based on Field Cells Experiment (Master's Thesis). The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Aubertin, M., Fala, O., Molson, J., Gamache-Rochette, A., Lahmira, B., Martin, V., Lefebvre, R., Bussière, B., Chapuis, R.P., Chouteau, M., Wilson, G.W. 2005. Évaluation du comportement hydrogéologique et géochimique des haldes a stériles. Symposium Rouyn-Noranda: L'Environnement et les Mines, Canada.
- Azam S., Wilson G.W., Herasymuik G., Nichol C., Barbour L.S. 2006. Hydrogeological behaviour of an unsaturated waste rock pile: a case study at the Golden Sunlight Mine, Montana, USA. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 66: 259-268.
- Broughton, L. M. y Robertson, A. MacG., 1992. Acid rock drainage from mines: where we are now. IMM Minerals, Metals and Environment Conference, Manchester, U.K., February 4-6, 1992.
- Dold, B., 2003. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste. *Journal of Geochemical Exploration* 80: 55-68.
- Elboushi I.M., 1975. Amount of water needed to initiate flow in rubble rock particles, *Journal of Hydrology* 27, 275-284.
- Fala O., Aubertin M., Molson J.W., Bussière B., Wilson G.W., Chapuis R., Martin V. 2003. Numerical modeling of unsaturated flow in uniform and heterogeneous waste rock piles. 6th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Cairns, Australia, Publication Series 3/2003, pp 895-902.
- Fala, O., Molson, J., Aubertini, M., Bussiere, B., 2005. Numerical modelling of Flow and capillary barrier effects in unsaturated waste rock piles. *Mine Water Environ* 24, 172-185.
- Garvie, A.M, Bennett, J.W., and Ritchie, A.I.M. 1997. Quantifying the spatial dependence of sulfide oxidation rates in a waste rock dump at Mt. Lyell, Tasmania. In: Fourth International Conference on Acid Rock Drainage, Vancouver, Canada. May 31 - June 6. pp 335 - 349.
- Hallberg, K.B., Johnson, D.B., 2001. Biodiversity of acidophilic prokaryotes. *Adv. Appl. Microbiol.* 49, 37-84.
- Hanna, B., Lapakko, K. 2012. Waste Rock Sulfate Release Rates at a Former Taconite Mine, Laboratory and Field-Scale Studies. 9th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), May 2026, 2012, Ottawa, Ontario, Canada.

- Harries y Ritchie, 1981. The use of temperature profiles to estimate the pyritic oxidation rate in a waste rock dump from an openpit mine. *Water, Air, and Soil Pollution* volume 15, pages405–423.
- Kempton, H. 2012. A Review of Scale Factors for Estimating Waste Rock Weathering from Laboratory Tests. 9th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), May 20-26, 2012, Ottawa, Ontario, Canada.
- Kirchner, T. & Mattson, B. 2015. Scaling geochemical loads in mine drainage chemistry modelling: An empirical derivation of bulk scaling factors. Proceedings of 10th ICARD & IMWA 2015 conference, Santiago, Chile, 2124 April 2015, 1495–1503.
- Lapakko, K., 2015. Preoperational assessment of solute release from waste rock at proposed mining operations. *Appl. Geochem.* 57, 106–124.
- Lapakko, K. & Olson, M. 2015. Scaling laboratory sulfate release rates to operational waste rock piles. Proceedings.
- Malmstrom, M.E., Destouni, G., Banward, S.A., Stromberg, B.H.E., 2000. Resolving the scale-dependence of mineral weathering rates. *Environ. Sci. Technol.* 34, 1375-1378.
- MEND. 1995. Evaluation of static and kinetic prediction test data and comparison with field monitoring data. Project 1.16.4.
- MEND. 2000. Mend Manual, volume 3, prediction. MEND 5.4.2c.
- MEND. 2006. Update on Cold Temperature Effects on Geochemical Weathering. MEND Report 1.61.6. October 2006.
- Molson, J.W., Fala, O., Aubertin, M., Bussière, B. 2005. Numerical simulations of pyrite oxidation and acid mine drainage in unsaturated waste rock piles. *Journal of Contaminant Hydrology* 78: 343–371.
- Morin, K.A., E. Gerencher, C.E. Jones, and D.E. Konasewich. 1991. Critical Literature Review of Acid Drainage from Waste Rock. MEND Report. 176p.
- Morin, K.A. & Hutt, N.M., 1994. Observed preferential depletion of neutralization potential over sulfide minerals in kinetic tests: Site-specific criteria for safe NP/AP ratios. In *International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Proceedings of the Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage 1*. U.S. Bur. Mines Special Pub. SP 06A-94, 148-156.
- Morin K.A., N.M. Hutt, and S. Hutt. 1997. History of Eskay Creek Mine’s Waste-Rock Dump From Placement to Dissassembly. *Canadian Mine Environment Neutral Drainage Report* 1.44.1, May 1997.
- Morin K.A., N.M. Hutt, and M. Aziz. 2012. Case studies of thousands of water analyses through decades of monitoring: selected observations from three minesites in British Columbia, Canada. IN: *Proceedings of the 2012 International Conference on Acid Rock Drainage*, Ottawa, Canada, May 22-24.
- Morin, K.A. 2013. Scaling Factors of Humidity-Cell Kinetic Rates for Larger-Scale Predictions. MDAG Internet Case Study #38.

- Muhammad M., Päivi M.K., Teemu K. 2018. Water quality prediction of mining waste facilities based on predictive models. Geological Survey of Finland.
- Nichol, C., Smith, L., Beckie, R. 2005. Field-scale experiments of unsaturated flow and solute transport in a heterogeneous porous medium. *Water Resources Research*, 41: 1-11.
- Pearce, S., Scott, P. & Weber, P. 2015. Waste rock dump geochemical evolution: matching lab data, models and predictions with reality. Proceedings of 10th ICARD & IMWA 2015 conference – Agreeing on solutions for more sustainable mine water management, Santiago, Chile, 21–24 April 2015, 1469–1479.
- Phase geochemistry, 2018. Geochemical source term predictions: Palmer Project, Alaska. Report.
- Ritchie, A. I. M. 1994. Sulfide oxidation mechanism: controls and rates of oxygen transport. In: Jambor, J. L. & Blowes, D. W. (eds) *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Waters*. Mineral Association of Canada, Short Course 22, 210–245.
- Robertson, E.C., 1988. Thermal properties of rocks. U.S. Geological survey open file. Report 88-441.
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., Sand, W., 2003. Bioleaching review Part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 63, 239-248.
- Sapsford, D.J., Howell, R.J., Dey, M., Williams, K.P., 2009. Humidity cell tests for the prediction of acid rock drainage. *Miner. Eng.* 22, 25-36.
- SERNAGEOMIN. 2015. Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras., Santiago.
- Smith, L. y Beckie, R. 2003. Hydrologic and geochemical transport processes in mine waste rock. En: Jambor, J., Blowes, D., y Ritchie, A.I.M. (Eds.) *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Short Course Series Vol. 31, Mineralogical Association of Canada. pp. 51-72.
- Sracek, O.; Choquette, M.; Gélinas, P.; Lefebvre, R. y Nicholson, R.V., 2004. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada, *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 69, Issues 1–2, March 2004, Pages 45-71.
- SRK Consulting, 2006. Waste rock and lean ore geochemical characterization plan NorthMet Project, Minnesota. Report.
- StrataGold Corporation, 2014. Eagle Gold geochemical source term predictions: Model description and results. Report.
- Wagner, K., Smith, L. and Beckie, R. 2006. Hydrogeochemical characterization of effluent from mine waste rock, Cluff Lake, Saskatchewan. 7th Annual International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), March 26-30, 2006, St. Louis, Missouri, pp. 2207-2216.