



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MODELACIÓN NUMÉRICA 3D PARA
REPRESENTAR UN DEPÓSITO DE RELAVES Y SU INFLUENCIA EN EL FLUJO DE
INFILTRACIÓN USANDO FEFLOW

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MAURICIO NICOLÁS MUÑOZ GARCÍA

PROFESOR GUÍA:
JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUVENAL LETELIER VILLALÓN
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: MAURICIO NICOLÁS MUÑOZ GARCÍA
FECHA: 08/07/2019
PROF. GUÍA: JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL

EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS DE MODELACIÓN NUMÉRICA 3D PARA REPRESENTAR UN DEPÓSITO DE RELAVES Y SU INFLUENCIA EN EL FLUJO DE INFILTRACIÓN USANDO FEFLOW

La estimación del potencial flujo de infiltración que genera un depósito de relaves es un ejercicio frecuente en los estudios de evaluación de impacto asociados a este tipo de instalaciones. Para esto, en la mayoría de dichos estudios, es necesario adoptar alguna metodología para representar el crecimiento continuo de este en un modelo numérico. El objetivo de este trabajo de título ha sido evaluar la importancia relativa de representar el depósito de forma tridimensional en los modelos numéricos, y de cómo representar el crecimiento del depósito en etapas discretas, sobre el flujo de infiltración simulado y compararlo con aquella asociada a otros parámetros hidráulicos tanto del relave como del sistema hidrogeológico subyacente.

Para la evaluación, se definieron dos tipos de sitios que comúnmente se seleccionan para la ubicación de estos depósitos: un valle angosto de alta montaña y una planicie sedimentaria amplia y de importante espesor. Para ambos sitios se construyeron modelos conceptuales y numéricos utilizando como principales referencias estudios de impacto ambiental presentados en el SEIA. El trabajo analiza la hipótesis de que el crecimiento continuo del área del depósito puede ser representado alternativamente utilizando un área fija con una conductividad hidráulica del relave que varía desde un valor muy bajo hasta aquel asociado al del relave sin consolidar. De esta forma, es posible representar el crecimiento continuo del depósito utilizando un número discreto y acotado de etapas de crecimiento, aplicando la hipótesis en cada etapa definida. Para evaluar la hipótesis, se contrastó con la alternativa de representar el crecimiento utilizando un número considerable de etapas discretas, usando en cada una de ellas, y de forma constante, el valor de la conductividad hidráulica del relave sin consolidar. Los modelos numéricos se construyeron y operaron utilizando el software FEFLOW 7.1.

Los resultados obtenidos permiten comprobar que una representación en etapas discretas, utilizando en cada etapa un aumento gradual de la conductividad del relave entrega, en ambos casos, una aproximación suficiente a los flujos de infiltración que se obtiene utilizando una cantidad importante de etapas con una conductividad hidráulica fija. Por otro lado, la realización de diferentes simulaciones que evaluaron la sensibilidad del flujo de infiltración simulado a variaciones de distintos parámetros hidráulicos, permitieron demostrar que es muy probable que la conductividad no consolidada del relave, o la conductividad hidráulica de unidades hidrogeológicas receptoras de alta permeabilidad, puedan llegar a ser mucho más relevantes que la forma de discretizar el crecimiento del depósito y, por tanto, estos deberían ser parámetros con un respaldo técnico robusto en los estudios de impacto ambiental.

A partir de estos resultados, recomendaciones para futuros trabajos de investigación, corresponden a evaluar la influencia del proceso de consolidación del relave, considerando tanto la reducción de permeabilidad como de la porosidad drenable, y evaluar la metodología propuesta utilizando MODFLOW-USG para comparar el desempeño de ambos códigos.

A mi familia.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia por estar siempre apoyando de distintas formas durante todo el tiempo de mi carrera. Sin el esfuerzo de mi madre no habría llegado tan lejos en los estudios.

Agradezco también a mi profesor guía, por la ayuda brindada en la realización del trabajo que, si bien no estaba físicamente en la universidad, siempre se encontraba atento a mis dudas o llamadas. Al profesor Juvenal por recibirme en su oficina y darme la oportunidad de ser auxiliar en un curso, experiencia muy grata para mi formación y al profesor Yarko por su ayuda en el proceso de realizar un trabajo de título.

Del departamento, agradezco a los profesores por su vocación y enseñanzas dadas en cada curso realizado, siempre quedan las ganas de aprender más de ellos. A las personas que trabajan para el departamento y que te regalan una sonrisa o una conversación en cualquier momento del día. Mención especial a la Jacque, que a pesar de retornos de vez en cuando, nos daba simpatía y momentos entretenidos cada día, a la Vivi por esas conversaciones de día viernes en el laboratorio, y a la tía Carmen, que siempre entregaba conversaciones y sonrisas en cualquier momento del día.

Agradecer a mi amigo de siempre, Diego por las buenas salidas a la plaza a conversar y sus invitaciones a ver sufrir al colo. A mis amigos del colegio, especialmente al Nacho que compartimos muchos años jugando basket. A los bellos Oscar, Alonso, Feña, Cata, Vicho 1, Vicho 2, Javier, Casual, Cristóbal y Nicolás, por los buenos momentos de mechón y las divertidas juntas. Al grupo topolais, primeros amigos de civil y donde conocí al buen amigo Manu, que se desvió del camino del bien y terminó en el piso de arriba. A los amigos de la carrera, entre ellos al Mati, gato, Carla, Juan y los tomases. A los cabros de la sala, entre ellos al Eduardo, amigo desde los inicios de hidráulica, compañero de desayuno en el paradero de la 507, obligado a hacer los trabajos con él y vender humo en cada una de las presentaciones de la carrera, al Carlos, que siempre trabajaba y no sacaba la vuelta, al culpable Nahuel, que siempre puso el pecho a las balas y asumía la culpa de los demás, y a la Karina que siempre esperamos su regreso de la pega.

Y finalmente, a la Meli, que siempre estaba ahí para sólo amarme todo el día y todos los días. Gracias por acompañarme durante el final de mi vida universitaria y darme todo tu apoyo en todo este proceso.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Estructura de la memoria	3
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Contextualización: Origen e importancia de los depósitos de relaves en el proceso minero en Chile	4
2.2. Descripción del funcionamiento de los depósitos de relave	5
2.2.1. Funcionamiento general	5
2.2.2. Características geométricas y operacionales depósitos de relaves en Chile	7
2.2.3. Características hidrogeológicas de los relaves	8
2.3. Configuraciones hidrogeológicas típicas asociadas a depósitos de relave en Chile	9
2.3.1. Unidades no/semi consolidadas	11
2.3.2. Unidades de rocas	13
2.4. Representación de los relaves en modelos hidrogeológicos numéricos para evaluaciones ambientales en el SEA	15
2.4.1. Modelos numéricos	15
2.4.2. Desafío	17
2.5. Hipótesis del trabajo de investigación	18
3. Metodología	19
4. Construcción Modelos Conceptuales	21
4.1. Ubicación zonas de estudio	21
4.2. Descripción depósitos de relaves	22
4.2.1. Operación y crecimiento del depósito de relaves	22
4.2.2. Discretización por etapas depósitos de relaves	24
4.2.3. Crecimiento del relave dentro de una etapa	28
4.2.4. Propiedades hidrogeológicas de los relaves	31
4.3. Definición del acuífero de interés y dominio del modelo	32
4.4. Unidades hidrogeológicas	33
4.4.1. Valle	34
4.4.2. Planicie	37

4.5.	Descripción de entradas y salidas de agua en los modelos	39
4.5.1.	Precipitación media anual	39
4.5.2.	Estimación de la recarga superficial y balance hídrico de los modelos	42
5.	Construcción Modelos Numéricos	47
5.1.	Malla de cálculo	47
5.1.1.	Generación malla superficial	47
5.1.2.	Generación malla 3D	50
5.1.3.	Número de elementos	56
5.2.	Definición tipo de problema y discretización temporal	57
5.3.	Curvas Características Sólido-Agua	57
5.4.	Condiciones de borde e iniciales	59
5.5.	Piezometría del sistema previo a la operación del depósito.	61
5.6.	Condiciones de borde e iniciales para la representación del depósito de relaves en el modelo	66
6.	Simulación Modelos Numéricos	68
6.1.	Simulación 1 año	69
6.1.1.	Comparación discretización depósito en 4 etapas vs 1 etapa	69
6.1.2.	Alternativas de representación de la laguna en cada etapa	74
6.2.	Simulación 20 años	77
6.2.1.	Comparación discretización crecimiento del depósito	77
6.2.2.	Análisis de sensibilidad con respecto al valor inicial de la conductividad del relave	82
6.2.3.	Variación en la conductividad hidráulica del relave	85
6.2.4.	Variación en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos .	88
6.3.	Comparación entre la infiltración al relave e infiltración hacia el sistema hidrogeológico	92
7.	Conclusiones y Recomendaciones	95
7.1.	Sugerencias para trabajos futuros	97
	Bibliografía	98
	Anexos	100
	A. Geología	101
	B. Representación del Depósito por Etapas	106
	C. Código Python	114

Índice de Tablas

2.1.	Cantidad de volumen aprobado y volumen actual de relaves depositados.	5
2.2.	Características geométricas y operacionales depósitos en Chile.	8
2.3.	Propiedades hidrogeológicas para los relaves.	8
2.4.	Porosidad, η , porosidad drenable, S_y , y almacenamiento específico, S_s , para diferentes sedimentos.	13
2.5.	Porosidad, η , porosidad drenable, S_y , y almacenamiento específico, S_s , para unidades de roca.	15
4.1.	Valores de operación para los depósitos de relaves.	22
4.2.	Características geométricas de cada depósito.	24
4.3.	Propiedades hidrogeológicas para el relave.	31
4.4.	Propiedades hidrogeológicas, depósito en valle.	35
4.5.	Propiedades hidrogeológicas, depósito en planicie.	38
4.6.	Descripción de las estaciones y registro de datos, depósito en valle.	39
4.7.	Descripción de las estaciones y registro de datos, depósito en planicie.	41
4.8.	Recarga superficial para ambos modelos.	44
4.9.	Flujos de entrada para ambos modelos.	44
4.10.	Flujo de salida para ambos modelos.	45
5.1.	Elementos por superficie.	49
5.2.	Descripción de las superficies definidas para el modelo en valle.	51
5.3.	Descripción de las superficies definidas para el modelo en planicie.	52
5.4.	Cantidad de elementos utilizados para el sistema hidrogeológico y depósito de relaves.	56
5.5.	Parámetros SWCC modelo Van Genuchten para el suelo.	58
5.6.	Parámetros SWCC modelo Van Genuchten para el relave.	59
5.7.	Condición de borde de carga hidráulica por modelo.	61

Índice de Ilustraciones

2.1. Esquema depósito de relaves genérico.	6
2.2. Evolución depósito Quebrada Blanca 2. Fuente: Golder (2016b).	7
2.3. Curva característica sólido-agua obtenida para los relaves de Quebrada Blanca. Fuente: Golder (2016b).	9
2.4. Depósito sobre eje de la quebrada (depósito La Brea).	10
2.5. Depósito sobre terreno plano (depósito Pampa Pabellón).	10
2.6. Depósito sobre pendiente lateral (depósito El Torito).	11
2.7. Rango de conductividad hidráulica para distintas composiciones de suelos sedimentarios.	12
2.8. Rango de conductividad hidráulica para unidades de roca.	14
4.1. Ubicación zona estudio depósito en valle.	21
4.2. Ubicación zona estudio depósito en planicie.	22
4.3. Depositación de relave, depósito en valle.	23
4.4. Depositación de relave, depósito en planicie.	23
4.5. Relación volumen-altura muro para los depósitos de relaves.	24
4.6. Crecimiento por etapas, depósito en valle.	25
4.7. Crecimiento por etapas, depósito en planicie.	26
4.8. Cota máxima del relave, cota de la laguna y profundidad discretizado en etapas, depósito en valle.	27
4.9. Cota máxima del relave, cota de la laguna y profundidad discretizado en etapas, depósito en planicie.	27
4.10. Representación concepto función o factor de forma $f(t)$	28
4.11. Representación evolución del depósito utilizando la variación de la conductividad en el tiempo.	30
4.12. Dominio del modelo conceptual, depósito en valle.	32
4.13. Dominio del modelo conceptual, depósito en planicie.	33
4.14. Unidades hidrogeológicas, depósito en valle.	36
4.15. Perfil A-A', depósito en valle.	36
4.16. Perfil B-B', depósito en valle.	36
4.17. Dominio del modelo hidrogeológico, depósito en planicie.	38
4.18. Perfil A-A', depósito en planicie.	39
4.19. Perfil B-B', depósito en planicie.	39
4.20. Ubicación estaciones meteorológicas, depósito en valle.	40
4.21. Gradiente de precipitación media anual, depósito en valle.	40
4.22. Ubicación estaciones meteorológicas, depósito en planicie.	41

4.23. Regresión lineal entre la precipitación media anual y la elevación, depósito en planicie.	42
4.24. Entradas y salidas, depósito en valle.	43
4.25. Entradas y salidas, depósito en planicie.	43
4.26. Balance depósito en valle.	45
4.27. Balance depósito en planicie.	46
5.1. Líneas de contacto y dominio del modelo en FEFLOW, depósito en valle. . .	48
5.2. Líneas de contacto y dominio del modelo en FEFLOW, depósito en planicie. . .	48
5.3. Malla superficial de elementos, depósito en valle.	49
5.4. Malla superficial de elementos, depósito en planicie.	50
5.5. Discretización vertical, depósito en valle.	51
5.6. Discretización vertical, depósito en planicie.	52
5.7. Discretización vertical del depósito, depósito en valle.	53
5.7. Continuación. Discretización vertical del depósito, depósito en valle.	54
5.8. Evolución del depósito en valle en 4 etapas.	54
5.9. Discretización vertical del depósito, depósito en planicie.	55
5.10. Evolución del depósito en planicie en 4 etapas.	56
5.11. SWCC para los suelos.	58
5.12. SWCC conductividad relativa en función de la saturación para los suelos.	59
5.13. Condiciones de borde, depósito en valle.	60
5.14. Condiciones de borde, depósito en planicie.	60
5.15. Piezometría simulada, depósito en valle.	62
5.16. Nivel freático, depósito en valle.	63
5.17. Piezometría simulada, depósito en planicie.	64
5.18. Nivel freático, depósito en planicie.	65
5.19. Balance modelos situación previa a la operación del depósito.	66
5.20. Distribución condiciones de borde del tipo carga hidráulica para representar el relave saturado y la laguna de aguas claras.	67
6.1. Flujo y volumen acumulado para 1 año de simulación con discretización del crecimiento del depósito, modelo en valle.	71
6.2. Flujo y volumen acumulado para 1 año de simulación con discretización del crecimiento del depósito, modelo en planicie.	73
6.3. Nivel freático y domo de infiltración desde laguna sobre terreno natural al final del primer año.	74
6.4. Variación de la infiltración desde la laguna hacia terreno natural, en unidades de flujo y volumen, considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en valle.	75
6.5. Variación del error numérico en unidades de Volumen considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en valle.	75
6.6. Variación de la infiltración desde la laguna hacia terreno natural, en unidades de flujo y volumen, considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en planicie.	76
6.7. Variación del error numérico en unidades de Volumen considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en planicie.	76

6.8. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando variación en la discretización de etapas del depósito, modelo en valle.	79
6.9. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando variación en la discretización de etapas del depósito, modelo en planicie.	81
6.10. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en el valor inicial de la conductividad hidráulica del relave, modelo en valle. .	83
6.11. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en el valor inicial de la conductividad hidráulica del relave, modelo en planicie.	84
6.12. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica del relave, modelo en valle.	86
6.13. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica del relave, depósito en planicie.	87
6.14. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos, modelo en valle. .	89
6.15. Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos, modelo en planicie.	91
6.16. Comparación entre la infiltración al relave y al acuífero, depósito en valle. . .	93
6.17. Comparación entre la infiltración al relave y al acuífero, depósito en planicie.	93

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Toda planta de explotación minera, cuyo proceso de concentración del mineral sea la flotación, genera residuos denominados relaves, correspondientes a la mezcla de partículas sólidas y agua. La disposición utilizada para estos desechos mineros corresponde al depósito de relaves, el cual es una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, con el objetivo de aislar completamente los sólidos depositados del ecosistema circundante (Ramírez, 2007).

Los depósitos de relaves se encuentran principalmente en el norte del país, donde se contabilizaron en el año 2018 un total de 602 depósitos (81 % del total del país), de los cuales sólo 75 se encuentran activos (74 % del total de depósitos activos)(Sernageomin, 2018). Actualmente, los 3 depósitos con mayor tonelaje corresponden a las obras Talabre, Laguna Seca y Carén con 1.793, 1.302 y 1.276 millones de toneladas, respectivamente. Por otro lado, para estos depósitos está aprobada la depositación total de 2.103, 4.500 y 3.288 millones de toneladas de relave, respectivamente, donde los depósitos de Laguna Seca y Carén han depositado sólo un tercio de su capacidad a la fecha actual (Sernageomin, 2018).

Debido a la ley 19.300, los proyectos de depósitos de relaves deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y si, según el Artículo 11 letra (b), generan efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, se requerirá la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) (Ley N° 19.300, 1994). El EIA elaborado debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir las acciones que ejecutará para impedir o minimizar sus efectos significativamente adversos (SEA, 2012).

Uno de los impactos de los depósitos de relaves corresponde a la infiltración de agua al acuífero sobre el cual se ubica el depósito de relaves. La infiltración ocurre desde el relave y desde la laguna de aguas claras que se genera en el punto más bajo del depósito, dada la liberación del agua del relave. La ubicación de la laguna depende principalmente de temas económicos y estructurales. Comúnmente, para evitar problemas estructurales en el muro del depósito, la laguna se ubica en la cola del depósito, donde una parte de ella puede desarrollarse

sobre relave y otra sobre terreno natural. De esta forma, existen tres potenciales zonas para generar infiltración hacia sistemas acuíferos subyacentes: una zona desde el relave sin laguna, una segunda zona donde se desarrolle la laguna sobre el relave y la tercera zona de infiltración correspondiente a la laguna sobre terreno natural.

Dado que la operación minera es continua en el tiempo y la tasa de relave que ingresa al sistema dependerá del plan minero desarrollado, el depósito tendrá un tamaño que varía constantemente, ocurriendo lo mismo con el tamaño y posición de la laguna. Por esto, una de las principales dificultades a la hora de estimar el flujo de infiltraciones corresponde a la forma de representar el depósito y su naturaleza dinámica en el tiempo en un modelo conceptual y numérico.

Considerando la complejidad que representa el comportamiento de los depósitos de relaves y los acuíferos subyacentes, normalmente se recurre a modelos conceptuales y numéricos para su análisis, herramientas que han sido ampliamente validadas en el tiempo y que pueden ser abordados con distintos grados de profundidad y utilizando diversos enfoques y metodologías.

El principal desafío, tanto en el modelo conceptual como en el numérico, es bajo qué criterios desarrollar una representación discreta para una instalación dinámica que crece continuamente. Los criterios pueden ser eficiencia computacional, calidad de la información y el nivel de detalle que se espera en la estimación, de acuerdo al contexto ambiental.

Dada la naturaleza de los ecosistemas eventualmente presentes en torno a los depósitos, se traduce en un nivel de detalle importante, sólo si es que existe información de la caracterización que lo permita. De esta forma, normalmente se desarrollan modelos numéricos complejos y dinámicos, para lo cual existen diferentes alternativas, entre ellas MODFLOW y FEFLOW.

La característica dinámica de los tranques de relave impone un problema donde las condiciones de borde y la geometría son variables en el tiempo. Tanto MODFLOW como FEFLOW proporcionan herramientas para la activación secuencial de elementos en el tiempo y condiciones de borde variables. En MODFLOW, dado que usa una estructura modular, es necesario la incorporación de paquetes para la implementación de las características mencionadas, utilizando el paquete "Time-Variant Specified-Head" (CHD) para la definición de condiciones de borde variables y el paquete básico (BAS) incorpora la activación/inactivación de elementos de la grilla. En cambio, FEFLOW incorpora estas características dentro de su interfaz.

Si bien, ambos códigos incorporan la activación secuencial de elementos en el tiempo, su uso no es utilizado en la modelación de los depósitos, reemplazándolo por simulaciones por etapas que representen la forma del depósito en un periodo de tiempo.

Por este motivo surge la necesidad de evaluar cuán importante puede ser la forma de representar el depósito en el modelo numérico para estimar flujo de infiltración y cómo esta decisión compite con otros factores, como por ejemplo la precisión que se tiene en la estimación de propiedades del acuífero o del mismo relave.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar la idoneidad de diferentes metodologías utilizadas en la práctica para representar tranques en modelos numéricos y determinar la importancia relativa que la forma de representación tiene en la estimación del flujo de infiltración, en comparación a otros parámetros hidráulicos de la modelación, usando el modelo para aguas subterráneas FEFLOW.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar la influencia de la discretización en el número de etapas del depósito para considerar el crecimiento del depósito de relaves sobre el flujo de infiltración.
- Identificar la influencia de las propiedades hidrogeológicas del relave sobre el flujo de infiltración.
- Identificar la influencia de las propiedades hidrogeológicas del acuífero sobre el flujo de infiltración.

1.3. Estructura de la memoria

Los contenidos de esta memoria se describen a continuación:

1. Capítulo 1 “Introducción”: En este capítulo se expone la motivación de la memoria, los objetivos de la investigación llevada a cabo y la estructura del presente informe.
2. Capítulo 2 “Revisión Bibliográfica”: En este capítulo se presentan y discuten los antecedentes revisados con relación al tema de investigación.
3. Capítulo 3 “Metodología”: En este capítulo se describe la metodología realizada para obtener los resultados del trabajo.
4. Capítulo 4 “Construcción Modelos Conceptuales”: En este capítulo se presenta el desarrollo de los modelos conceptuales de las zonas de estudio.
5. Capítulo 5 “Construcción Modelos Numéricos”: En este capítulo se presenta las características de los modelos numéricos desarrollados en FEFLOW 7.1.
6. Capítulo 6 “Simulación Modelos Numéricos”: En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del flujo de infiltración para los diferentes casos planteados.
7. Capítulo 7 “Conclusiones y Recomendaciones”: En este capítulo se explican las principales conclusiones obtenidas a partir del análisis de resultados obtenidos y se dan sugerencias para trabajos futuros relacionados.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Contextualización: Origen e importancia de los depósitos de relaves en el proceso minero en Chile

La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de roca del yacimiento. Sólo una pequeña fracción corresponden al elemento de interés económico, cercano al 1%. Una vez que la roca ha sido finamente molida y concentrada por procesos de flotación, se obtiene un material con una concentración más alta de cobre, que se puede vender o procesar hasta obtener cobre metálico puro. El resto del material se denomina relave, y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable. La zona destinada a su depositación lleva por nombre depósito de relave, el cual es una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los sólidos depositados del ecosistema circundante.

Según el Decreto 248, los depósitos de relaves se definen como “toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies minerales. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos.”

A marzo de 2018, se han catastrado un total de 740 depósitos de relave distribuidos en 65 comunas. Los depósitos activos constituyen una fracción pequeña frente a los inactivos, contabilizando un total de 101 depósitos, frente a los 469 depósitos inactivos. El resto corresponde a depósitos sin antecedentes del dueño legal, es decir, abandonados, alcanzando el total de 170 depósitos (Sernageomin, 2018).

Además, en los 740 depósitos catastrados, se contabiliza un total de 8.131 Mm³ en volumen de relave, que ascenderían al doble al terminar de operar los proyectos actuales. Si denominamos depósitos grandes a los que almacenen volúmenes mayores a 10 Mm³, la lista se acota 27 depósitos (entre los 101 activos), y representan el 90% del volumen total nacional aprobado (Sernageomin, 2018). La Tabla 2.1 presenta los valores publicados por el Sernageomin para los valores del volumen aprobado y actual de la gran minería y la mediana-pequeña

minería.

Tabla 2.1: Cantidad de volumen aprobado y volumen actual de relaves depositados.

	Volumen Aprobado [m ³]	Volumen Actual [m ³]
Gran Minería	14.363.690.810	6.436.677.944
	% a la Fecha	44,8
Pequeña y Mediana Minería	106.438.936	58.328.092
	% a la Fecha	54,8

Fuente: Sernageomin (2018).

2.2. Descripción del funcionamiento de los depósitos de relave

2.2.1. Funcionamiento general

Los elementos principales que componen un depósito de relaves se describen a continuación (Figura 2.1):

- Cubeta, que corresponde al volumen físico disponible para el depósito de relaves, junto con gran parte del agua de los relaves.
- Muro de contención, que permite contener los relaves que en ella se descargan.
- Sistema de descarga, que permite depositar el relave en la cubeta. Además, este sistema se puede utilizar para clasificar y seleccionar los residuos, de modo de utilizar parte más gruesa como material para la construcción del muro perimetral.
- Zona de playa, corresponde al sector donde se descarga el relave en la cubeta y usualmente está seca en la superficie, dependiendo del tiempo de reactivación de descarga en la zona.
- Laguna de aguas claras, correspondiente a la laguna de clarificación que se forma dentro del depósito. Su formación proviene del escurrimiento del agua contenida en los relave hacia el punto más bajo del depósito. Además, en esta zona se depositan las partículas de menor tamaño, dado el proceso de segregación de las partículas sólidas de mayor a menor tamaño a lo largo del escurrimiento del relave.

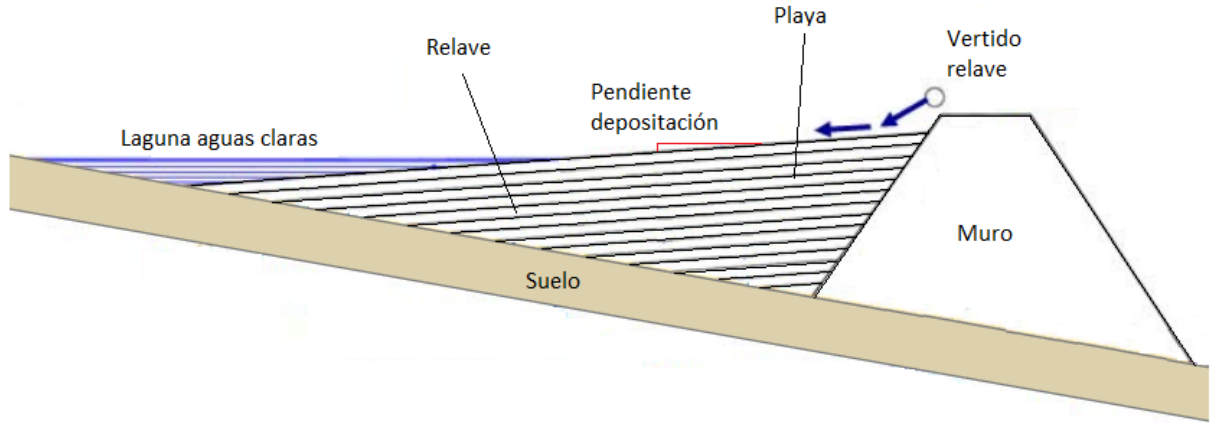


Figura 2.1: Esquema depósito de relaves genérico.

Los relaves son depositados generalmente en forma hidráulica y se realiza en forma periférica, ya sea por un punto de descarga o por varios puntos. La descarga debe definir una pendiente en el depósito para que el relave pueda escurrir, parámetro que depende principalmente del contenido de agua.

A medida que entre material a la cubeta, la superficie del depósito aumentará según las limitaciones que proporciona la topografía de la zona. Además, la laguna sufrirá cambios espaciales, trasladándose según sea la evolución del depósito. La Figura 2.2 presenta la evolución proyectada del depósito Quebrada Blanca 2 (Compañía Minera Teck Quebrada Blanca S.A.) entre el año 1 y 4, cuya descarga se realiza desde el muro de contención y por el costado este del depósito. Para este caso, la laguna se genera en la cola del depósito debido a la pendiente de deposición (desde el muro a la cola) y se desplazará hacia el norte a medida que el depósito crezca en el tiempo.

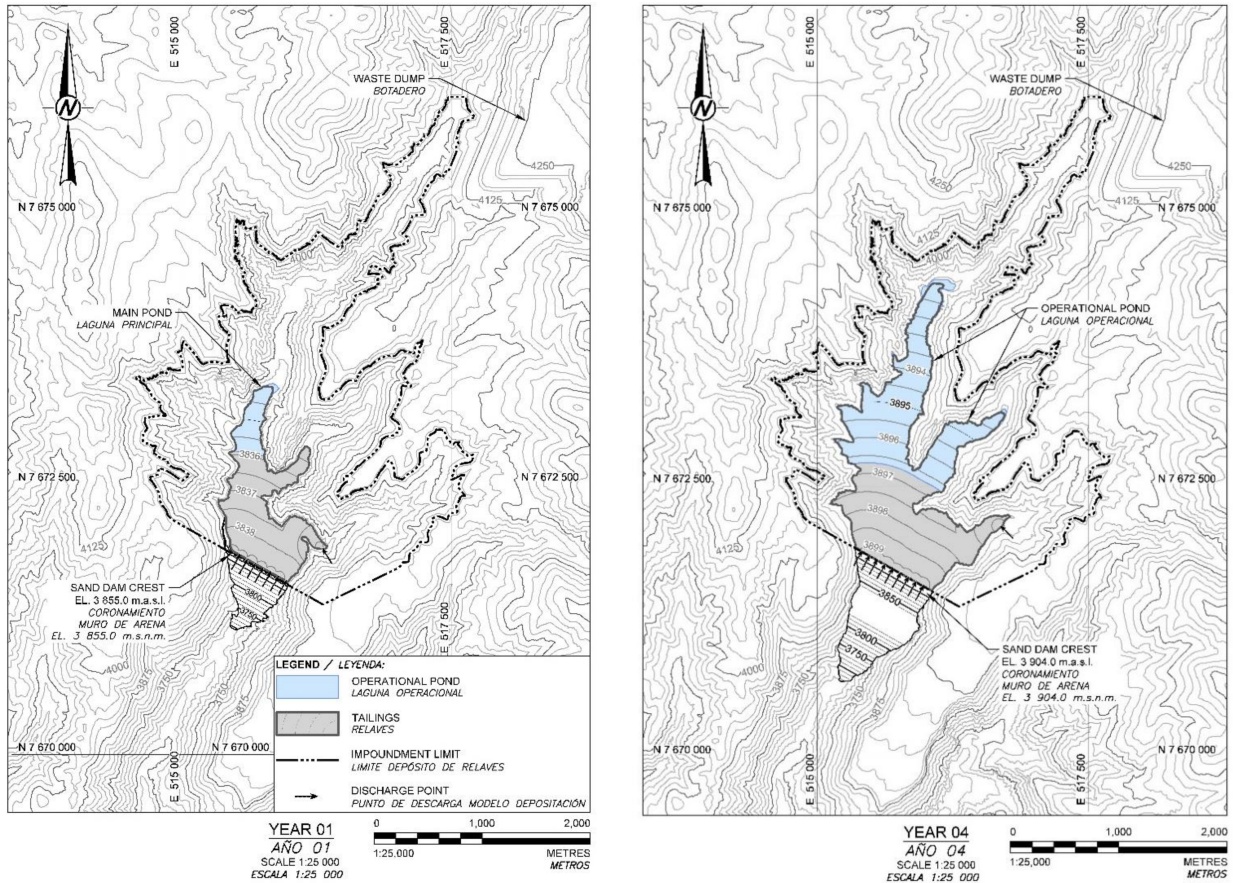


Figura 2.2: Evolución depósito Quebrada Blanca 2. Fuente: Golder (2016b).

2.2.2. Características geométricas y operacionales depósitos de relaves en Chile

Algunas de las características geométricas importantes en un depósito de relaves son la superficie máxima abarcada al final de la operación, la altura del muro y la capacidad de almacenar relave. Estas características dependerán de la topografía de la zona, la pendiente de depositación de relaves y la tasa nominal de descarga.

La Tabla 2.2 presenta un resumen de los datos sobre las dimensiones y valores de operación para algunos depósitos de relaves presentados en el SEIA. Las observaciones relevantes de mencionar de las características son:

- La pendiente de depositación de relaves convencionales es muy similar entre los depósitos en Chile, la cual varía entre 0,2 y 0,3 %.
- La tasa nominal de descarga varía entre proyectos, sin notar algún rango de valores adecuado.

Tabla 2.2: Características geométricas y operacionales depósitos en Chile.

Depósito	Tasa Nominal Descarga [Kton/día]	Capacidad Total [Mton]	Pendiente Depositación [%]	Superficie Máxima Cubeta [há]	Atura Muro [m]
Ladera Sur	31	230	S.I. ¹	S.I.	75
Quebrada Blanca 2	137	882	0,3	800	310
Spence	94	584	0,3	1.800	40
La Brea	S.I.	500	2	440	255
Laguna Seca	450	4.500	S.I.	6.200	107
Pampa Pabellón	210	2.329	0,4	2.640	127
Los Diques	70	600	S.I.	S.I.	170

¹ S.I.: Sin información.

Fuente: Golder (2016a), Golder (2016b), Arcadis (2015), Arcadis (2009), MWH (2008), Arcadis (2018) y MWH (2014).

2.2.3. Características hidrogeológicas de los relaves

En la Tabla 2.3 se presentan los datos declarados en informes seleccionados presentados al SEIA de las propiedades de los relaves. Se presentan los valores utilizados para la conductividad hidráulica K , porosidad drenable S_y y humedad residual θ_r .

Como se observa, la conductividad hidráulica y la porosidad obtenidas de las muestras de relaves de los diferentes proyectos son similares, a excepción del depósito Spence donde utilizan un valor menor, considerando la fracción fina del relave (lamas).

Tabla 2.3: Propiedades hidrogeológicas para los relaves.

Depósito	K [m/s]	S_y [%]	θ_r [%]
Ladera Sur	10^{-8}	50	S.I. ¹
Quebrada Blanca 2	10^{-8}	S.I.	S.I.
Spence	$2 \cdot 10^{-9}$	52	7
Pampa Pabellón	10^{-8}	45,1	4

¹ S.I.: Sin información.

Fuente: Golder (2016a), Golder (2016b), Arcadis (2015) y Arcadis (2018).

Con respecto al modelo del depósito de Ladera Sur, si bien utilizan el valor de K igual a 10^{-8} m/s para la conductividad saturada para el relave, Golder (2016b) realizó pruebas de consolidación para los relaves totales y lamas, obteniendo que para el primero la conductividad varía entre $4 \cdot 10^{-8}$ y $1 \cdot 10^{-8}$ m/s para presiones entre 17 y 800 kPa, y para las lamas se

obtienen los valores $5 \cdot 10^{-8}$ y $1 \cdot 10^{-9}$ m/s para presiones entre 3 y 800 kPa. Por lo tanto, el efecto de la consolidación disminuye el valor de la conductividad hidráulica en un orden de magnitud, para el caso de las lamas, en las capas más profundas del depósito.

Por otro lado, Golder (2016b) realizó ensayos para medir la curva característica sólido-agua del relave (SWCC). Los resultados del ensayo corresponden a los presentados en la Figura 2.3, sobrepuesto al ajuste Van Genuchten de la curva.

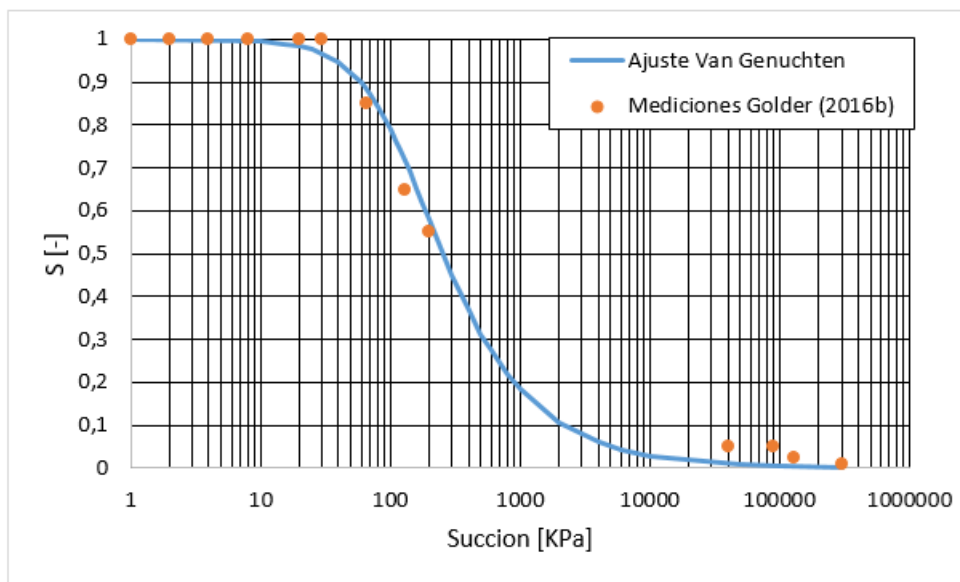


Figura 2.3: Curva característica sólido-agua obtenida para los relaves de Quebrada Blanca. Fuente: Golder (2016b).

2.3. Configuraciones hidrogeológicas típicas asociadas a depósitos de relave en Chile

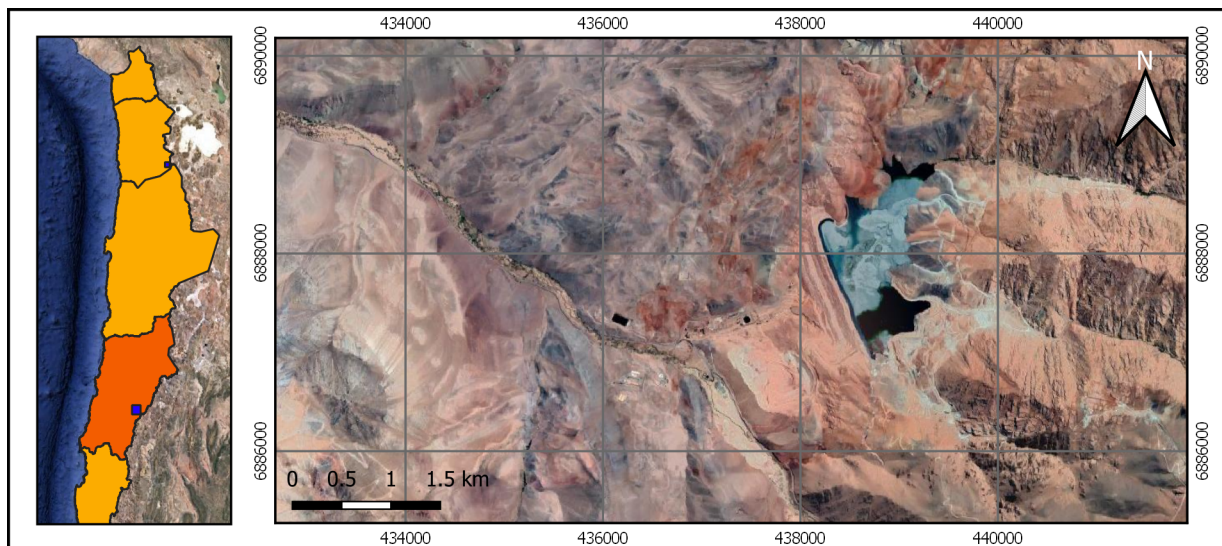
Según Lottermoser (2007), los depósitos de relaves se construyen típicamente sobre el eje de un valle, en la pendiente lateral de uno de estos o sobre terrenos planos donde el relave queda confinado por un anillo de muros.

En el norte Chile, la construcción de depósitos sobre ejes de valles o en planicies sedimentarias extendidas es común. Por ejemplo, para el primer caso se identifican los depósitos Quebrada Blanca (Golder, 2016b), Los Quillayes (Campaña et al., 2015) y La Brea (Arcadis, 2009), donde la ubicación para este último es presentada en la Figura 2.4. Para el segundo grupo se reconocen los depósitos Laguna Seca (MWH, 2008), Ladera Sur (Golder, 2016a) y Pampa Pabellón (Arcadis, 2018), presentado en la Figura 2.5. Por otra parte, depósitos construidos en la pendiente lateral del valle no son comunes, teniendo de ejemplo el tranque El Torito (Arcadis, 2017), correspondiente a la Figura 2.6.

En el caso en que el depósito está construido en el eje de un valle, existe una mayor probabilidad de que las unidades de roca en las laderas ejerzan un control importante sobre el flujo de infiltración, exceptuando el caso en que las fallas o un alto grado de fracturamiento

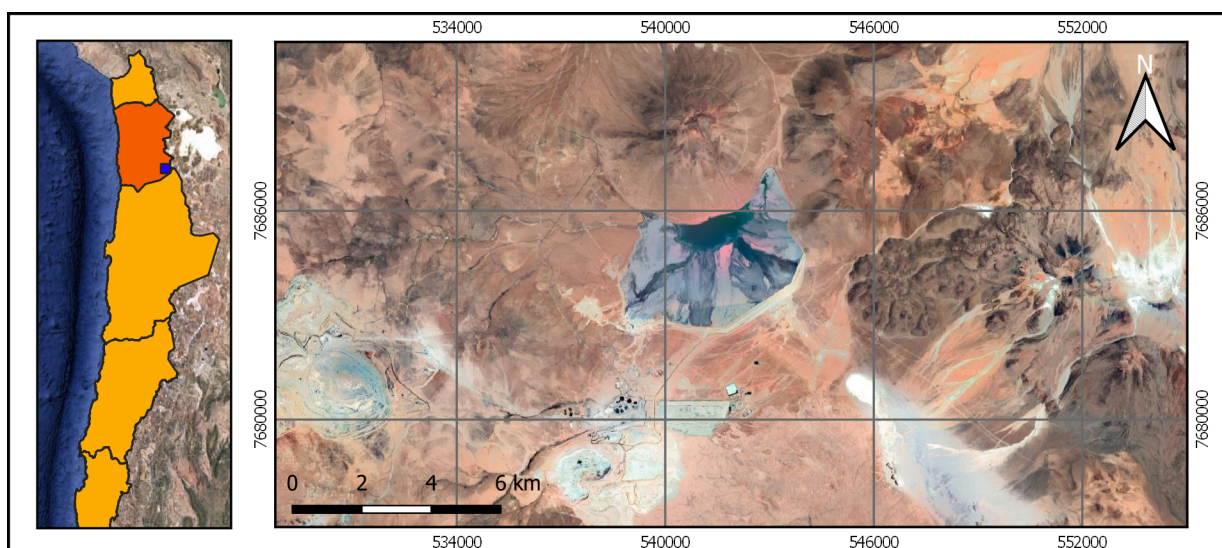
en los horizontes superficiales de las rocas puedan aumentar la conductividad hidráulica y generar condiciones de mayor movilidad.

En el caso de los depósitos ubicados sobre planicies, el suelo subyacente normalmente tiene una mayor conductividad hidráulica que el relave, dado que se compone principalmente de unidades de sedimentos, y por lo tanto, las posibilidades de que existan controles geológicos al flujo de infiltración depende de la profundidad a la que la consolidación de los sedimentos disminuye la conductividad hidráulica a un nivel suficiente, a la profundidad a la cual se encuentra un basamento de roca de baja permeabilidad o a la existencia de controles geológicos aguas abajo del muro y la distancia a la que se ubican.



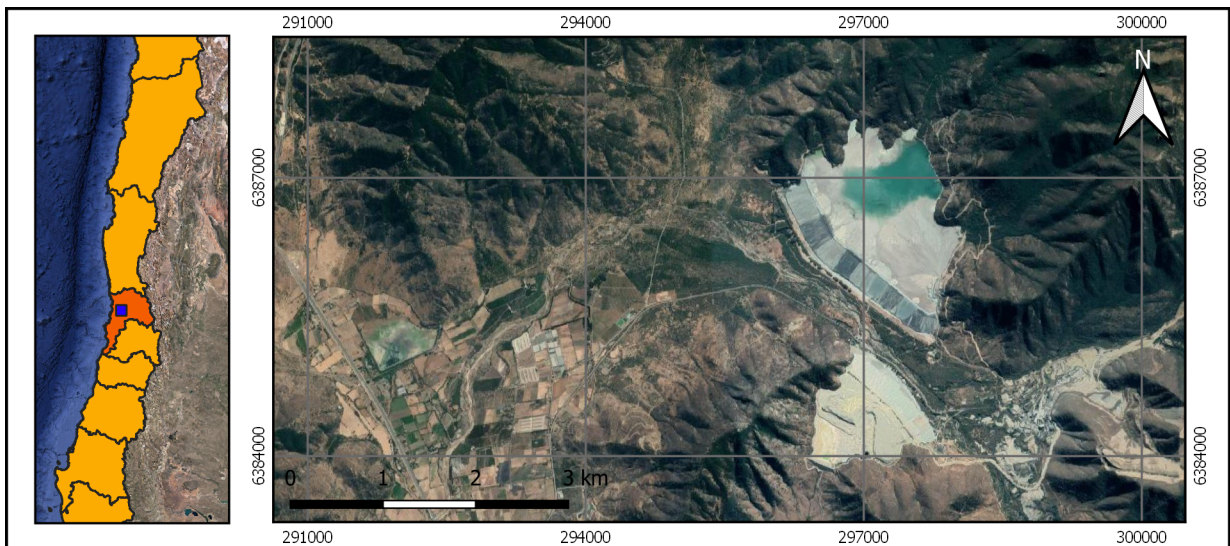
Nota: Datum WGS84 19S

Figura 2.4: Depósito sobre eje de la quebrada (depósito La Brea).



Nota: Datum WGS84 19S

Figura 2.5: Depósito sobre terreno plano (depósito Pampa Pabellón).



Nota: Datum WGS84 19S

Figura 2.6: Depósito sobre pendiente lateral (depósito El Torito).

Como se ha distinguido, es común encontrar dos tipos de unidades hidrogeológicas en las ubicaciones típicas de depósitos de relaves en Chile: unidades no o semi consolidadas y roca. A continuación se realiza una descripción de sus principales características que son importantes considerar al momento de su representación.

2.3.1. Unidades no/semi consolidadas

Estas unidades son compuestas por granos de grava, arena, limo o arcilla, que no han sido unidos por aglutinamiento mineral, por presión o por alteración térmica. Debido a su depositación sucesiva de material, se genera estratificación horizontal natural en los depósitos, provocando una fuerte anisotropía al sistema. Por ejemplo, Freeze y Cherry (1979) agrupa un análisis de los valores resultantes de conductividad hidráulica horizontal y vertical en 61 muestras del valle de San Joaquín en California, donde el 75% del total presentaban mayor conductividad hidráulica horizontal que vertical. Los valores de las conductividades horizontales fueron entre 2 a 10 veces mayores que las conductividades verticales.

Además, existe una gran variabilidad en los resultados de pruebas en campo o laboratorio de la conductividad hidráulica realizados en un mismo depósito. En estudios recopilados por Freeze y Cherry (1979), se han observado variaciones dentro de las zonas permeables de más de 2 o 3 órdenes de magnitud, utilizando ensayos de permeámetros en muestras representativas. Como referencia, para establecer un rango de conductividad hidráulica para rellenos sedimentarios de origen aluvial, puede considerarse los antecedentes presentados por Sanders (1998), Fetter (2001), Smith y Wheatcraft (1993) y Domenico *et al.* (1998), ilustrados en la Figura 2.7.

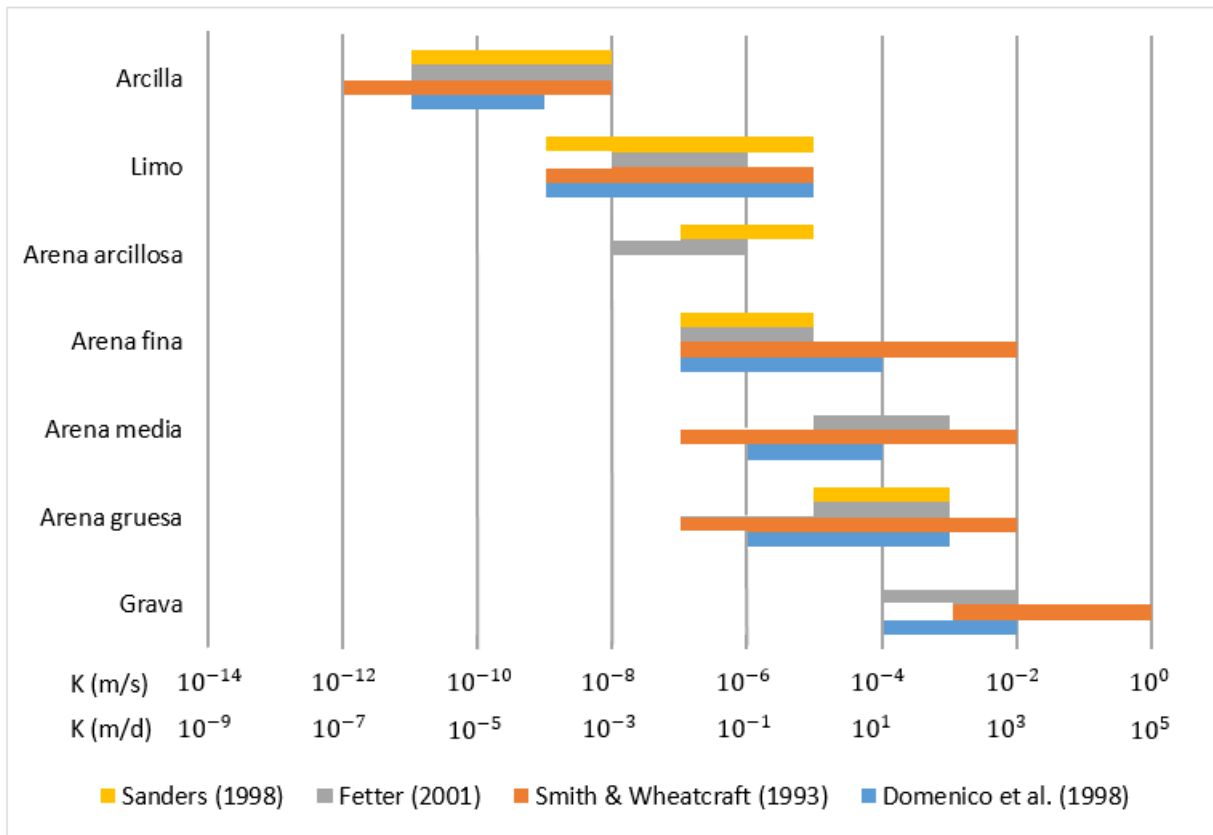


Figura 2.7: Rango de conductividad hidráulica para distintas composiciones de suelos sedimentarios.

Los rangos de porosidad, porosidad drenable, registrados por Sanders (1998), y de almacenamiento específico, registrados por Domenico (1972), para distintas composiciones de suelos sedimentarios se presentan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Porosidad, η , porosidad drenable, S_y , y almacenamiento específico, S_s , para diferentes sedimentos.

Sedimento	η [%]	S_y [%]	S_s [1/m]
Arcillas	40 a 60	0 a 5	10^{-2} a 10^{-4}
Limos	35 a 50	3 a 19	-
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28	10^{-3} a 10^{-4}
Arena gruesa	21 a 50	22 a 35	10^{-4} a 10^{-5}
Grava	25 a 40	13 a 26	10^{-4} a 10^{-5}

Fuente: Sanders (1998) y Domenico (1972).

2.3.2. Unidades de rocas

Las unidades de rocas se clasifican en sedimentarias, ígneas y metamórficas. En estos tipos de medios no porosos, la permeabilidad está influenciada fuertemente por el grado de fracturamiento o disolución de la roca, y de la interconexión para el desarrollo del flujo.

Las rocas sedimentarias se clasifican según su origen, en detríticas y químicas. La primera clasificación corresponde a la aglutinación, mediante un cemento, de las partículas, como lo son las areniscas. En cambio, las rocas de origen químico se forman de la precipitación de compuestos químicos, como las rocas carbonatadas. La porosidad y permeabilidad en rocas carbonatadas pueden variar enormemente en función a la disolución del carbonato, en las cuales se pueden originar ríos subterráneos en donde no se cumple el régimen laminar.

En las rocas ígneas y metamórficas las posibilidades de flujos considerables residen en la zona alterada superficial, o en las regiones muy fracturadas por fallas y diaclasas. Las muestras sólidas de rocas metamórficas e ígneas no fracturadas tienen porosidades que rara vez superan el 2%.

Freeze y Cherry (1979) mencionan que la generación de fracturas disminuye a medida que aumenta la profundidad, debido al aumento de la temperatura y la presión. En el caso de rocas carbonatadas, también se observa una disminución en la disolución al aumentar la profundidad, debido a la compresión de la matriz de minerales, recristalizando en una masa rocosa.

La modelación en detalle y a escala local de éste tipo de medio es compleja debido a que requiere de un conocimiento profundo de las características del acuífero y de su anisotropía. Una práctica usual consiste en adoptar el supuesto de que se pueden representar como medios porosos equivalentes, asumiendo constantes elásticas, en una extensa área donde las heterogeneidades del acuífero fracturado o kárstico dejan de ser relevantes (SEA, 2012).

La Figura 2.8 ilustra los rangos de valores de la conductividad hidráulica para las unidades de roca presentados por Sanders (1998), Freeze y Cherry (1979), Smith y Wheatcraft (1993) y Domenico *et al* (1998).

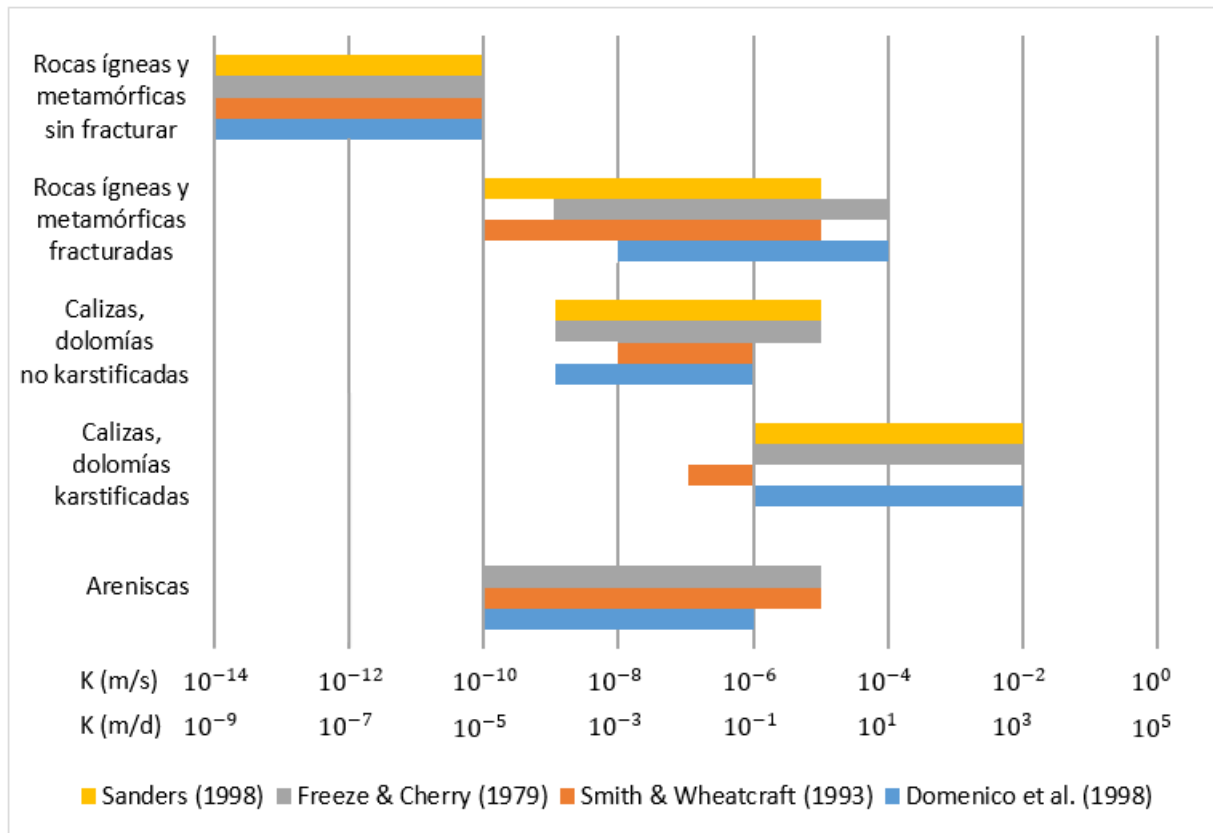


Figura 2.8: Rango de conductividad hidráulica para unidades de roca.

Los rangos de porosidad, porosidad drenable, registrados por Sanders (1998), y de almacenamiento específico, registrados por Domenico (1972), para unidades de roca se presentan en la Tabla 2.5. Todos estos valores deben tomarse como orientativos, en especial los de la porosidad eficaz, ya que las dispersiones pueden ser muy importantes, en función de estado de la roca, meteorización, edad, origen, lugar, entre otros. La porosidad total de rocas compactas también es afectada por la meteorización y la fracturación por descompresión y esfuerzos tectónicos, los cuales tienden a elevarla.

Tabla 2.5: Porosidad, η , porosidad drenable, S_y , y almacenamiento específico, S_s , para unidades de roca.

Roca	η [%]	S_y [%]	S_s [1/m]
Calizas, dolomías karstificadas	5 a 50	5 a 40	-
Calizas, dolomías no karstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5	-
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10	-
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	10^{-5} a 0,01	10^{-4} a 10^{-6}
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	10^{-5}	$<10^{-6}$

Fuente: Sanders (1998) y Domenico (1972).

2.4. Representación de los relaves en modelos hidrogeológicos numéricos para evaluaciones ambientales en el SEA

2.4.1. Modelos numéricos

Los modelos numéricos permiten la resolución de las ecuaciones que describen los procesos físicos que gobiernan el movimiento y composición de las aguas subterráneas, sin necesidad de simplificaciones ni supuestos mayores, necesarios en modelos analíticos, pero condicionados por la capacidad de cálculo y por la solución que depende de la discretización espacial y temporal escogidas.

Existe una gran variedad de códigos disponibles para la representación de los procesos en aguas subterráneas, mencionados en la Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas del SEA (2012), de los cuales se han destacado dos: MODFLOW-USG y FEFLOW.

MODFLOW-USG, código basado en diferencias finitas en un esquema de volúmenes de control, ha sido utilizado en proyectos como Escondida (MWH, 2008), Sierra Gorda (Schlumberger Water Services, 2009), La Brea (Arcadis, 2009) y Pampa Pabellón (Arcadis, 2018), comúnmente complementado con perfiles 2D del código SEEP/W, en el cual se representa el crecimiento del depósito mediante capas.

FEFLOW por su parte, basado en elementos finitos, ha sido utilizado de forma más acotada en proyectos como Quebrada Blanca Fase 2 (Golder, 2016b), Tranque de Relaves Ladera Sur (Golder, 2016a) y Candelaria (MWH, 2014).

En estudios presentados en el SEIA sobre evaluación del impacto de depósitos de relaves, se pueden observar diferentes metodologías para estimar la infiltración hacia el sistema hidrogeológico subyacente. Estas se pueden clasificar en tres grupos:

- Reemplazo del depósito por una condición de borde calibrada o analítica.
- Mediante la modelación de perfiles 2D.
- Modelación explícita del depósito en 3D.

Debido a que el flujo de infiltración debe necesariamente ser resultado de las propiedades del relave, del medio, y de los controles hidrogeológicos que eventualmente pudiesen generarse en el medio subyacente, solo la representación 3D captura estas componentes de manera íntegra, más allá de las incertidumbres propias en cada una. Por el contrario, la modelación 2D presenta la limitación de requerir a la asignación de anchos representativos a cada perfil 2D simulado para obtener un flujo total infiltrado, y equivalentemente, carecer de una modelación completa de los controles hidrogeológicos que normalmente son en tres dimensiones.

A continuación, se detallan a modo de ejemplo seis modelos presentados al SEIA. Estos se agrupan según metodologías similares.

(a) Representación implícita del depósito por una condición de borde: Depósitos de relaves mina Candelaria (MWH, 2014)

En el modelo numérico, construido en FEFLOW, se estima la infiltración del depósito de relaves al acuífero considerando al depósito en su configuración final y que se encuentra completamente saturada por un tiempo infinito. Con estos supuestos, el depósito desde el tiempo inicial infiltrará un valor máximo de agua durante toda la operación. Además, no considera la interacción con las unidades hidrológicas debajo de éste y procesos de drenaje que pueden desaturar el depósito.

Esta recarga, en el modelo, se representa mediante condiciones de borde del tipo transferencia en la zona donde se ubica el depósito, las cuales son calibradas para obtener el flujo estimado.

(b) Representación implícita del depósito por condiciones de borde obtenidas mediante calibración: Laguna Seca (MWH, 2008)

El depósito de relaves Laguna Seca llevaba operando desde el 2002, contando con registros de la variación de los niveles en pozos, hasta la fecha de la construcción del modelo numérico en manos de MWH en el año 2008.

El modelo construido en MODFLOW-USG, tenía dos objetivos, el primero era representar las variaciones de los niveles de los pozos de observación que se han registrado desde la puesta en marcha del proyecto y la fecha del inicio del estudio (2002-2008) y el segundo, buscaba predecir el impacto para el resto de tiempo de la operación (2008-2045).

Para la calibración de las condiciones de borde, se buscó simular los registros de los pozos aguas arriba y aguas abajo del muro, considerando dos zonas de recarga: relave húmedo y laguna. En la segunda fase, el valor de la condición de borde en el tiempo resulta de un proceso iterativo que consiste en estimar el valor de recarga máximo que permita subir el nivel piezométrico hasta la cota media del relave. Esta condición de nivel es verificada durante todo el periodo de simulación.

(c) Representación explícita 2D del depósito por etapas de crecimiento: Pampa Pabellón (Arcadis, 2018) y La Brea (Arcadis, 2009)

Estos modelos son construidos en Seep/W, donde utilizan capas para definir el crecimiento del relave durante la operación. Dado que se simula el depósito en un perfil en 2D, las

infiltraciones obtenidas se encuentran por unidad de ancho. El flujo de infiltración total se obtiene de representar la superficie del depósito en varias áreas representadas por un perfil 2D. La suma de cada uno de los flujos, ponderados por el ancho representativo, corresponde al flujo de infiltración desde el depósito.

Para el modelo de Pampa Pabellón, se utilizaron 32 capas para los 42 años de operación proyectados del depósito y se desarrollaron 5 perfiles. Por otro lado, en el modelo de La Brea se utilizaron 4 capas para representar la evolución del depósito en 25 años y sólo se definió un perfil para representar la infiltración total.

Para representar el vertimiento saturado del relave al depósito, en cada etapa se agregaron condiciones de borde del tipo presión igual a 0. En los nodos donde se desarrolla la laguna utilizan condiciones de borde del tipo carga hidráulica igual a la cota de la laguna.

(d) Representación explícita 3D del depósito por etapas de crecimiento: Quebrada Blanca 2 (Golder, 2016b) y Ladera Sur (Golder, 2016a)

En los modelos numéricos de los proyectos Quebrada Blanca 2 y Ladera Sur, el crecimiento del depósito se representa en el código FEFLOW, utilizando la herramienta de activación de elementos de la malla de cálculo. De esta forma, por cada etapa de crecimiento definido para el depósito, se activa una capa nueva. En estos dos modelos, se discretiza el crecimiento del depósito en cuatro etapas, en el caso del modelo de Quebrada Blanca 2 se representan los años 1, 4, 12 y 25, y en Ladera Sur los años 1, 5, 10 y 20. La discretización elige los años más representativos para el crecimiento del relave. Además, se agrega una capa adicional en la representación del primer año, dado que permite resolver de mejor manera los gradientes verticales en la base del depósito.

A pesar de que se utilice etapas discretas para representar el crecimiento del depósito, se busca definir el crecimiento gradual del área de los nuevos relaves depositados en cada etapa mediante un aumento lineal de la conductividad hidráulica de los elementos nuevos del relave. La variación de la conductividad va desde $1 \cdot 10^{-10}$ m/s hasta la conductividad saturada del relave $1 \cdot 10^{-8}$ m/s.

Por otro lado, para representar el vertimiento saturado del relave al depósito, en cada etapa se agregaron condiciones de borde del tipo carga hidráulica igual a la cota de la superficie del relave en los nodos donde no se desarrolla la laguna. En los nodos donde la laguna se desarrolla, definieron condiciones de borde de carga igual a la cota.

Además, para minimizar el error numérico asociado al cambio súbito de la posición de la laguna, se define que la condición de borde varíe desde la carga inicial del subsuelo hasta la cota de la laguna en un plazo de 5 días.

2.4.2. Desafío

Los estudios revisados en esta sección señalan que es necesario la estimación de las propiedades de los relaves y de la hidrogeología, dado que ambas influyen en el flujo de infiltración. Por una parte, las propiedades del relave dan cuenta del posible flujo que puede ser desarrollado desde la superficie hasta el contacto con el terreno natural. En cambio, el sistema

hidrogeológico puede llegar a limitar el gradiente vertical y de esta forma, reducir el flujo de la infiltración desde el depósito. Por lo que es importante la modelación conjunta de la masa de relave con el acuífero subyacente.

Por otro lado, los sistemas estudiados presentan complejas geometrías en 3 dimensiones. La topografía presenta un grado de complejidad y que, sumado a la evolución del depósito, se definen contactos complejos entre ambos sistemas.

Además, existen otros procesos que ocurren en las direcciones principales del modelo. Por un lado, la segregación, producto del escurrimiento del relave al momento de ser depositado, donde se esperan encontrar diferentes tamaños de partícula a diferentes distancias de la descarga. Y por otro lado, en la dirección vertical ocurre el proceso de la consolidación, disminuyendo la conductividad hidráulica a medida que aumenta la profundidad.

Por lo tanto, los enfoques 3D permiten una estimación del flujo total, considerando la complejidad de la topografía y como se desarrolla el contacto entre el terreno natural y el relave. Además, se evitan los supuestos que son necesarios incorporar en los modelos 2D, por ejemplo, la elección de anchos representativos de los perfiles del código SEEP/W.

2.5. Hipótesis del trabajo de investigación

Como se ha revisado en los diferentes proyectos, en la práctica se utilizan distintas formas para representar el depósito de relaves. Entre las metodologías que buscan representar el depósito mediante la activación de capas, se pueden observar modelos que utilizan una mayor cantidad de etapas y otros que utilizan una menor cantidad. Debido a lo anterior, una de las principales incógnitas es ¿cuánto afecta en la estimación de infiltración la cantidad de etapas que se consideran en la representación numérica del relave?. Y si es posible, buscar alguna metodología que permita mejorar la representación discreta en etapas y acercar la evolución del depósito a una condición continua.

Por otro lado, tanto las propiedades del relave, como las del sistema hidrogeológico subyacente y su interacción hidráulica, debiesen ser factores relevantes en el flujo de infiltración resultante.

Por estas razones, resulta relevante una evaluación en la forma de representar explícitamente el depósito de relaves en un modelo 3D, y comparar el peso relativo que dicha forma de representación puede tener en comparación con el rol de parámetros hidráulicos clave, para determinar finalmente una estimación del flujo infiltrado.

Capítulo 3

Metodología

En esta sección se presenta la metodología del trabajo de memoria. Los puntos desarrollados durante el trabajo siguen el siguiente orden:

- Selección sitios para los depósitos genéricos.
- Desarrollo de los modelos conceptuales del sistema hidrogeológico y del depósito de relaves.
- Desarrollo de los modelos numéricos.
- Modelación de los casos a analizar.

Siguiendo esta estructura, en primer lugar se seleccionaron dos sitios representativos para depósitos de relaves. Con el fin de evitar asociar el análisis a un proyecto específico existente, y mantener generalidad en las conclusiones, estos sitios se han seleccionado en lugares en los que no se tienen antecedentes de estar asociados a algún proyecto minero. Por ende, el criterio de selección es exclusivamente en función de la similitud geomorfológica con los tipos de depósito que se desea estudiar, los cuales son sobre el eje de un valle y en una planicie sedimentaria, presentando las características hidrogeológicas generales revisados en el capítulo anterior.

En segundo lugar, se desarrollaron los modelos conceptuales hidrogeológicos para cada sitio. Los modelos conceptuales se construyen a partir de información general y supuestos, esto debido a que se busca representar casos generales y no específicos, y posteriormente evaluar la importancia de diferentes parámetros mediante el modelo numérico. Para ambos modelos, se definen los límites del acuífero, las unidades hidrogeológicas, recarga superficial, piezometría y las entradas y salidas de flujo. Hay que tener en cuenta que no se dispone de observaciones sobre la profundidad del agua, por lo que la definición de la piezometría es la obtenida por el modelo numérico en estado estacionario, previo a la operación del depósito.

Además, se caracterizó la evolución espacial del relave en función de la tasa nominal y la pendiente de depositación, obtenidas de la revisión bibliográfica. La evolución del depósito sobre el terreno natural se obtuvieron utilizando el software Civil3D, en el cual es posible calcular volúmenes entre dos superficies (relave y terreno) y trazar el contacto entre el relave y el sistema hidrogeológico. Por otro lado, se definieron las características hidrogeológicas

del relave, entre ellos la conductividad hidráulica, porosidad drenable y almacenamiento específico.

Posteriormente se construyeron los modelos numéricos asociados a cada caso utilizando el código FEFLOW 7.1. La elección del código se debe principalmente a que todas las herramientas que ofrece están incorporadas nativamente en la interfaz del programa sin tener que recurrir al uso de paquetes, que es el caso de MODFLOW-USG.

Para el posterior análisis, en cada etapa de crecimiento del relave se asignaron selecciones de nodos que representen las 3 entradas de flujo al sistema, que son la infiltración al relave desde la zona sin laguna, la infiltración al relave desde la zona cubierta por la laguna y la infiltración de la laguna hacia el sistema hidrogeológico. De esta forma, el flujo de entrada total se separa en estas 3 componentes. Además, se definieron superficies de control entre el volumen que ocupa el relave en el modelo y el sistema hidrogeológico subyacente. La superficie de control registra la interacción entre estos dos sistemas en términos de flujos, obteniendo la infiltración desde el depósito.

Con los modelos numéricos listos, se realizaron las simulaciones de los dos modelos sin considerar la operación del depósito para obtener la condición inicial de la piezometría del sistema, en estado estacionario. Esta se logra al momento en que las cargas hidráulicas del sistema no presentan cambios en el tiempo y la variación del almacenamiento es nulo.

Luego, se procede a la simulación de cada modelo considerando la operación del depósito. Inicialmente, se desarrollaron las evaluaciones del efecto de la representación del depósito en etapas en la magnitud del flujo de infiltración, utilizando un horizonte de 1 año de crecimiento. Con las conclusiones obtenidas de este análisis inicial, se simula el periodo total de operación del depósito y se desarrollan los análisis orientados a determinar la importancia de parámetros hidráulicos tanto del relave como del suelo en el flujo infiltrado.

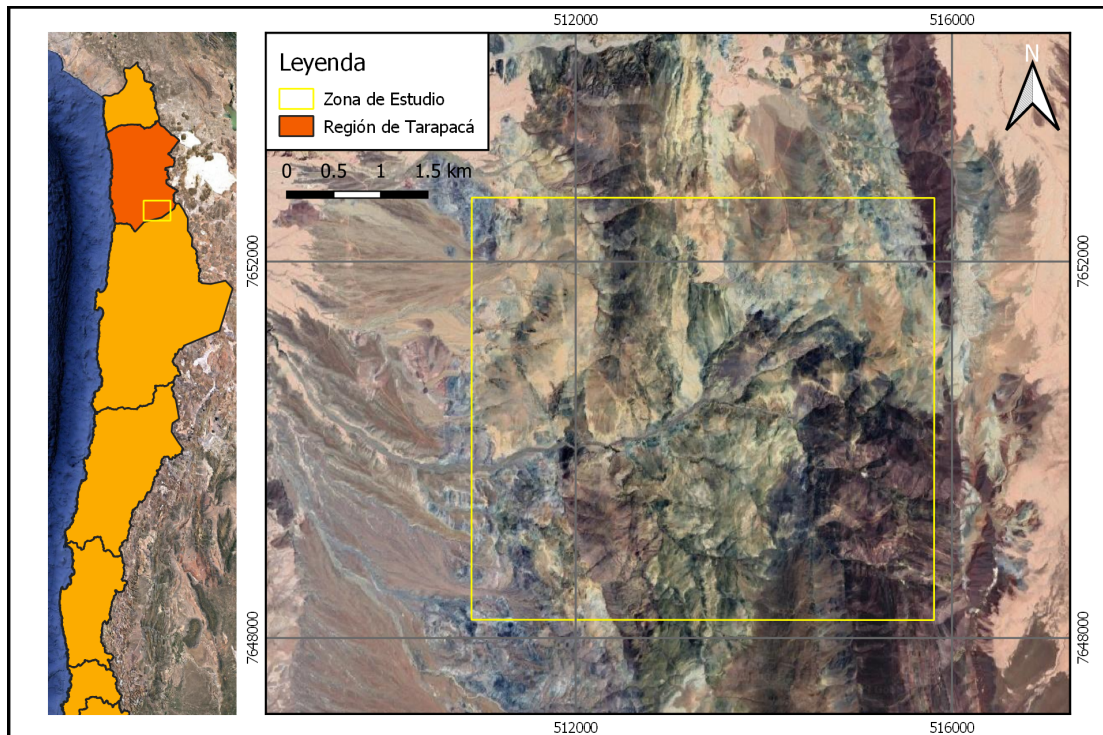
Finalmente, se presentan las principales conclusiones del análisis de la memoria con respecto a los objetivos planteados.

Capítulo 4

Construcción Modelos Conceptuales

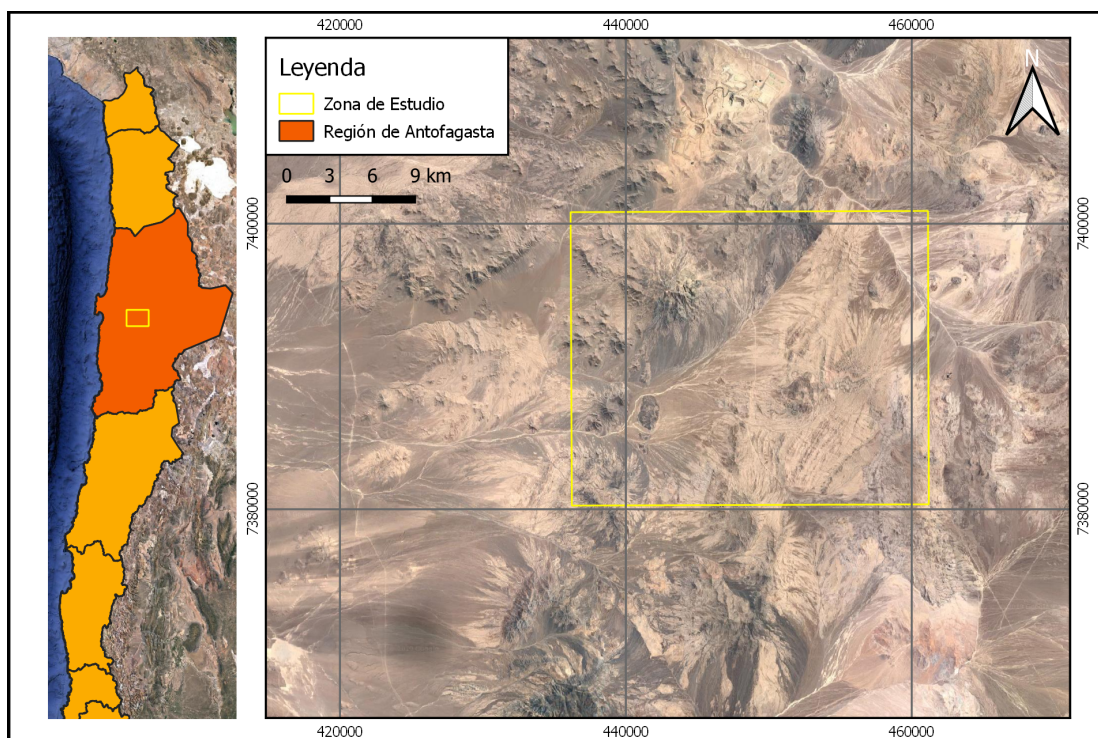
4.1. Ubicación zonas de estudio

Las dos zonas seleccionadas para el desarrollo de los modelos conceptuales y posteriores modelos numéricos son presentadas en las Figuras 4.1 y 4.2, donde la primera corresponde a un sector de la precordillera de la región de Tarapacá, a 170 km al este de la ciudad de Iquique, cuya topografía corresponde a un valle angosto marcado por la presencia principal de roca. La segunda figura corresponde a una zona más plana (planicie) en la región de Antofagasta, a 95 km al este de la ciudad de Antofagasta, donde hay presencia importante de suelo aluvial.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.1: Ubicación zona estudio depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.2: Ubicación zona estudio depósito en planicie.

4.2. Descripción depósitos de relaves

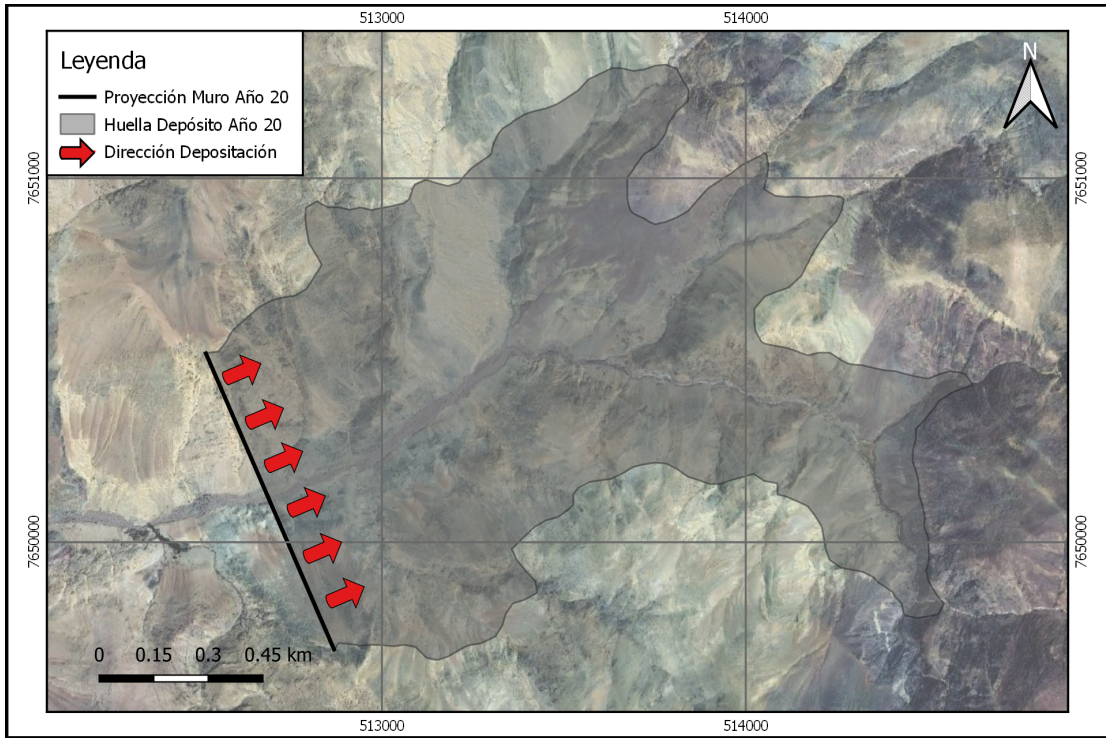
4.2.1. Operación y crecimiento del depósito de relaves

Para definir las características del crecimiento del depósito, se consideran como referencia los valores presentados en la Tabla 2.2, obtenida a partir de datos de operaciones mineras en Chile. De estos valores, se supone un valor para la tasa nominal y para la pendiente de depositación. Además, se asume que los puntos de descarga de relave se ubican a lo largo del muro, y por ende, la cota del relave desciende desde el muro hacia aguas arriba. La Tabla 4.1 presenta los valores supuestos para definir la operación del depósito y las Figuras 4.6 y 4.7 presentan la proyección del muro, la huella del relave al final de la operación y la dirección de la depositación.

Tabla 4.1: Valores de operación para los depósitos de relaves.

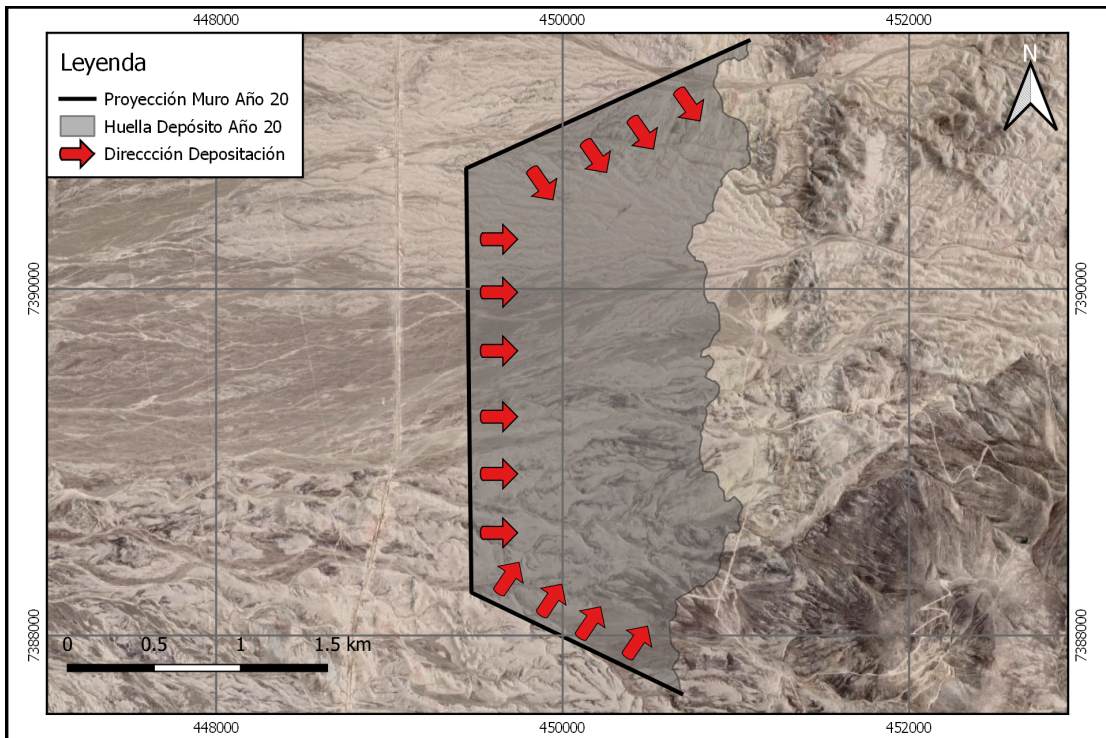
Parámetro	Unidad	Valor
Tasa nominal descarga	ton/día	30.000
Pendiente depositación	%	0,3
Tiempo operación	años	20

Los supuestos adoptados para el plan de crecimiento no son estrictamente relevantes para el análisis que se desarrolla en la memoria y sólo buscan facilitar una estimación del crecimiento del depósito.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.3: Depositación de relave, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.4: Depositación de relave, depósito en planicie.

La Figura 4.5 presenta las curvas volumen-altura muro para cada depósito y las ecuaciones que definen el ajuste polinomial de la curva. Estas curvas se obtienen de calcular el volumen entre la superficie definida por el relave a una altura determinada del muro y la topografía del terreno.

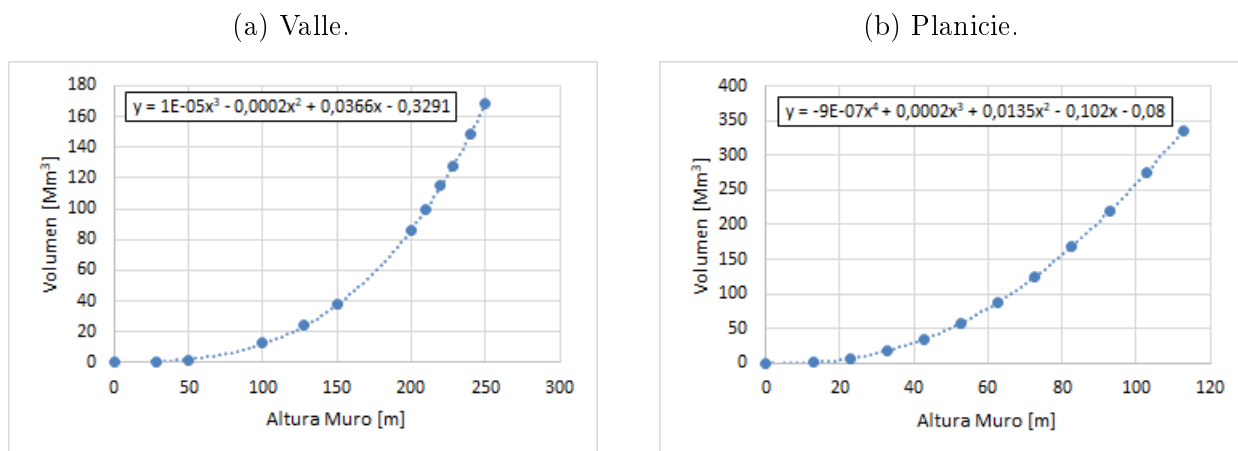


Figura 4.5: Relación volumen-altura muro para los depósitos de relaves.

La máxima superficie y altura que alcanzan ambos depósitos, en el año 20, se presenta en la Tabla 4.2. Estos valores se encuentran dentro de los valores extremos observados en depósitos de relaves evaluados en Chile (Tabla 2.2).

Tabla 4.2: Características geométricas de cada depósito.

Depósito	Altura muro [m]	Superficie Final [há]
Valle	235	178
Planicie	76	432

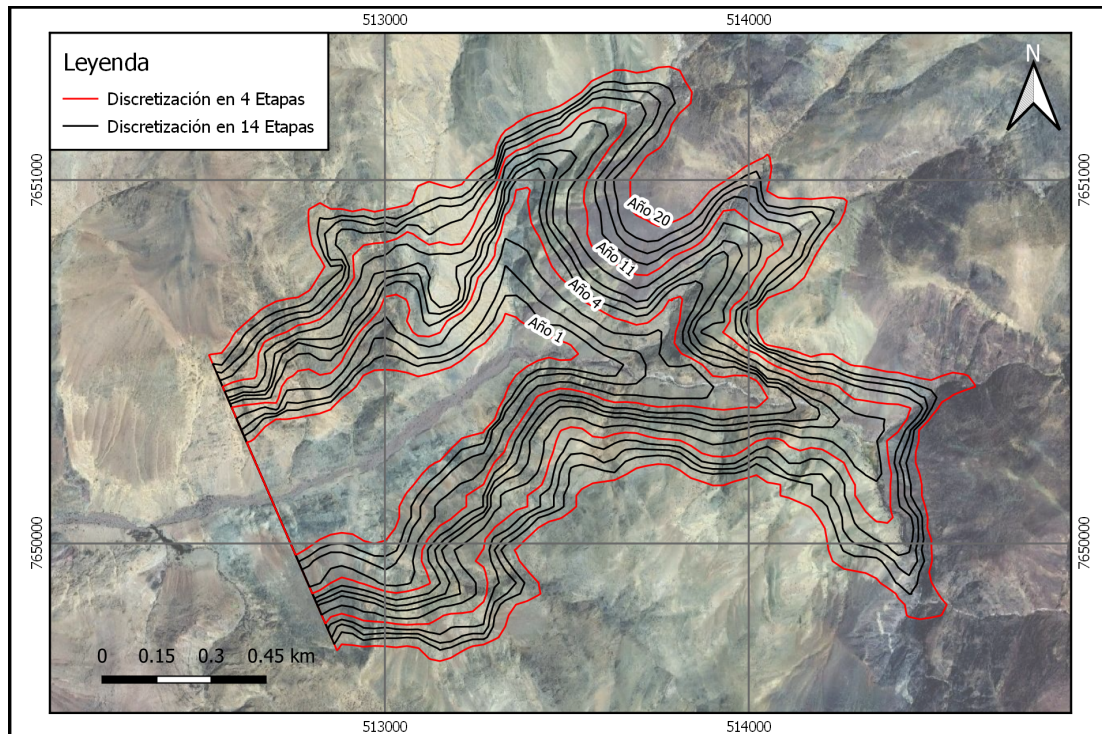
4.2.2. Discretización por etapas depósitos de relaves

La cantidad de etapas discretas para representar el crecimiento del relave se definen en modo de analizar la influencia de la discretización sobre el flujo de infiltración. De esta forma, se definen 2 casos con diferente cantidad de etapas. En el primero, el relave se discretiza considerando aproximadamente una etapa por año, verificando que exista un equiespaciamiento adecuado de las huellas de cada año para una vista en planta. El segundo caso considera solo 4 etapas, también con huellas equiespaciadas hasta la etapa final.

Considerando los casos descritos, para cada depósito se definen los siguientes años en la discretización por etapas:

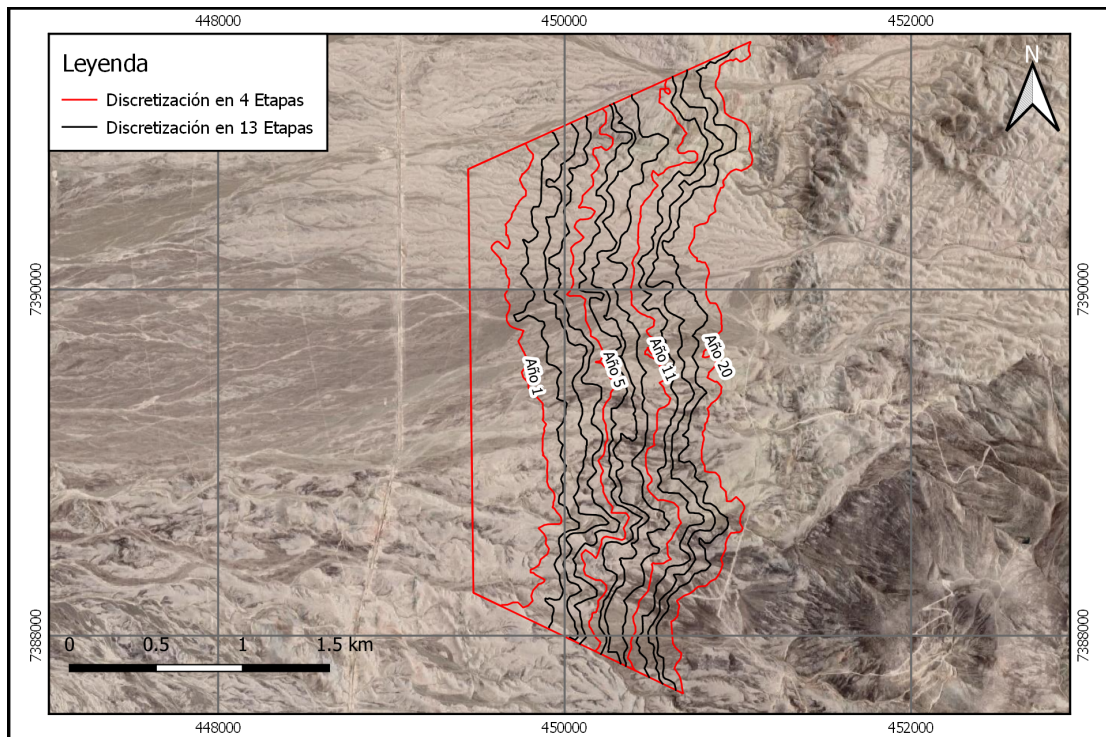
- Valle
 - 14 etapas: Años 1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 20.
 - 4 etapas: Años 1, 4, 11 y 20.
- Planicie
 - 13 etapas: Años 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 20.
 - 4 etapas: Años 1, 5, 11 y 20.

Las Figuras 4.6 y 4.7 presentan la huella del relave para cada una de las etapas. La líneas rojas corresponden a las 4 etapas definidas en cada modelo.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.6: Crecimiento por etapas, depósito en valle.



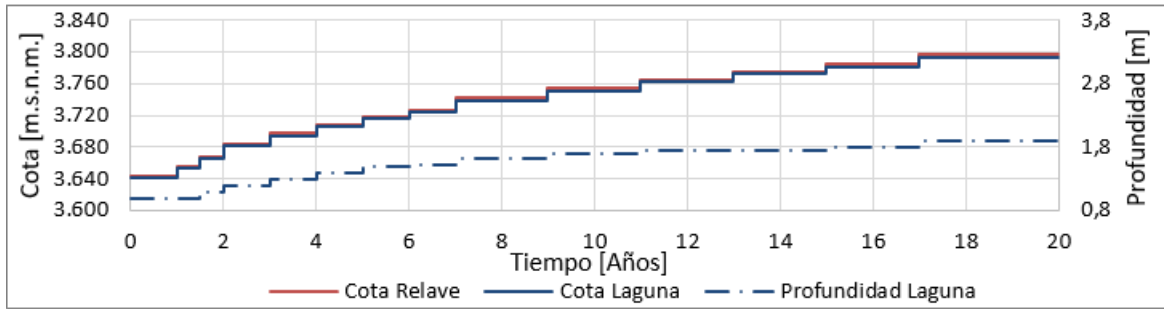
Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.7: Crecimiento por etapas, depósito en planicie.

Por otro lado, también es necesario definir la cota del espejo de la laguna para cada etapa del depósito. Para definir la laguna se considera, en cada etapa, el supuesto de que esta cubre un porcentaje determinado de la diferencia entre la cota máxima y mínima del relave. El porcentaje utilizado para el depósito en valle corresponde al 33 % y para el caso del depósito en planicie corresponde al 20 %, de la diferencia entre las cotas. Este valor determina así la profundidad y la cota de la laguna para cada etapa de crecimiento. Los detalles para cada etapa se presentan en el Anexo B. De este modo, la máxima profundidad de la laguna alcanzada en el año 20 corresponde a 1,9 metros para el depósito en valle y 0,9 metros para el depósito en planicie.

Cada una de las características obtenidas para el relave, como también para la laguna, son representativas durante todo el periodo que defina la etapa. De esta forma, se obtiene una evolución escalonada de las propiedades geométricas del depósito. Las Figuras 4.8 y 4.9 presentan la evolución de las cota máxima del depósito y de la laguna, además de la profundidad de esta, para los dos casos.

(a) 14 etapas.



(b) 4 etapas.

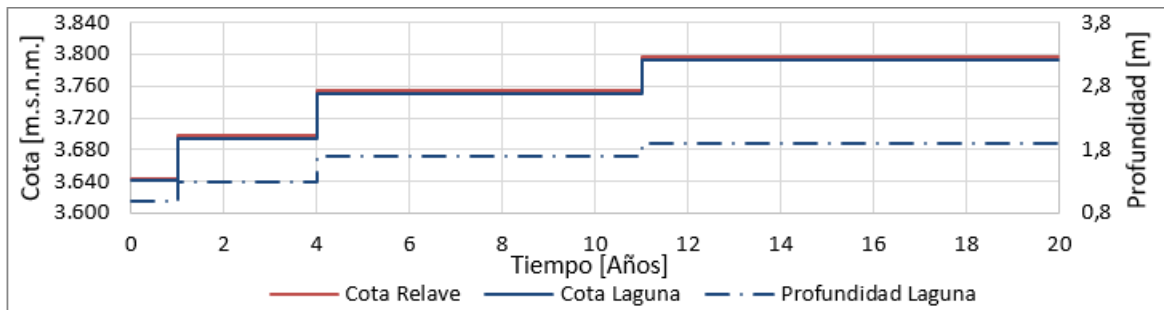
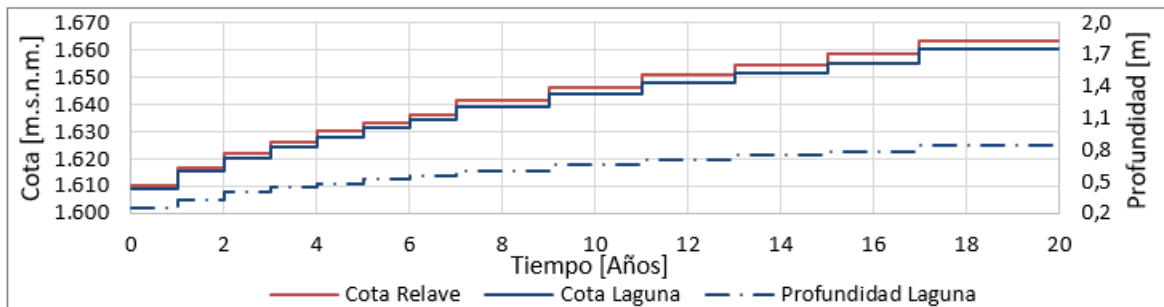


Figura 4.8: Cota máxima del relave, cota de la laguna y profundidad discretizado en etapas, depósito en valle.

(a) 13 etapas.



(b) 4 etapas.

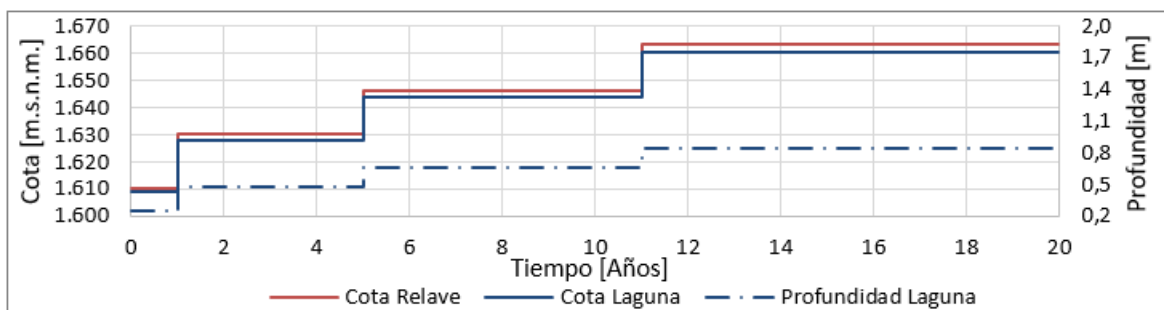


Figura 4.9: Cota máxima del relave, cota de la laguna y profundidad discretizado en etapas, depósito en planicie.

4.2.3. Crecimiento del relave dentro de una etapa

Además de representar el crecimiento del depósito mediante la discretización en etapas, donde las propiedades hidráulicas se mantienen constantes dentro del periodo, se define otra metodología de representación donde se busca incorporar el crecimiento del relave dentro de la etapa mediante la variación de las propiedades hidráulicas.

Para explicar el concepto que justifica la representación del crecimiento del relave, mediante una variación de las propiedades hidráulicas en el tiempo, específicamente de la conductividad hidráulica, se utiliza como ejemplo el caso en el que no existen controles hidrogeológicos al flujo de infiltración desde el relave, y por lo tanto este ocurre en condiciones de drenaje libre. Posteriormente se analiza lo que ocurre cuando se libera esta condición.

El relave se asume completamente saturado, pero sin carga en su superficie. En estas condiciones, el flujo vertical de infiltración desde el relave, está dado por la ley de Darcy:

$$Q(t) = K_0 \cdot i \cdot A(t) \quad (4.1)$$

donde K_0 representa el valor de la conductividad hidráulica vertical en condiciones saturadas del relave, i es el gradiente hidráulico y $A(t)$ el área superficial del relave que va continuamente cambiando en el tiempo. El área al ser una función continua, se puede reemplazar por el producto entre el valor final del área A_f para la etapa de análisis, y una función o factor de forma $f(t)$, que varía entre 0 y 1. La Figura 4.10 muestra el concepto asociado a este reemplazo.

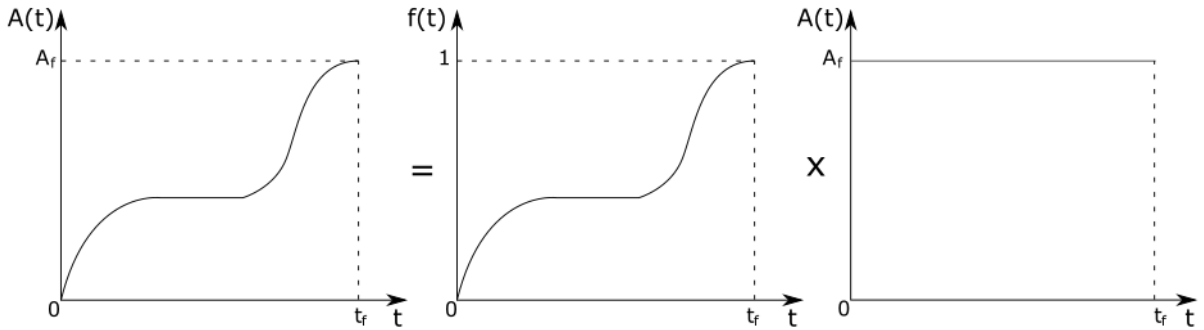


Figura 4.10: Representación concepto función o factor de forma $f(t)$.

Reemplazando en la ecuación de Darcy, se obtiene:

$$Q(t) = K_0 \cdot i \cdot A_f \cdot f(t) \quad (4.2)$$

$$Q(t) = K_0 \cdot f(t) \cdot i \cdot A_f \quad (4.3)$$

$$Q(t) = K(t) \cdot i \cdot A_f \quad (4.4)$$

Así la Ley de Darcy permite que el rol del área y de la conductividad hidráulica sean intercambiables, para la determinación del flujo de infiltración. De esta forma, la evolución temporal del área puede ser representada alternativamente, mediante una evolución de la

conductividad hidráulica. El gradiente hidráulico vertical es siempre un resultado de las interacciones entre el relave y el sistema hidrogeológico subyacente. De esto se desprenden dos conclusiones relevantes:

- Las herramientas actuales disponibles en los software o códigos de simulación, permiten representar propiedades variables de los materiales. Esto es más simple que representar una variación geométrica continua de la malla de cálculo que representa al depósito.
- La presencia del gradiente hidráulico en la ecuación destaca que la interacción entre el relave y el sistema hidrogeológico subyacente es crucial, y por lo tanto es necesario representar explícitamente el relave en el modelo numérico, si es que el sistema hidrogeológico puede ejercer un control sobre el flujo de infiltración.

Así, es posible inferir que sólo en el caso en el que el gradiente hidráulico vertical no está determinado por la configuración hidrogeológica (geometría y propiedades hidráulicas) del sistema subyacente al depósito, es posible omitir la representación explícita del relave como unidad y reemplazarla por un flujo de recarga. Un ejemplo de este caso podría ser aquel en el que el domo de agua infiltrada no alcanza el fondo del relave. De cualquier forma, esta situación es difícil de anticipar antes de ejecutar el modelo, puesto que depende de la geometría tridimensional del sistema subyacente. Lo anterior es una razón, además, para preferir la representación tridimensional del relave frente a una que utiliza múltiples perfiles 2D. La desventaja de este tipo de perfiles, es que restringe al flujo vertical a moverse a lo largo del mismo perfil que se simula y posteriormente definir un ancho representativo de cada perfil para integrar un flujo de infiltración en toda el área del relave.

Por otro lado, cualquier variación temporal del gradiente hidráulico vertical, debido a cualquier efecto externo, puede ser incorporada a la ecuación de Darcy sin afectar la validez del intercambio de roles en términos de evolución temporal que ocurre entre el área y la conductividad. En esta condición, el único cambio en la ley de Darcy es que el gradiente pasa de ser constante, a ser una función del tiempo.

Finalmente, la representación de otros cambios temporales de la conductividad (por ejemplo, por efecto de la consolidación) pueden agregarse a la variación temporal de la conductividad hidráulica, sin pérdida de aplicabilidad del concepto de equivalencia entre el rol de esta y del área. Sin embargo, en el caso de la consolidación es importante incluir también el efecto del cambio temporal de la porosidad, análisis que está fuera de los alcances de esta memoria.

La Figura 4.11 muestra de forma gráfica el intercambio de la evolución temporal del área del relave por la evolución de la conductividad hidráulica.

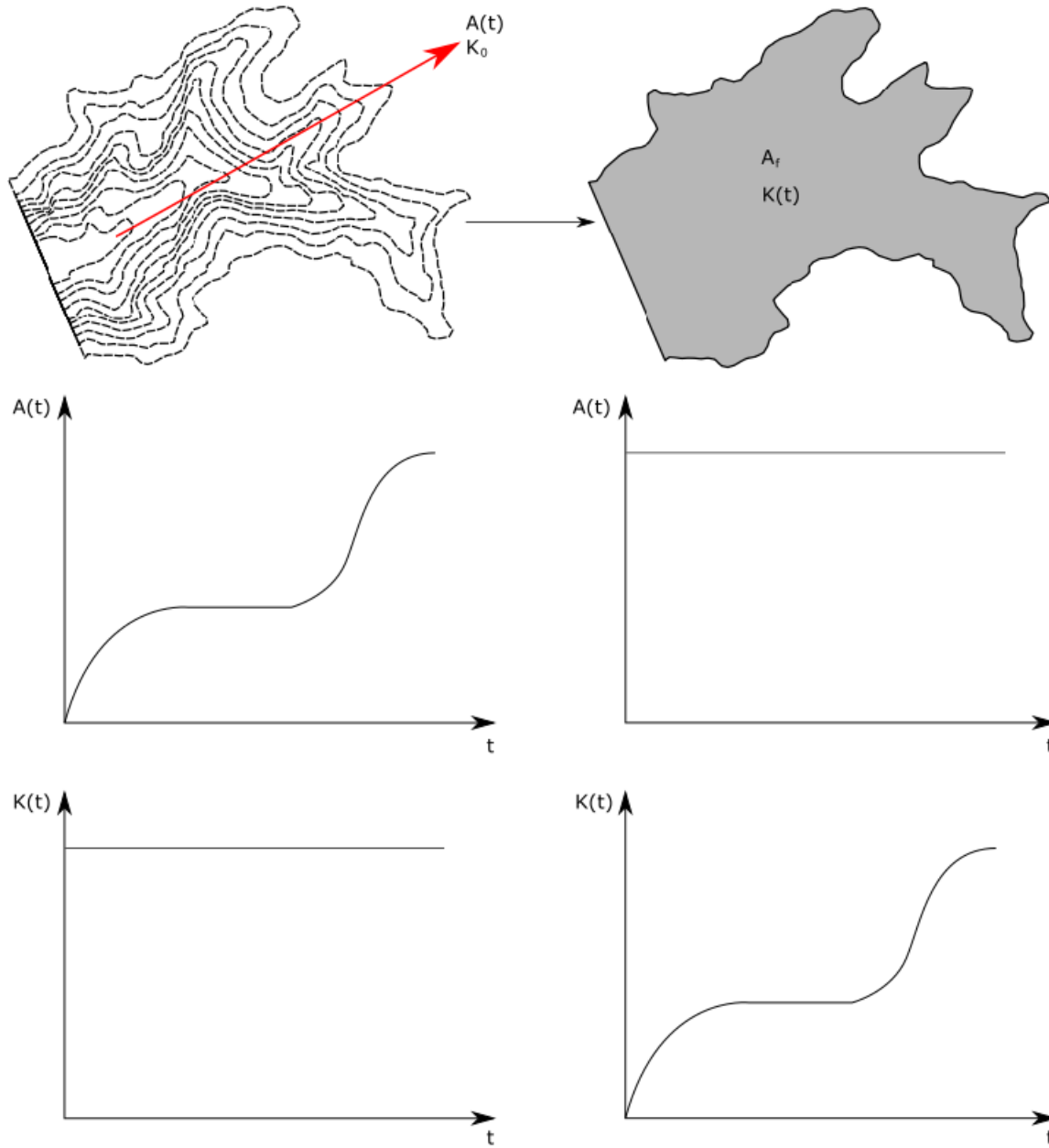


Figura 4.11: Representación evolución del depósito utilizando la variación de la conductividad en el tiempo.

Suponiendo que las etapas discretas del depósito se eligen de forma que se puede asumir una variación lineal del área, se tiene que la variación equivalente de la conductividad hidráulica puede establecerse con la misma forma. En este aspecto, es importante reconocer que un valor inicial de la conductividad hidráulica igual a cero podría generar inestabilidades numéricas y por lo tanto conviene analizar un valor inicial suficientemente pequeño respecto del valor de la conductividad hidráulica saturada que se utilizará en el modelo numérico al final de la etapa. En principio, se definirá un valor inicial igual al 1% de la conductividad hidráulica saturada aplicado sobre el diferencial del área que se agrega en cada etapa. Se evaluará posteriormente la influencia de este criterio en la magnitud del flujo infiltrado con el modelo numérico.

4.2.4. Propiedades hidrogeológicas de los relaves

Los valores de las propiedades hidrogeológicas utilizadas para la caracterización del relave de ambos depósitos, son extraídas de los estudios revisados en la bibliografía, presentados en la Tabla 2.3.

El valor de la conductividad hidráulica utilizado es 10^{-8} m/s, valor definido en los modelos de Ladera Sur (Golder, 2016a), Quebrada Blanca 2 (Golder, 2016b) y Pampa Pabellón (Arcadis, 2018). Para esta memoria no se considera los procesos de consolidación o segregación del relave, por lo que no se representa el descenso o sectorización de la conductividad hidráulica durante todo el periodo de operación. Además, se supone que la porosidad drenable del depósito es igual al 50 %, valor dentro del rango de porosidades utilizadas en los estudios. El valor supuesto para el coeficiente de almacenamiento específico es 10^{-4} m⁻¹, valor suficientemente bajo para que la variación del almacenamiento por efectos de la compresibilidad de la matriz y del agua no sea comparable frente a la variación debido al drenaje. A modo de resumen, la Tabla 4.3 presenta los valores de las propiedades hidrogeológicas supuestas para el relave de ambos modelos.

Tabla 4.3: Propiedades hidrogeológicas para el relave.

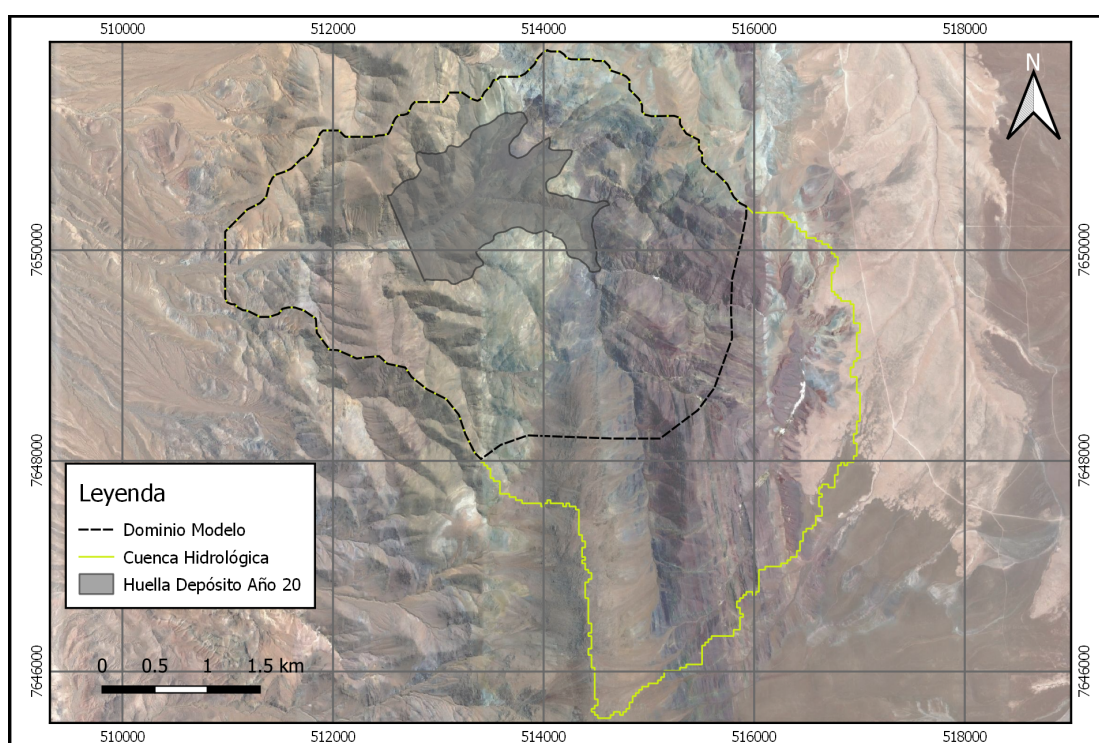
Propiedad	Unidad	Valor
K	m/s	10^{-8}
S_y	%	50
S_s	1/m	10^{-4}

Por otro lado, el relave tiene asociado una curva SWCC y su definición es importante para evaluar la desaturación del relave en la etapa de cierre, periodo que no se estudia en esta memoria. Ejemplo de curva SWCC que caracteriza la desaturación del relave es la medida por Golder (2016b) presentada en la Figura 2.3.

4.3. Definición del acuífero de interés y dominio del modelo

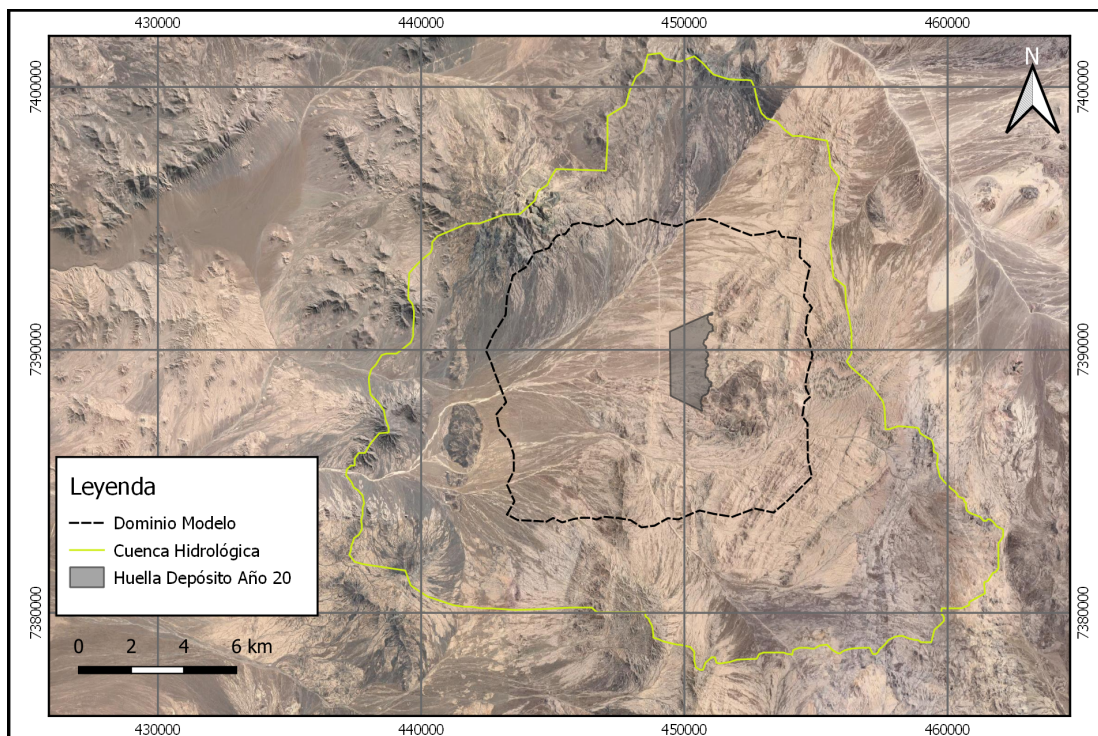
Para ambos sitios, se considera que las divisorias de agua superficiales definen los límites del acuífero de interés. En ausencia de información hidrogeológica de detalle respecto de los límites de la cuenca subterránea, este supuesto es razonable, o en su defecto, el único disponible que permite acotar la extensión del dominio del modelo. Como la cuenca hidrológica e hidrogeológica tienen una extensión considerablemente mayor al área del depósito, es posible acotar el dominio del modelo a un extracto de la cuenca.

La cuenca hidrogeológica y el dominio del modelo para ambos sitios seleccionados son presentados en las Figuras 4.12 y 4.13. Además, se agrega la huella del depósito al final de la operación.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.12: Dominio del modelo conceptual, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.13: Dominio del modelo conceptual, depósito en planicie.

4.4. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas se definen en base a las unidades geológicas identificadas en las cartas geológicas del Sernageomin de cada sector, presentados en el Anexo A. Para definir las unidades hidrogeológicas, se agrupan unidades geológicas para las que se estima propiedades hidráulicas similares, debido a la similitud de sus orígenes.

Las unidades geológicas correspondientes a roca se dividen en dos zonas con potencia y propiedades distintas en el modelo. La zona más cercana a la superficie, denominada desde ahora roca fracturada, se considera más permeable que la roca presente a mayor profundidad, denominada roca sana. El valor de la profundidad para definir la potencia de la roca fracturada es la utilizada en el modelo numérico de Quebrada Blanca desarrollado por Golder (2016b), correspondiente a 60 metros.

Para el trabajo, no se consideran las fallas regionales en el modelo, las cuales pueden ser importantes para el desarrollo de los flujos. Este supuesto se adopta con el fin de acotar el análisis a las propiedades más generales del relieve y del medio subterráneo. En los proyectos sometidos al Sistema de Evaluación Ambiental, las fallas son un elemento crucial en el análisis del destino de las infiltraciones, y en ocasiones, pueden determinar la magnitud de estas como controles hidrogeológicos. En casos en que se anticipe que los elementos estructurales pueden conformar caminos de flujo preferencial o barreras hidráulicas, las fallas debiesen ser incorporadas en el modelo conceptual y numérico.

Con los puntos anteriores, se consideran 3 unidades hidrogeológicas generales, correspondientes a los sedimentos, roca fracturada y roca sana. Dada la variedad de rocas en los modelos, se considera una zonificación por tipo de litología para la unidad de roca fracturada. Por otro lado, se supone que las propiedades de la roca sana para cada unidad geológica son iguales.

Los valores de las propiedades hidrogeológicas son elegidas a partir del rango definido en la literatura especializada, descrita en la sección 2.3. Dado que los rangos abarcan varios órdenes de magnitud, la elección de los valores son guiados por los estudios presentados en el SEIA. Además, para la unidad de sedimentos se considera anisotropía vertical con factor K_h/K_z de 10:1, proveniente del concepto de depositación en capas secuenciales y heterogéneas de este tipo de materiales.

Con las consideraciones anteriores, en las siguientes secciones se presentan las unidades hidrogeológicas para cada zona de estudio.

4.4.1. Valle

Unidad Hidrogeológica 1: Sedimentos

Esta unidad corresponde a los depósitos no consolidados ubicado en el fondo de la quebrada principal. Se componen de gravas, ripios y limos polimícticos. Tiene un espesor variable que puede alcanzar los 20 metros.

En el rango de conductividades hidráulicas, se le asigna un valor representativo de $7 \cdot 10^{-4}$ m/s. El valor adoptado para la porosidad drenable es 25%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-4} m^{-1} .

Unidad Hidrogeológica 2: Roca fracturada

-UHG2a: Arenisca

Esta unidad de roca sedimentaria corresponde a la formación Tolar ubicada al este dentro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. La porosidad drenable considerada es 2%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m^{-1} .

-UHG2b: Andesita

Esta unidad de roca ígnea corresponde a la formación Icanche ubicada al oeste dentro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-7} m/s. La porosidad drenable considerada es 1%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m^{-1} .

-UHG2c: Intrusivo

Esta unidad corresponde a intrusivos que afloran dentro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-8} m/s. La porosidad drenable considerada es 1%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m^{-1} .

-UHG2d: Caliza

Esta unidad corresponde a la secuencia de roca sedimentaria marina del jurásico que afloran en el centro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. La porosidad drenable considerada es 2%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

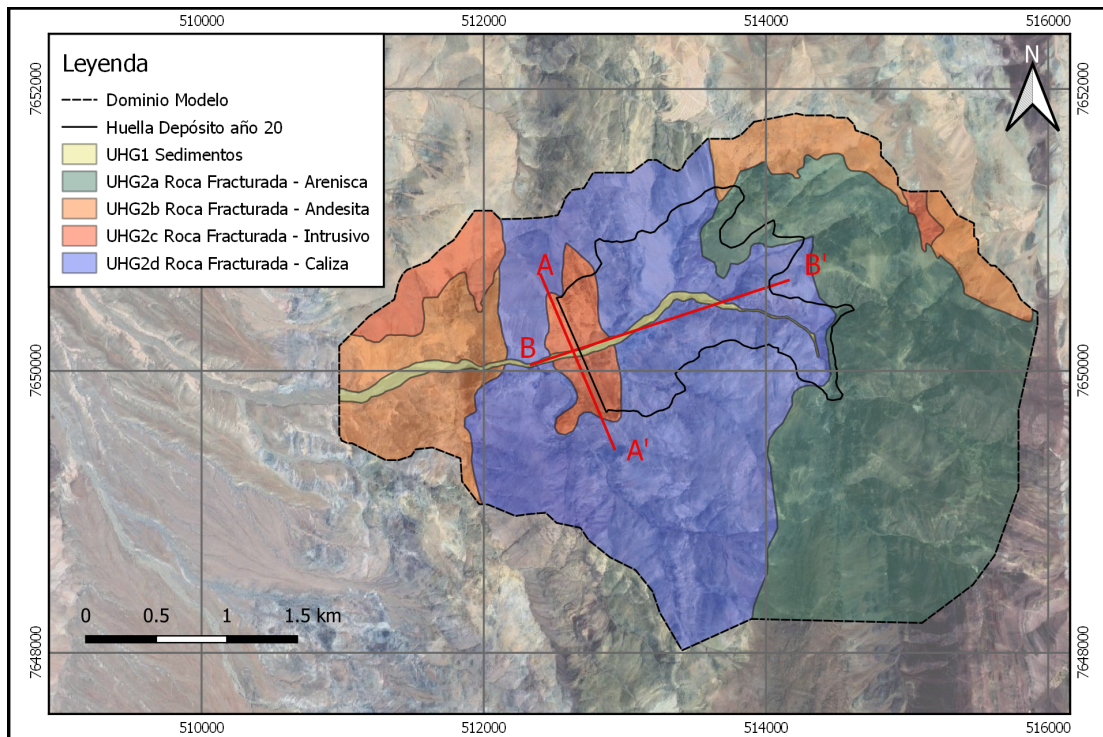
Unidad Hidrogeológica 3: Roca sana

Esta unidad agrupa la roca sana o competente del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-10} m/s. La porosidad drenable considerada es 0,1%. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 4.4 con los valores de las propiedades hidrogeológicas de cada unidad y la Figura 4.14 presenta la distribución de las unidades dentro del modelo. Las Figuras 4.15 y 4.16 ilustran la representación vertical en el modelo de las unidades hidrogeológicas cercanas al depósito.

Tabla 4.4: Propiedades hidrogeológicas, depósito en valle.

Unidad	K [m/s]	S_y [%]	S_s [1/m]
UHG1 Sedimentos	$7 \cdot 10^{-4}$	25	10^{-4}
UHG2a Roca Fracturada - Arenisca	$5 \cdot 10^{-7}$	2	10^{-7}
UHG2b Roca Fracturada - Andesita	10^{-7}	1	10^{-7}
UHG2c Roca Fracturada - Intrusivo	10^{-8}	1	10^{-7}
UHG2d Roca Fracturada - Caliza	$5 \cdot 10^{-7}$	2	10^{-7}
UHG3 Roca Sana	10^{-10}	0,1	10^{-7}



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.14: Unidades hidrogeológicas, depósito en valle.

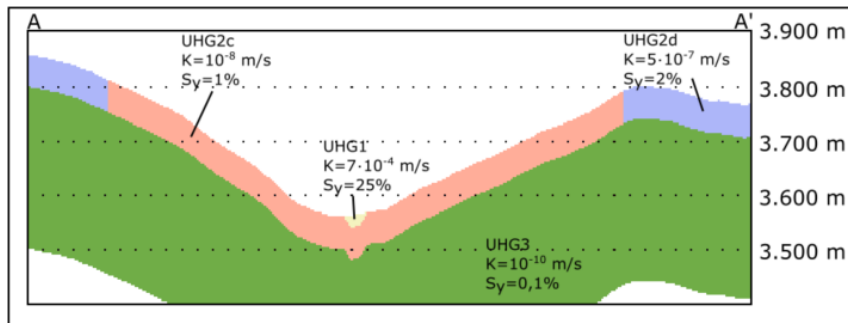


Figura 4.15: Perfil A-A', depósito en valle.

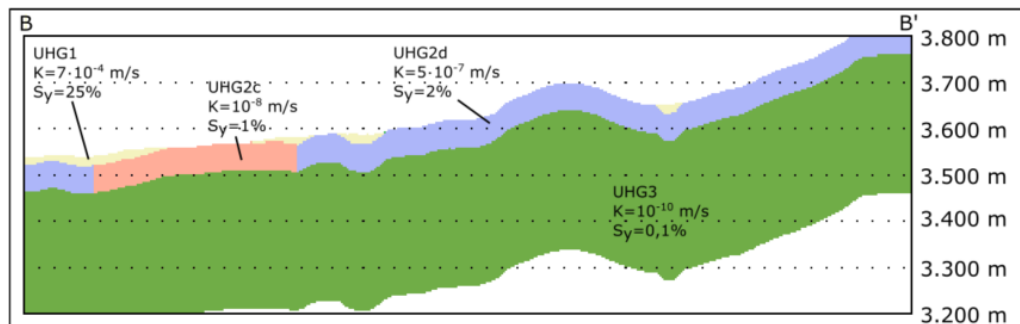


Figura 4.16: Perfil B-B', depósito en valle.

4.4.2. Planicie

Unidad Hidrogeológica 1: Sedimentos

Esta unidad corresponde a depósitos aluviales y coluviales no consolidados y semiconsolidados, cubriendo gran parte del área del modelo. Se componen de gravas, arenas, arcillas y limos. El espesor promedio de la unidad alcanza los 100 metros.

Para esta unidad se considera dos estratos: sedimentos modernos ubicados más cercanos a la superficie, cuya potencia alcanza los 20 metros en las zonas con mayor profundidad, y sedimentos antiguos, que dado el confinamiento del material por la depositación posterior de sedimentos, se encuentran con mayor consolidación.

-UHG1a: Modernos

La conductividad hidráulica representativa es $2 \cdot 10^{-5}$ m/s. La porosidad drenable considerada es 25 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-4} m⁻¹.

-UHG1b: Antiguos

La conductividad hidráulica representativa es $5 \cdot 10^{-7}$ m/s. La porosidad drenable considerada es 25 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-4} m⁻¹.

Unidad Hidrogeológica 2: Roca fracturada

-UHG2a: Arenisca

Esta unidad corresponden a areniscas calcáreas del Jurásico ubicada al este dentro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-8} m/s. La porosidad drenable considerada es 2 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

-UHG2b: Volcánica

Esta unidad de roca ígnea corresponde a la secuencia volcanosedimentaria ubicada al oeste del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-8} m/s. La porosidad drenable considerada es 1 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

-UHG2c: Intrusivo

Esta unidad corresponde a los intrusivos que afloran dentro del dominio del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-8} m/s. La porosidad drenable considerada es 1 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

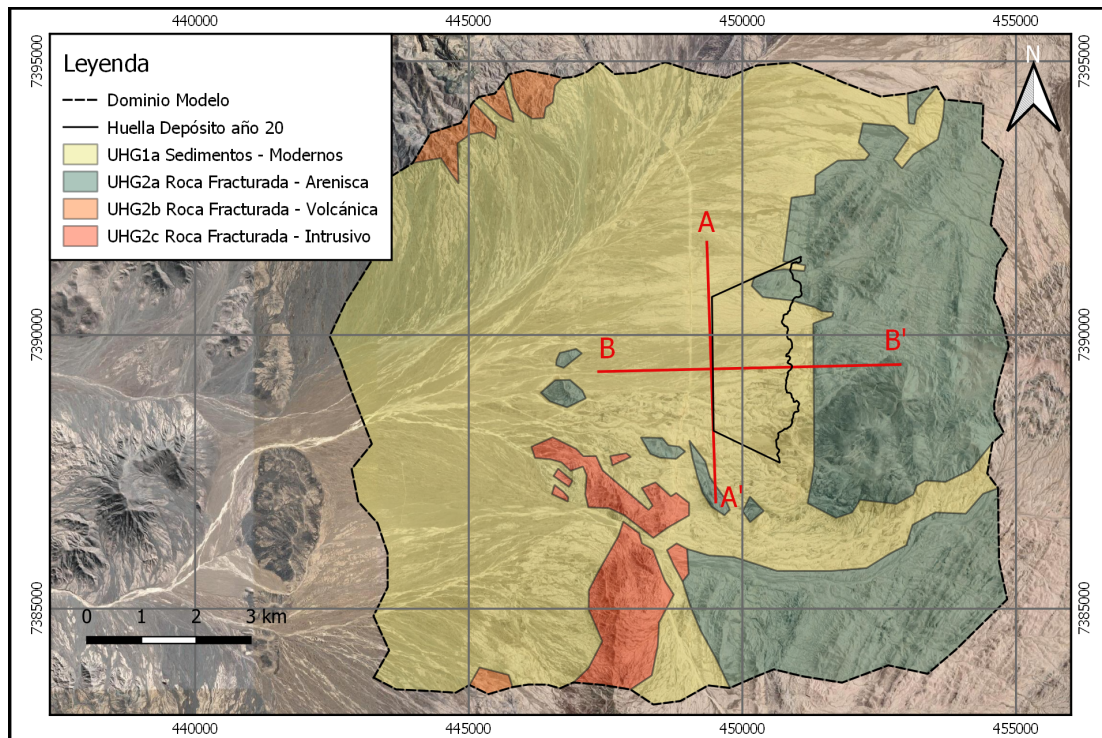
Unidad Hidrogeológica 3: Roca sana

Esta unidad agrupa la roca sana o competente del modelo. La conductividad hidráulica representativa es 10^{-11} m/s. La porosidad drenable considerada es 0,1 %. El coeficiente de almacenamiento específico se considera de 10^{-7} m⁻¹.

A modo de resumen, se presenta la Tabla 4.5 con los valores de las propiedades hidrogeológicas de cada unidad y la Figura 4.17 presenta la distribución de las unidades dentro del modelo. Las Figuras 4.18 y 4.19 ilustran la representación vertical en el modelo de las unidades hidrogeológicas cercanas al depósito.

Tabla 4.5: Propiedades hidrogeológicas, depósito en planicie.

Unidad	K [m/s]	S_y [%]	S_s [1/m]
UHG1a Sedimentos - Modernos	$2 \cdot 10^{-5}$	25	10^{-4}
UHG1b Sedimentos - Antiguos	$5 \cdot 10^{-7}$	25	10^{-4}
UHG2a Roca Fracturada - Arenisca	10^{-8}	2	10^{-7}
UHG2b Roca Fracturada - Volcánica	10^{-8}	1	10^{-7}
UHG2c Roca Fracturada - Intrusivo	10^{-8}	1	10^{-7}
UHG3 Roca Sana	10^{-11}	0,1	10^{-7}



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.17: Dominio del modelo hidrogeológico, depósito en planicie.

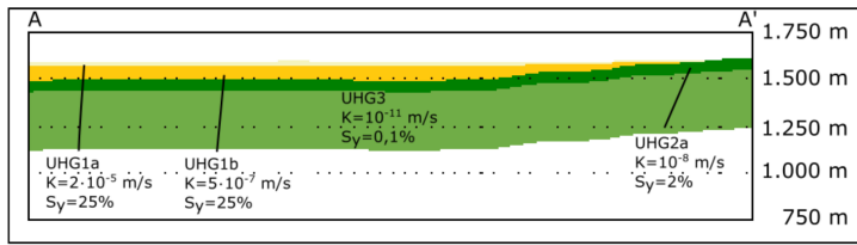


Figura 4.18: Perfil A-A', depósito en planicie.

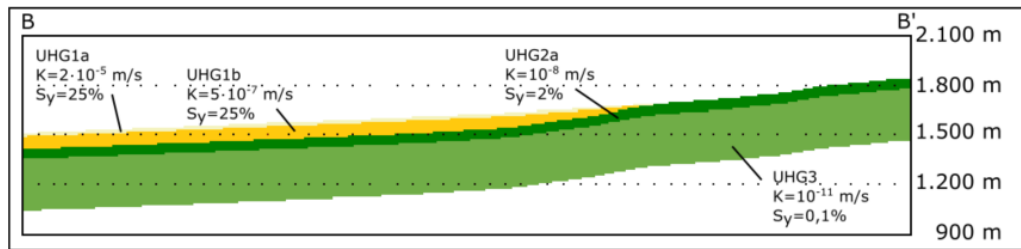


Figura 4.19: Perfil B-B', depósito en planicie.

4.5. Descripción de entradas y salidas de agua en los modelos

4.5.1. Precipitación media anual

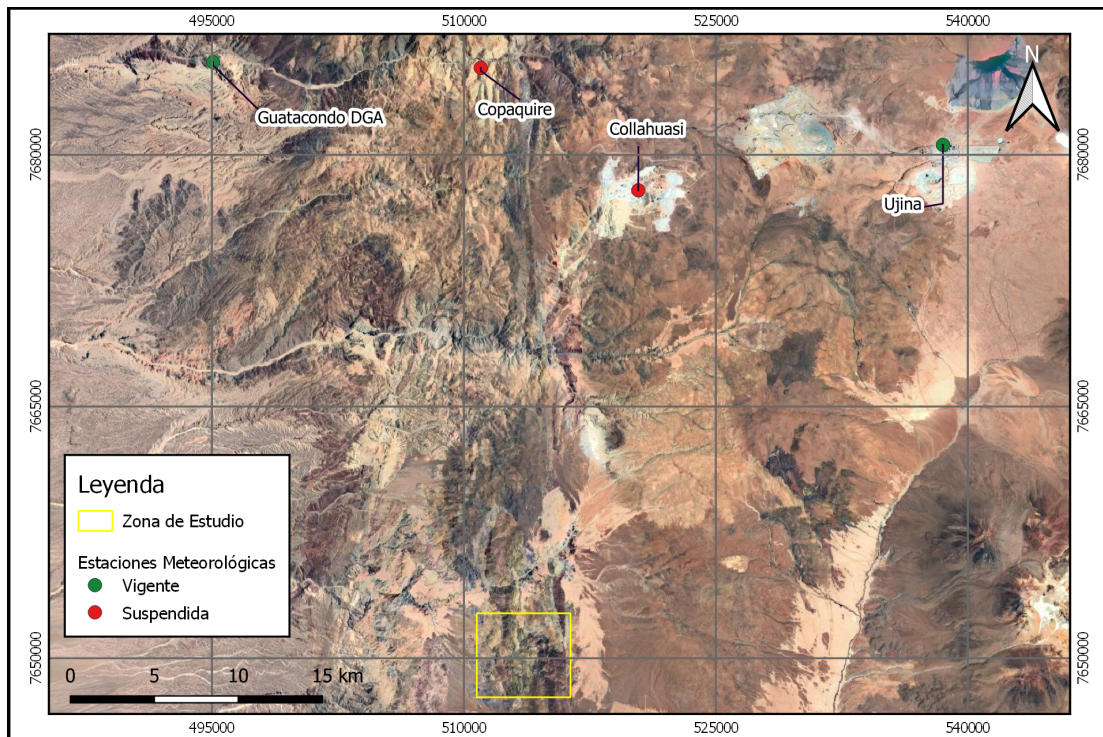
Los datos de precipitación se extraen de los registros históricos de las estaciones pluviométricas de la DGA. En ambas zonas no se disponen de estaciones dentro de la cuenca pero se utilizan estaciones cercanas que pueden ser representativas para obtener el gradiente de precipitación.

Valle

Al norte de la ubicación del valle (28 km aproximadamente), se encuentran 4 estaciones meteorológicas, de las cuales dos se encuentran vigentes (Figura 4.20). A pesar de tener dos estaciones suspendidas, se considera que la extensión del registro en ambas es suficiente para utilizarlas en el cálculo del gradiente de precipitación. Las estaciones, altura, el periodo con registro de precipitaciones y la precipitación media anual calculada se presenta en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Descripción de las estaciones y registro de datos, depósito en valle.

Estación	Altura [m.s.n.m.]	Periodo registro	Pp media anual [mm]
Guatacondo	2.460	1977-2018	21,02
Copaquire	3.540	1977-2012	77,75
Collahuasi	4.250	1972-1991	141,81
Ujina	4.300	1975-2014	146,57



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.20: Ubicación estaciones meteorológicas, depósito en valle.

Utilizando la precipitación media anual y la altura de las estaciones, se obtiene el siguiente gradiente de precipitaciones para el modelo (Figura 4.21).

$$P_p \text{ media anual [mm]} = 0,069 \cdot z - 152,78 \quad (4.5)$$

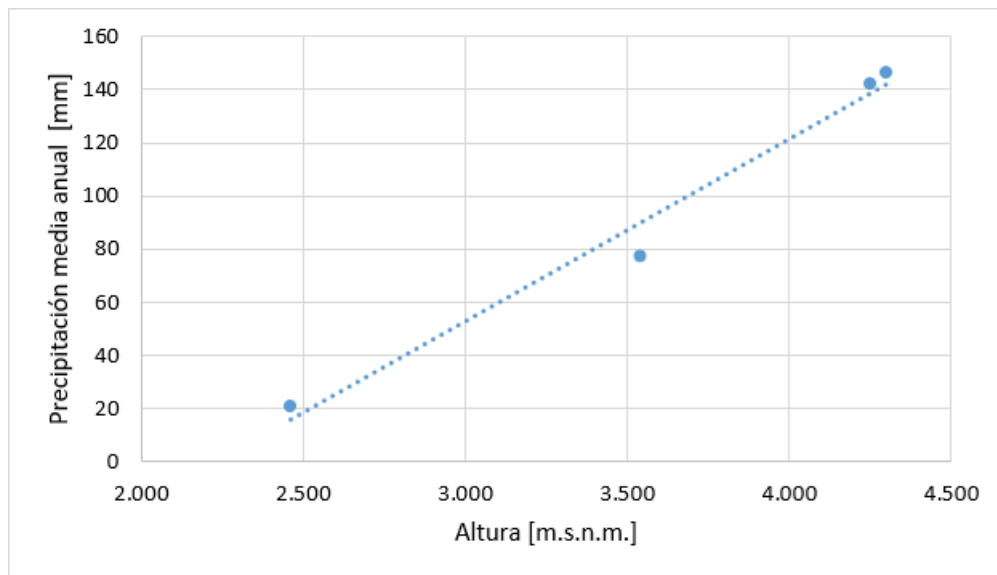


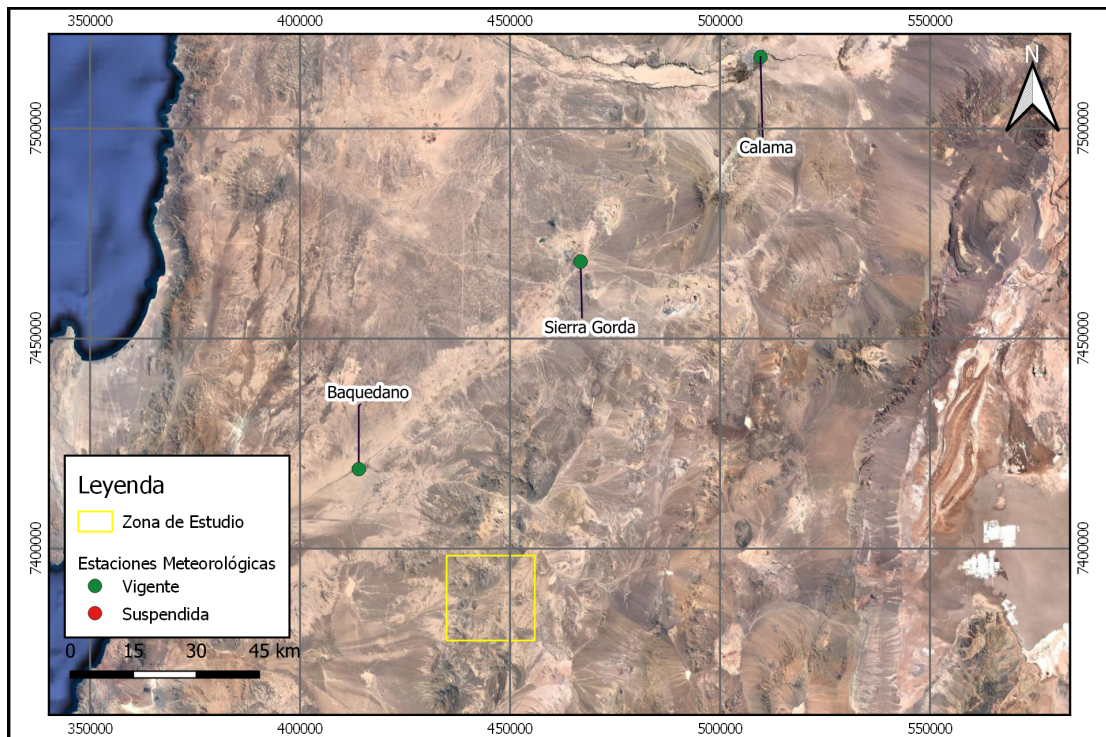
Figura 4.21: Gradiente de precipitación media anual, depósito en valle.

Planicie

Al norte de la ubicación de la planicie, se encuentran 3 estaciones meteorológicas vigentes (Figura 4.22). Las estaciones, altura, el periodo con registro de precipitaciones y la precipitación media anual calculada se presenta en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Descripción de las estaciones y registro de datos, depósito en planicie.

Estación	Altura [m.s.n.m.]	Periodo registro	Pp media anual [mm]
Baquedano	1.032	1978-2018	2,32
Sierra Gorda	1.616	1994-2018	1,22
Calama	2.306	1999-2018	1,92



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.22: Ubicación estaciones meteorológicas, depósito en planicie.

Para este caso no se observa una relación clara entre la precipitación media anual y la altura de las estaciones. Con el fin de estimar un valor asociado a la altura media del área de interés, se utiliza una regresión lineal entre los puntos. (Figura 4.23).

$$Pp \text{ media anual [mm]} = -0,0003 \cdot z + 2,27 \quad (4.6)$$

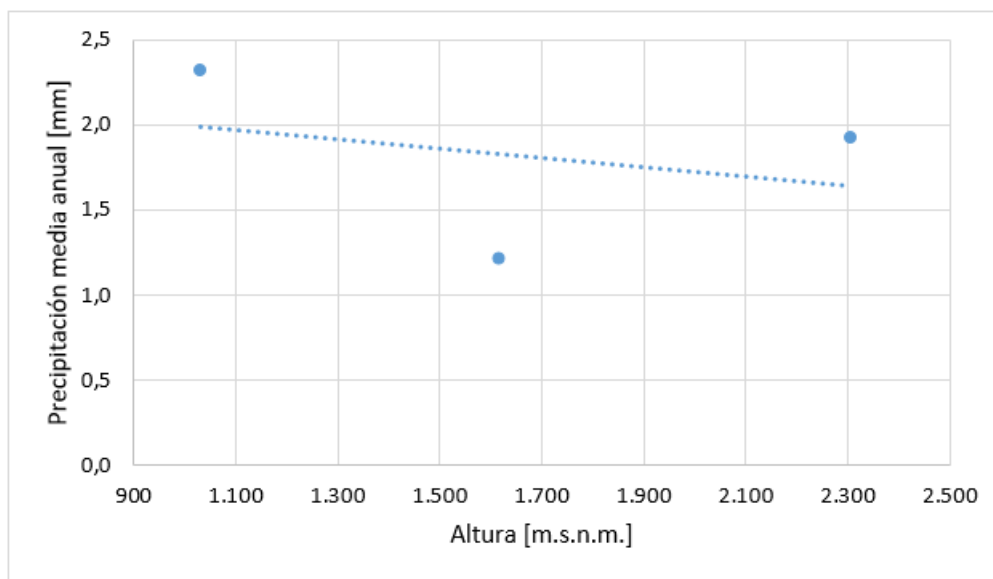
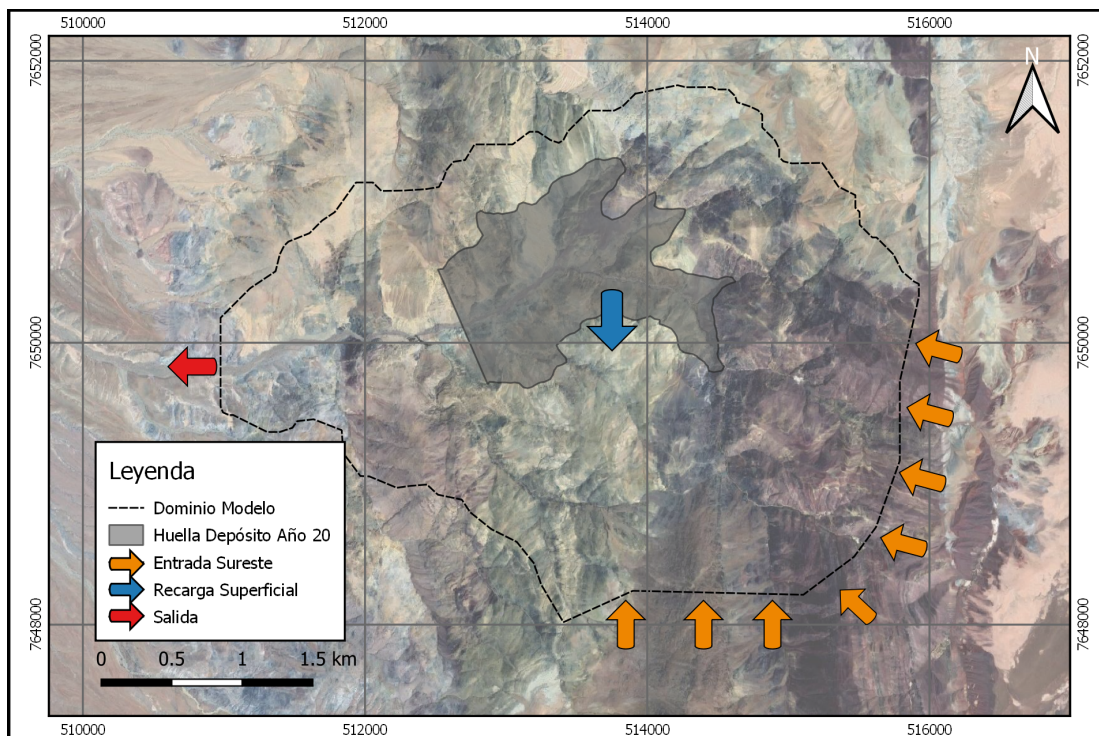


Figura 4.23: Regresión lineal entre la precipitación media anual y la elevación, depósito en planicie.

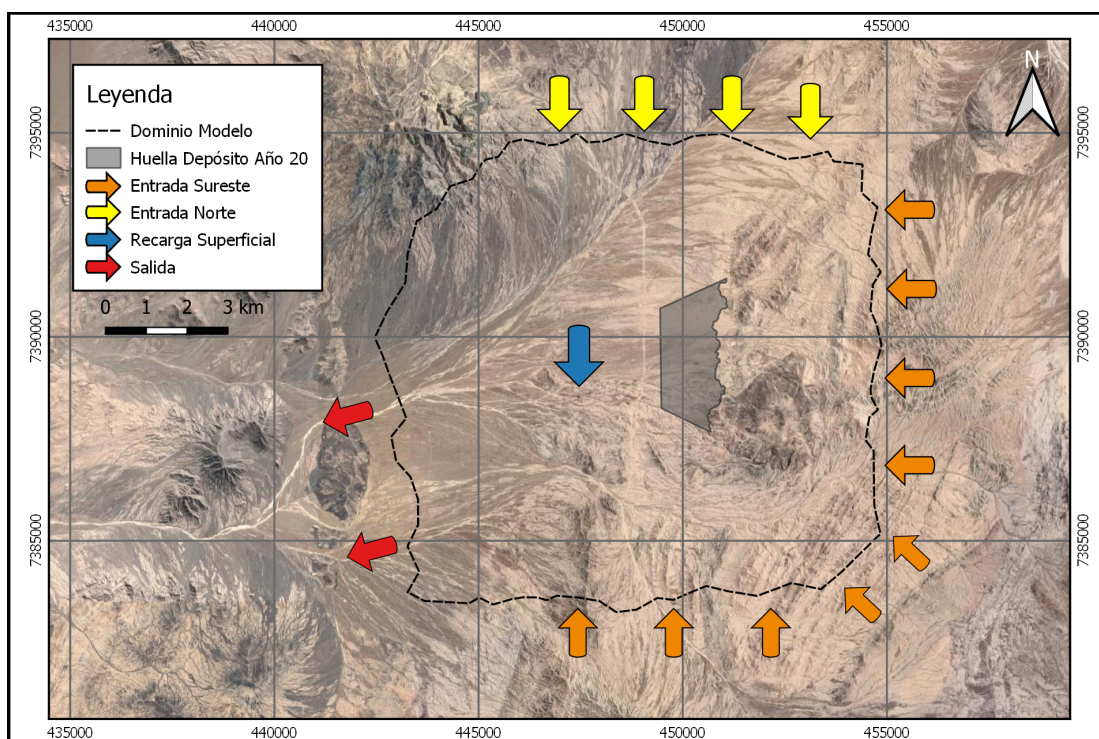
4.5.2. Estimación de la recarga superficial y balance hídrico de los modelos

Las entradas y salidas de flujo subterráneo al modelo se presentan en las Figuras 4.24 y 4.25. Para el valle se considera que las entradas de flujo son por el sector sureste del modelo. En el caso de la planicie, las entradas son dos, una en la zona norte y la segunda por la zona sureste del modelo. La salida para ambos modelos ocurre en el borde oeste, definida en las 3 unidades hidrogeológicas.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.24: Entradas y salidas, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.25: Entradas y salidas, depósito en planicie.

Para determinar la recarga al sistema subterráneo de una forma simple y directa se supondrá que es posible considerar el mismo coeficiente de infiltración, entendido como el porcentaje de precipitación media que se transforma en recarga, que se ha utilizado en proyectos cercanos a la zona de análisis. Para el caso del depósito que se analiza en un valle, el estudio más cercano es el “Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico Depósito de Relaves QB2” de Golder (2016b) donde se considera un rango entre el 2 y 3 % y para la planicie es el estudio “Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común de los Salares de Navidad y Mar Muerto” realizado por la DGA (2015) donde se considera un 3 %. A partir de esto es posible considerar para ambos casos una recarga que equivale al 3 % de la precipitación media anual.

Considerando la altura media y el coeficiente de infiltración, se obtienen los valores de la infiltración para ambos modelos. La Tabla 4.8 presenta los valores utilizados para estimar la recarga superficial por superficie y se presenta el valor total de la recarga considerando toda la superficie en ambos modelos.

Tabla 4.8: Recarga superficial para ambos modelos.

Modelo	Altura media [m.s.n.m.]	Pp media [mm/año]	Infiltración [mm/año]	Superficie [Mm ²]	Recarga [l/s]
Valle	3.867	112,55	3,38	12,53	1,34
Planicie	1.640	1,82	0,05	124,04	0,22

Por otro lado, debido a que parte del acuífero de interés definido no queda representado dentro del dominio del modelo, la recarga superficial de esos sectores es considerada como un flujo subterráneo de entrada al modelo. Para las fronteras definidas por las divisorias de aguas superficiales, no se considera flujo entrante.

Considerando la altura media y el coeficiente de infiltración, se obtienen los flujos de entrada para ambos modelos. La Tabla 4.9 presenta los valores utilizados para estimar el flujo de entrada.

Tabla 4.9: Flujos de entrada para ambos modelos.

Modelo	Zona entrada	Altura media [m.s.n.m.]	Pp media [mm/año]	Infiltración [mm/año]	Superficie [Mm ²]	Flujo [l/s]
Valle	Sureste	3.991	121,04	3,63	6,80	0,78
Planicie	Norte	1.774	1,79	0,05	43,41	0,07
	Sureste	1.902	1,75	0,05	95,14	0,16

Finalmente, el flujo de salida para ambos modelos corresponde a la suma de las entradas, considerando que las cuencas hidrogeológicas se encuentra en régimen permanente. La Tabla 4.10 presenta los valores del flujo de salida de los modelos.

Tabla 4.10: Flujo de salida para ambos modelos.

Modelo	Zona salida	Flujo [l/s]
Valle	Oeste	2,12
Planicie	Oeste	0,45

A modo de resumen, se presentan las Figuras 4.26 y 4.27 con los flujos de entrada y salida resultantes.

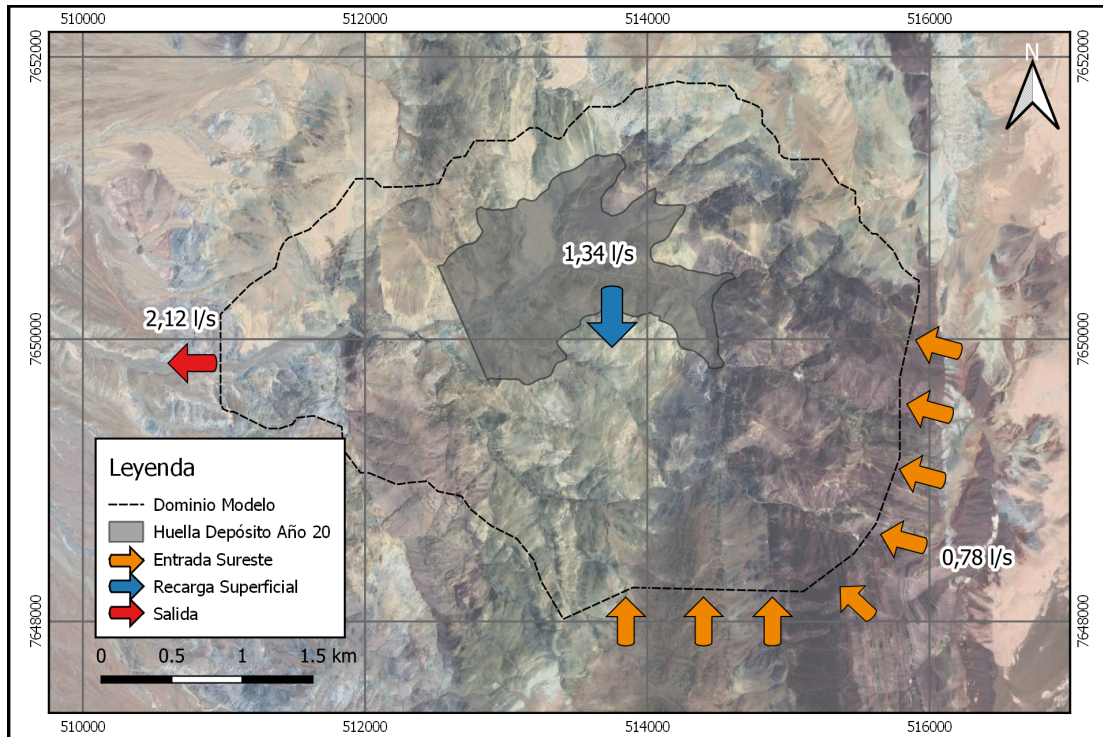
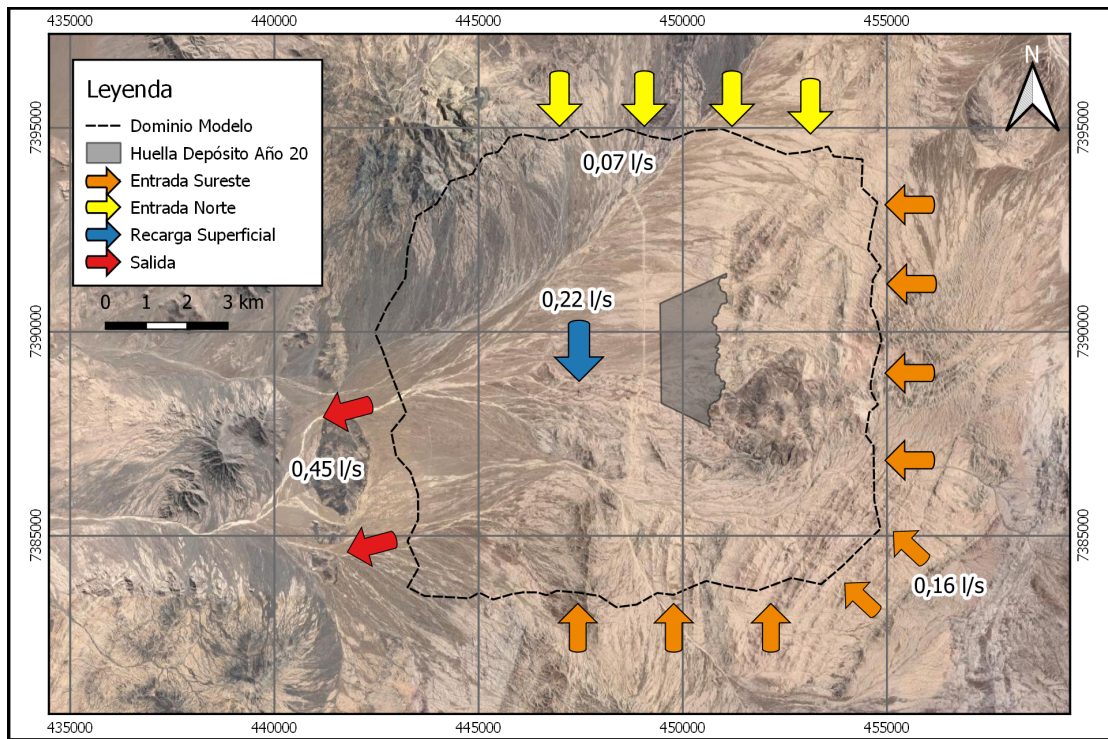


Figura 4.26: Balance depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 4.27: Balance depósito en planicie.

Capítulo 5

Construcción Modelos Numéricos

A continuación, se presenta la construcción y definición de la configuración de los modelos numéricos en el código FEFLOW, versión 7.1, para los dos sitios elegidos donde se evalúa el flujo de infiltración desde el depósito de relaves. Estos modelos se basan en las características definidas en los modelos conceptuales, a la vez de representar el crecimiento del depósito por etapas.

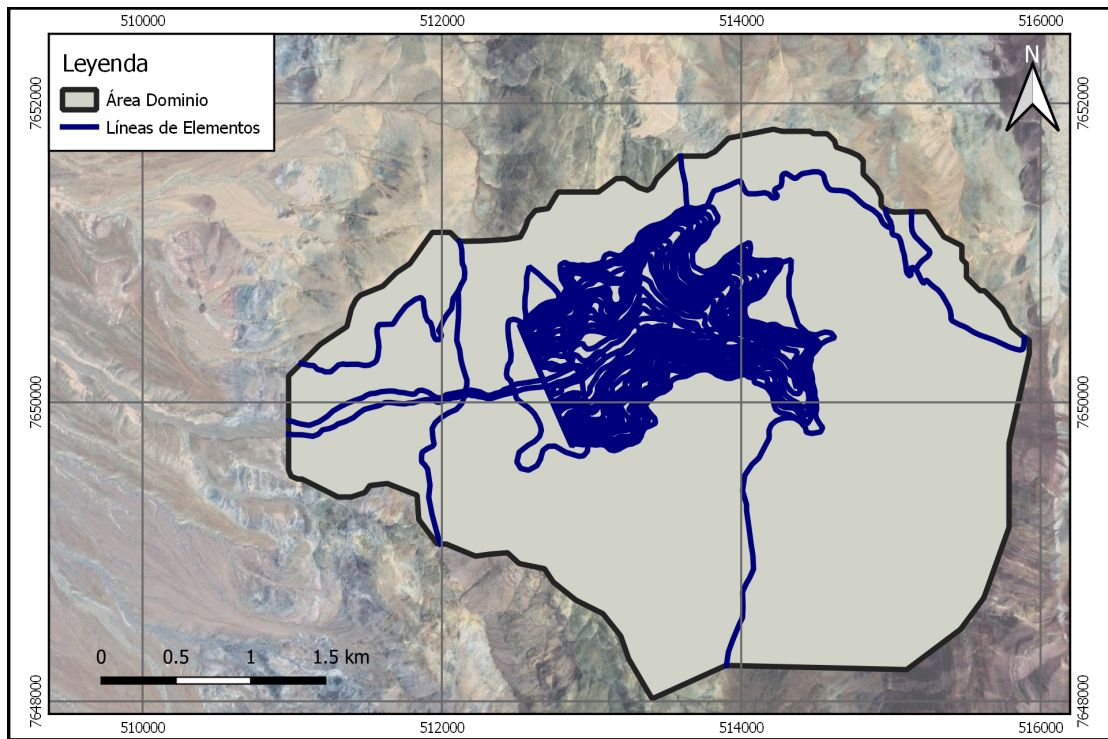
5.1. Malla de cálculo

El principal objetivo de la malla de cálculo es poder dotar al modelo de una discretización suficiente en las zonas donde se esperan gradientes hidráulicos importantes y/o gradientes de conductividad altos. Por este motivo, la elección de elementos triangulares permite el refinamiento local y manejar geometrías complejas, por ejemplo, el contacto entre las unidades hidrogeológicas.

En esta sección se presenta la construcción de la malla para los dos depósitos, donde en un principio se definen los elementos para una superficie 2D y posteriormente, su extensión a un modelo 3D, representando el sistema hidrogeológico y el depósito de relaves para los dos casos de discretización por etapas.

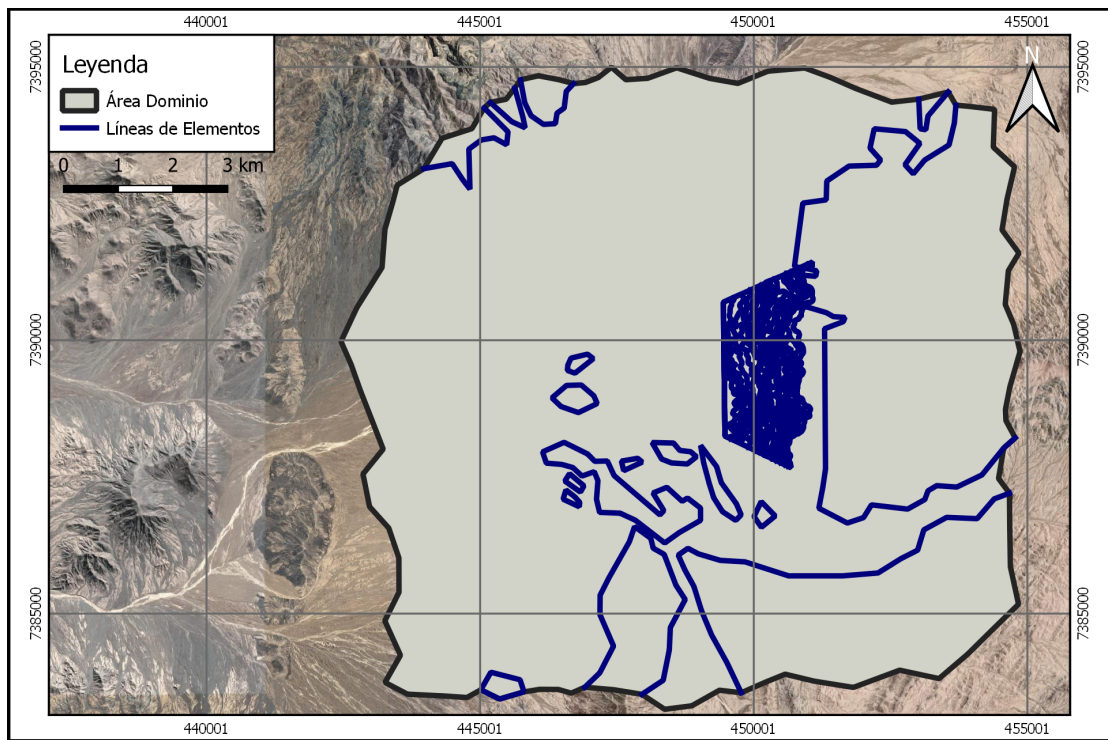
5.1.1. Generación malla superficial

Para la construcción de la malla superficial de los modelos, primero se definen las líneas del contacto entre unidades hidrogeológicas y las etapas definidas para el crecimiento del relave (Capítulo 4.2). Además, con el fin de evaluar la metodología de representación en un periodo acotado inicialmente, se agregan las etapas que definen los meses 1, 2 (3 en el depósito en planicie) y 6. Las Figuras 5.1 y 5.2 presentan las líneas del contacto y el polígono del dominio del modelo en donde los elementos serán definidos.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.1: Líneas de contacto y dominio del modelo en FEFLOW, depósito en valle.



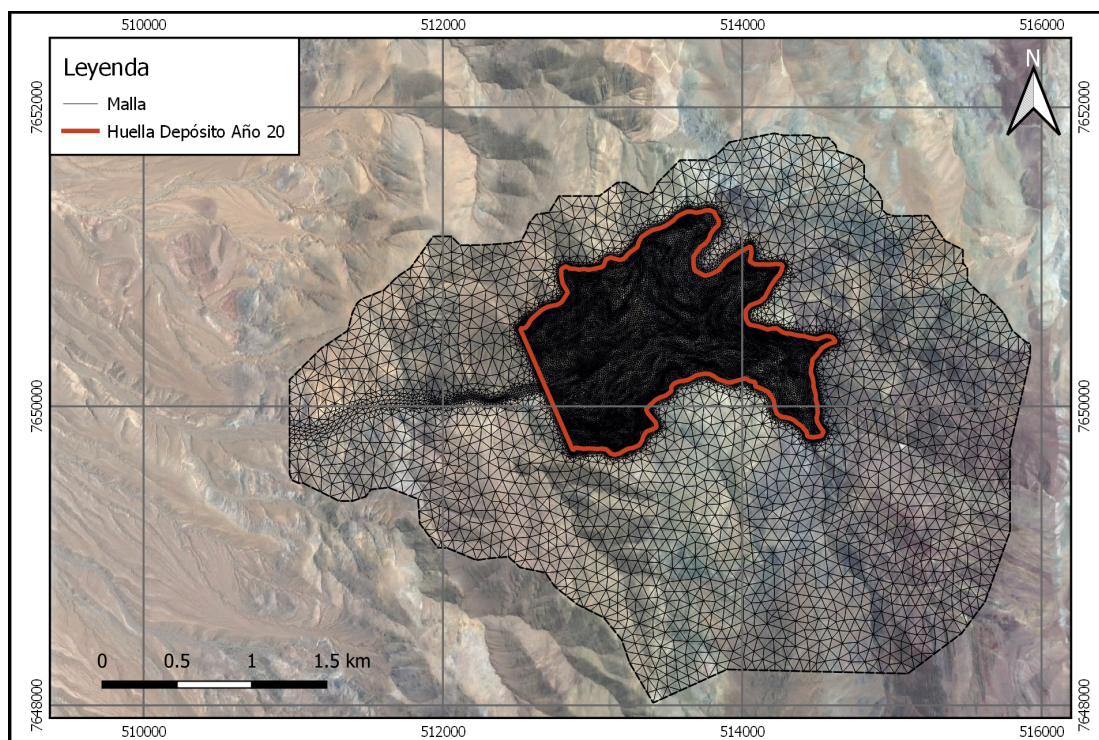
Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.2: Líneas de contacto y dominio del modelo en FEFLOW, depósito en planicie.

De la malla generada automáticamente por el modelo, se refina el contacto entre la unidad de aluvial y la unidad de roca fracturada, la superficie que abarca el depósito de relaves y un margen aproximado de 30 metros fuera de la huella final del depósito. Se estima que la distancia del margen definido es suficiente para reproducir los gradientes de la última etapa. De esta forma, el tamaño máximo y mínimo de los elementos corresponden a 149 y 3 metros en el depósito en valle y 1.092 y 2 metros en el depósito en planicie. La malla de elementos para cada modelo se ilustran en las Figuras 5.3 y 5.4. El número de elementos por superficie en cada modelo se presenta en la Tabla 5.1.

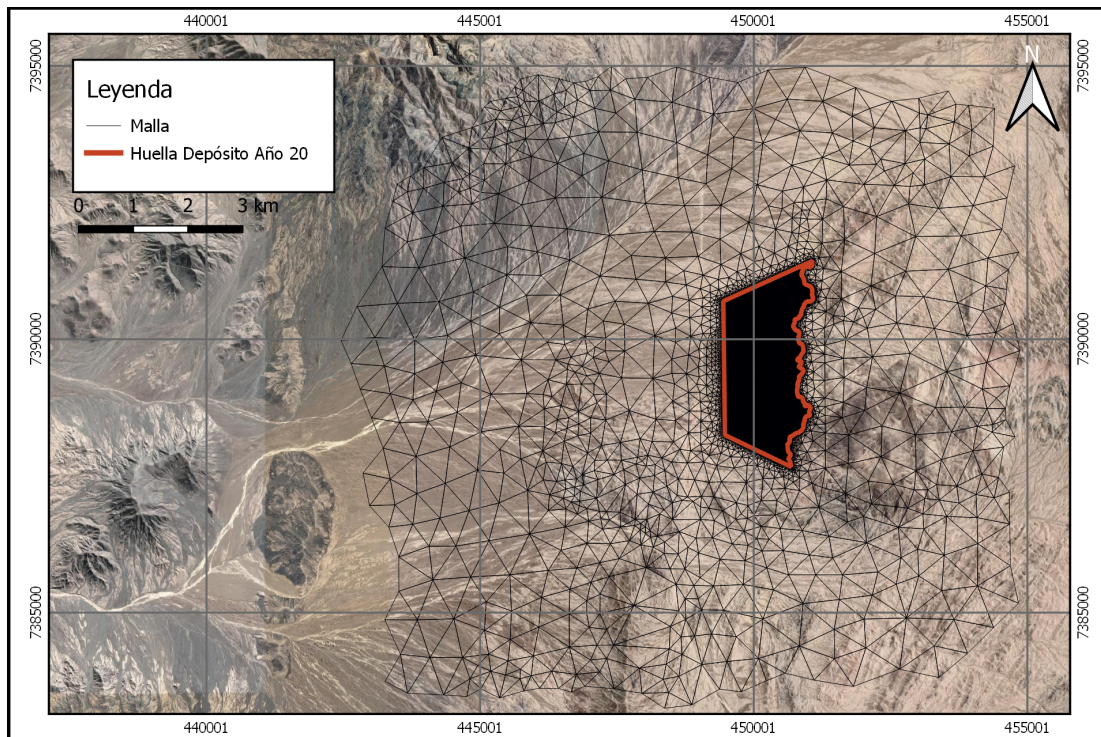
Tabla 5.1: Elementos por superficie.

Modelo	Elementos por superficie
Valle	50.456
Planicie	143.036



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.3: Malla superficial de elementos, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.4: Malla superficial de elementos, depósito en planicie.

5.1.2. Generación malla 3D

Sistema hidrogeológico

En la dirección vertical y antes de incorporar al depósito, los modelos se discretizan en superficies continuas que definen, en principio, los contactos entre las unidades hidrogeológicas. En ambos modelos, la primera superficie corresponde a la topografía del terreno, mientras que la última superficie corresponde al fondo del modelo, la cual se fija para definir un espesor constante de roca sana de 300 y 310 metros para el depósito en valle y planicie, respectivamente. Las otras superficies definen el contacto vertical sedimento-roca fracturada, roca fracturada-roca sana y, para el caso del modelo de la planicie, sedimento no consolidado-sedimento consolidado. Además, se agregan capas adicionales en la mitad de los estratos con mayor potencia para aumentar la precisión del modelo en el cálculo de los gradientes verticales. En el modelo en planicie, se agregaron adicionalmente dos superficies en la UGH1a para aumentar la discretización en el contacto con los relaves, definiendo 2 capas con espesores de 1 metro. Las Figuras 5.5 y 5.6 presentan la discretización espacial para los modelos del valle y planicie, respectivamente, y en las Tablas 5.2 y 5.3 se detalla el objetivo de cada superficie definida en ambos modelos.

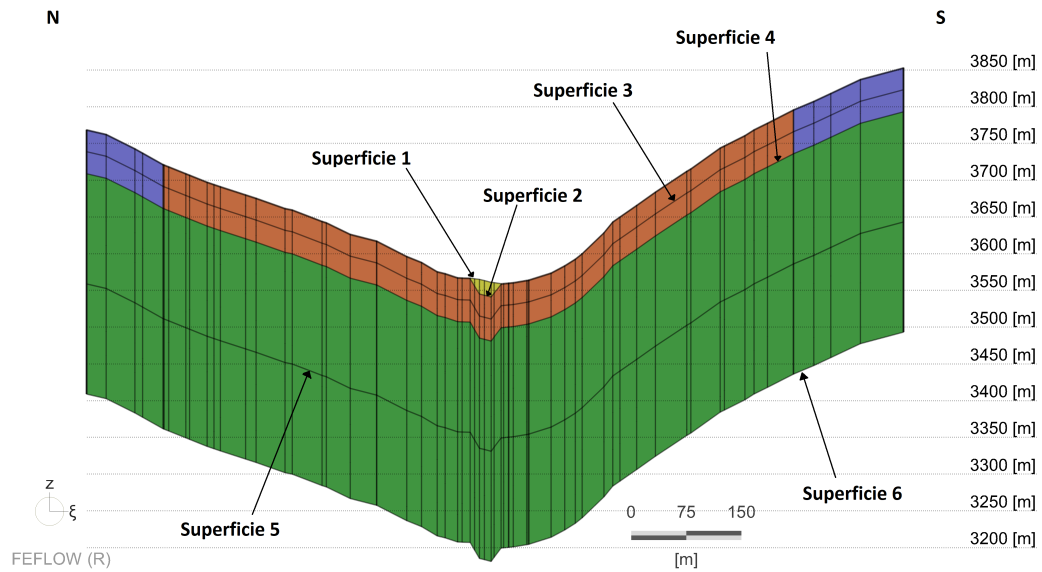
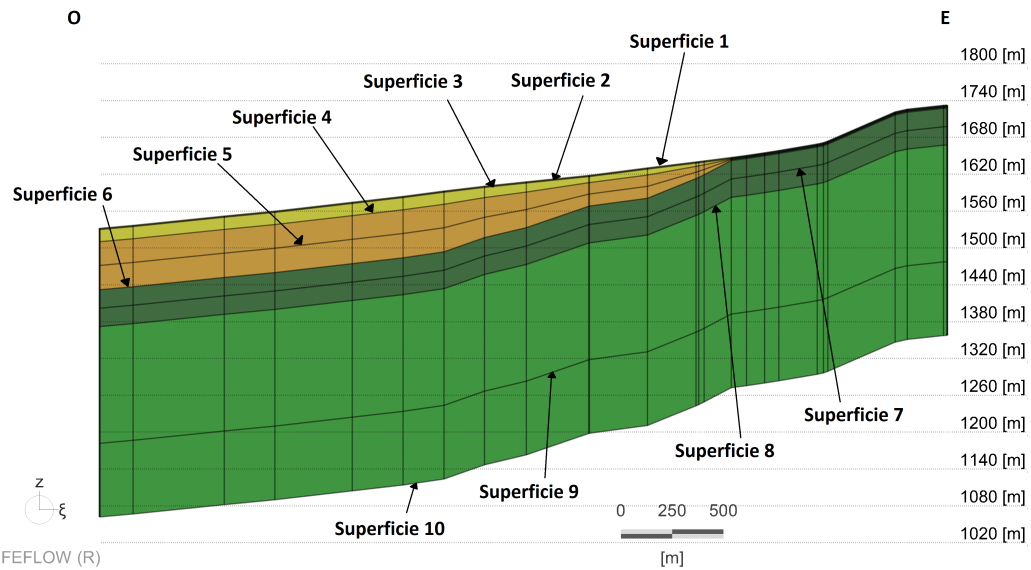


Figura 5.5: Discretización vertical, depósito en valle.

Tabla 5.2: Descripción de las superficies definidas para el modelo en valle.

Superficie	Objetivo que representa la superficie	Observaciones
1	Topografía del terreno	
2	Fondo de UHG1 Sedimentos	Espesor mínimo de 1 m desde la topografía donde la UHG1 no está presente
3	Discretización adicional para UHG2	Se define en la mitad de UHG2
4	Fondo de UHG2 Roca Fracturada	Define espesor máximo de UHG2 en 60 m
5	Discretización adicional para UHG3	Se define en la mitad de UHG3
6	Fondo de UHG3 Roca Sana	Define espesor máximo de UHG3 en 300 m



Nota: Elevación exagerada por 3.

Figura 5.6: Discretización vertical, depósito en planicie.

Tabla 5.3: Descripción de las superficies definidas para el modelo en planicie.

Superficie	Objetivo que representa la superficie	Observaciones
1	Topografía del terreno	
2	Discretización adicional para UHG1a	Espesor de 1 m desde la topografía
3	Discretización adicional para UHG1a	Espesor de 1 m desde la superficie 2
4	Fondo de UHG1a Sedimentos - Modernos	Espesor mínimo de 0,8 m desde la superficie 3 donde la UHG1a no está presente
5	Discretización adicional para UHG1b	Se define en la mitad de UHG1b. Espesor mínimo de 0,6 m desde la UHG1a donde la UHG1b no está presente
6	Fondo de UHG1b Sedimentos - Antiguos	Espesor mínimo de 1,6 m desde la superficie 5 donde la UHG1b no está presente
7	Discretización adicional para UHG2	Se define en la mitad de UHG2
8	Fondo de UHG2 Roca Fracturada	Define espesor máximo de UHG2 en 60 m
9	Discretización adicional para UHG3	Espesor de 190 m desde UHG2
10	Fondo de UHG3 Roca Sana	Define espesor máximo de UHG3 en 310 m

Depósito de relaves

El crecimiento del depósito de relaves se representa en el modelo mediante la discretización en etapas, donde cada etapa define la geometría final de un periodo de tiempo específico adicionando una superficie de elementos.

El número de superficie utilizadas para representar el crecimiento de los depósitos de relaves son separados en dos casos, definidos en la sección 4.2. Para el primer caso, se utilizan 14 y 13 superficies para los depósitos en valle y planicie, respectivamente. En cambio, para el segundo caso se utilizan 4 superficies para ambos modelos. Además, para obtener una mayor precisión en la resolución de la infiltración hacia el acuífero, se agrega una superficie adicional en el depósito en valle, a medio metro de la superficie que define la topografía, y dos para el depósito en planicie, una a 0,9 metro de la topografía y la segunda en la mitad entre la superficie adicional y la superficie que define la primera etapa de crecimiento.

Las Figuras 5.7 y 5.9 presentan la discretización vertical de los depósitos en valle y planicie, respectivamente, para las 4 y 14, o 13, etapas definidas para ambos depósitos. Por otro lado, las Figuras 5.8 y 5.10 ilustran la evolución de ambos depósitos en el caso de representar el crecimiento en 4 etapas.

(a) 4 etapas.

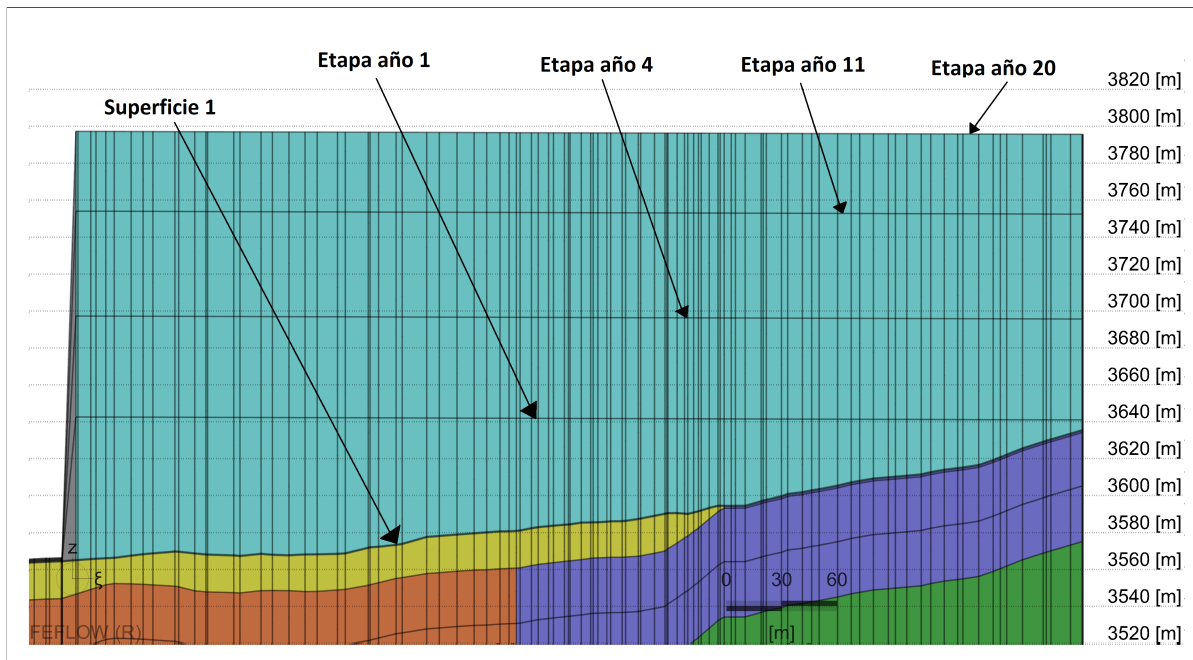


Figura 5.7: Discretización vertical del depósito, depósito en valle.

(b) 14 etapas.

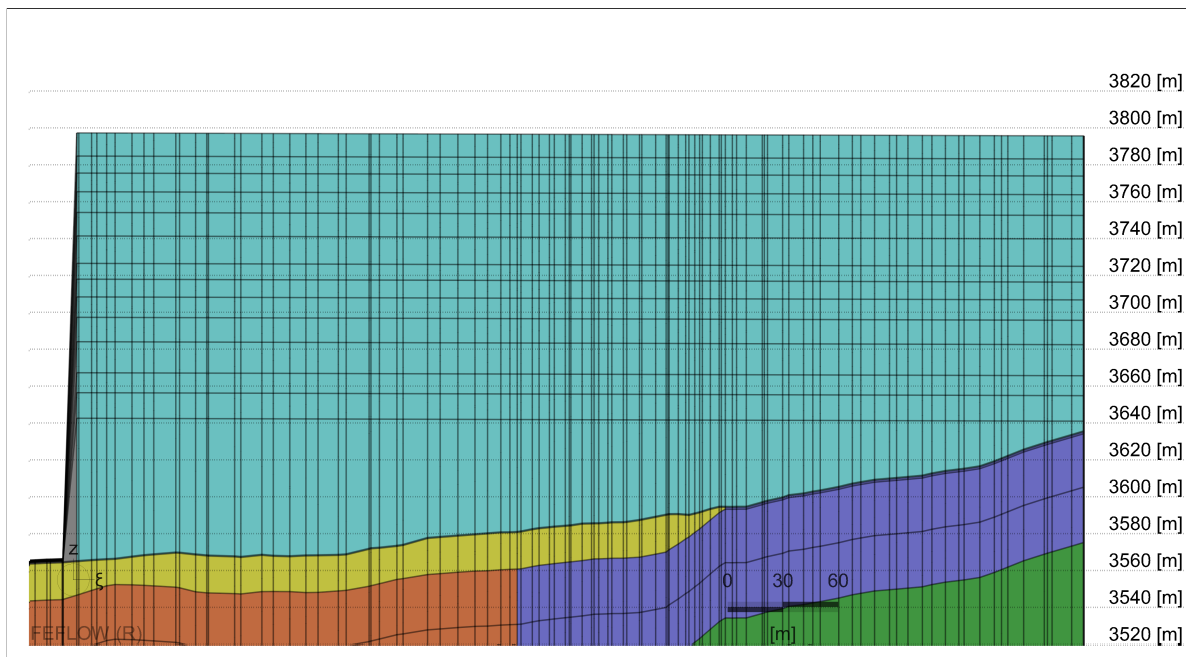
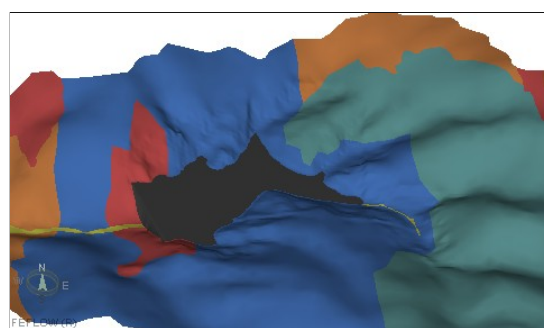
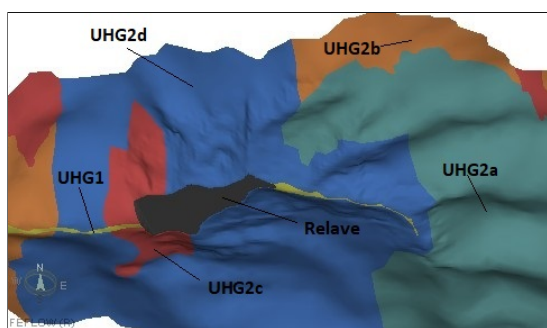


Figura 5.7: Continuación. Discretización vertical del depósito, depósito en valle.

(a) Año 1.

(b) Año 4.



(c) Año 11.

(d) Año 20.

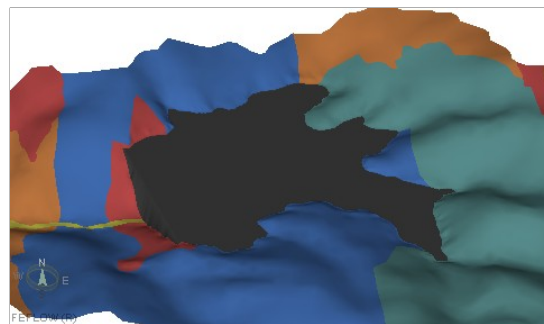
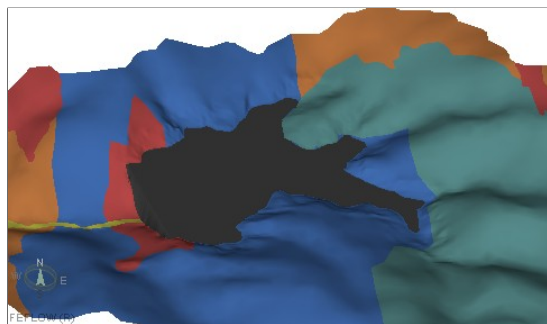
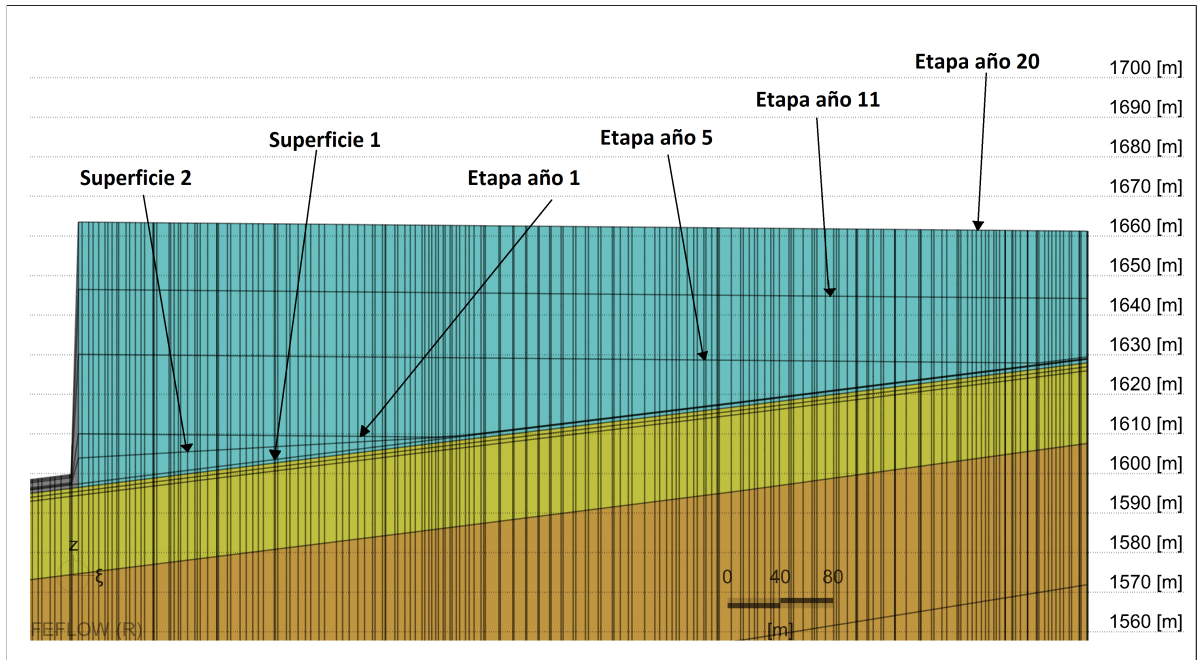
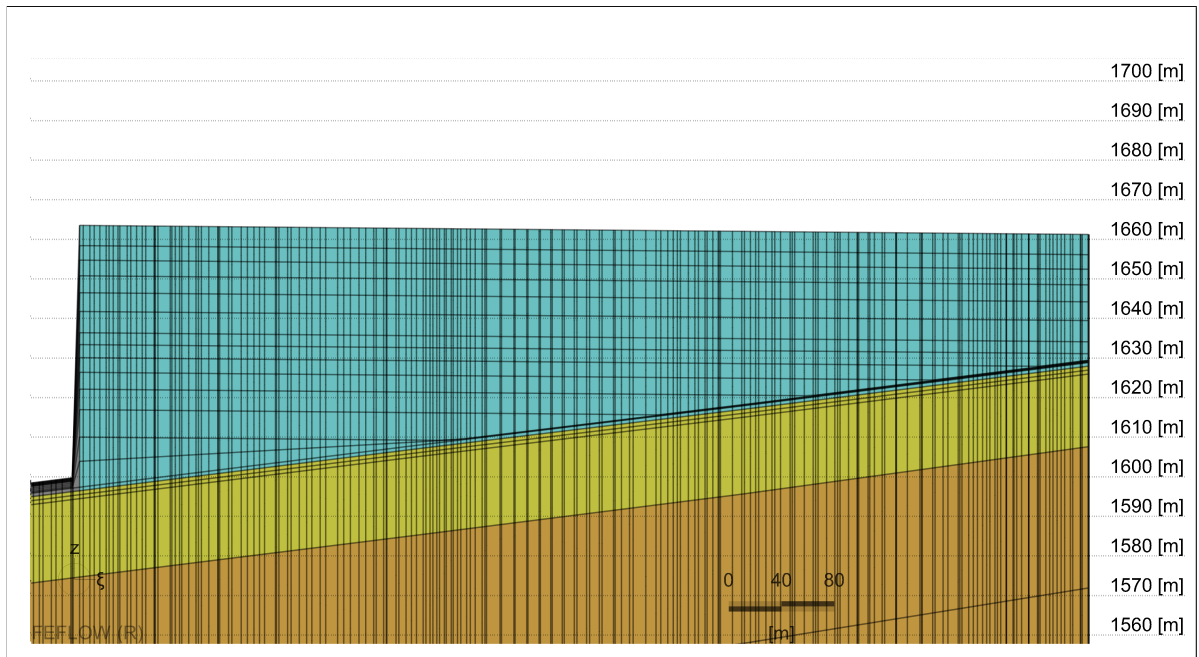


Figura 5.8: Evolución del depósito en valle en 4 etapas.

(a) 4 etapas.



(b) 13 etapas.



Nota: Elevación exagerada por 3.

Figura 5.9: Discretización vertical del depósito, depósito en planicie.

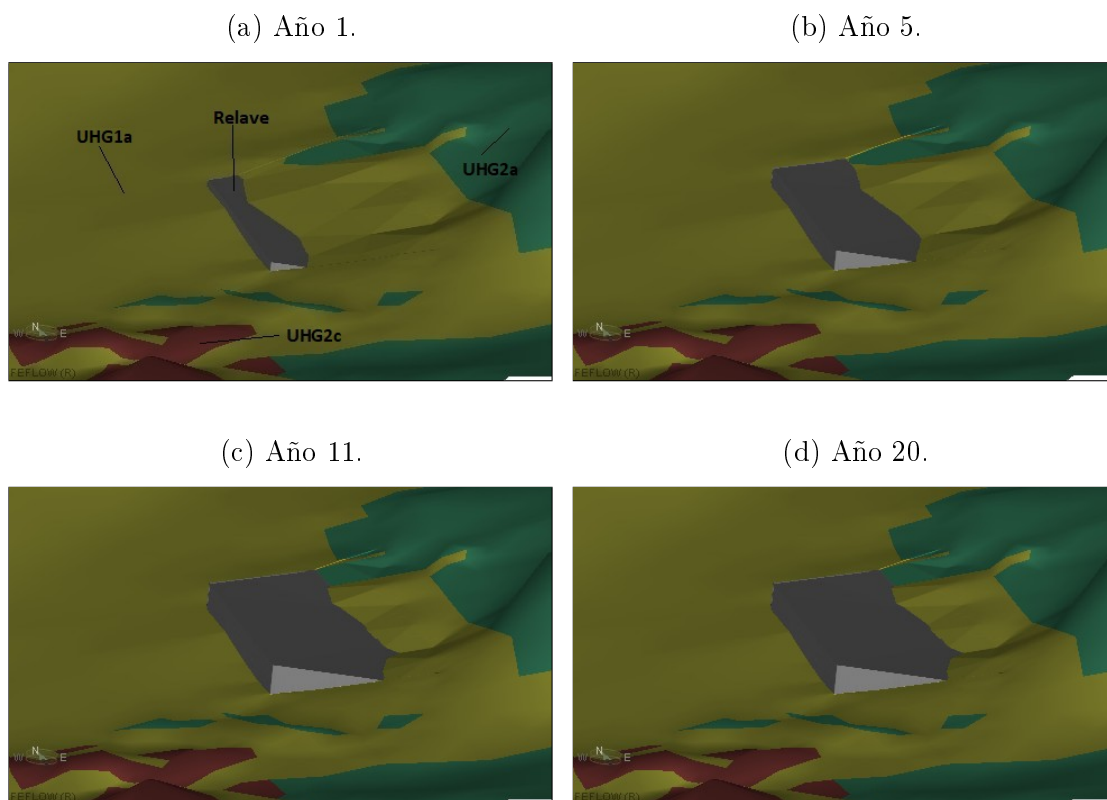


Figura 5.10: Evolución del depósito en planicie en 4 etapas.

5.1.3. Número de elementos

La cantidad de elementos utilizados para definir el sistema hidrogeológico y el depósito de relaves con discretización en 14 (13) etapas y en 4 etapas, en su máximo tamaño en el modelo (año 20), se presentan en la Tabla 5.4. El número de elementos presentados para definir el depósito de relaves no considera los que se encuentran exteriores a la huella del depósito y se mantienen inactivos durante la simulación de cada etapa.

Tabla 5.4: Cantidad de elementos utilizados para el sistema hidrogeológico y depósito de relaves.

Modelo	Sistema hidrogeológico	Depósito 14 (13) Etapas	Depósito 4 Etapas
Valle	252.280	544.815	181.605
Planicie	1.287.324	1.938.630	775.452

La cantidad de elementos que se utilizan para el modelo en planicie asciende sobre los 3 millones. Esta cantidad de elementos se define sólo con fines de este trabajo, pero en la práctica modelos con esta cantidad de elementos son poco recomendables puesto que están asociados a tiempos de simulación altos para los contextos en los que se desarrollan proyectos de consultoría.

5.2. Definición tipo de problema y discretización temporal

Para resolver el problema del flujo, se utiliza la ecuación de Richards, que describe el flujo en un medio poroso que involucra la zona saturada y no saturada. La utilización de la ecuación de Richards responde exclusivamente a la necesidad de obtener un modelo más estable y no pretende proporcionar una representación precisa del flujo en la zona no saturada. Esta necesidad surge de que los métodos de solución que sólo resuelven las ecuaciones para medio saturado, escalan las propiedades hidráulicas en las celdas secas o con nivel freático paramétricamente (Modo Phreatic en FEFLOW). Sin embargo, este escalamiento, presenta comúnmente problemas de convergencia numérica cuando se trata de hacer transitar recargas o infiltraciones con dirección vertical hasta el nivel freático.

La ecuación de Richards permite un escalamiento más gradual y controlado por el usuario de las propiedades hidráulicas, con un vínculo físico a las curvas de contenido de humedad y conductividad hidráulica relativa, las que se representan de forma aproximada en el modelo.

Por otro lado, una representación adecuada del tránsito de la recarga por la zona no saturada, requeriría discretizaciones verticales coherentes con la escala de la capilaridad y la humedad residual, siendo así, impracticable alcanzarlas en un modelo tridimensional con una escala espacial de cuencas. Por esta razón, el uso de la ecuación de Richards constituye en la práctica, sólo un vehículo para mejorar la estabilidad del modelo, permitiendo incorporar una aproximación del tiempo de tránsito de la infiltración por la zona no saturada, pero no corresponde a la resolución del flujo en zona no saturada.

Para la discretización temporal, se utiliza la opción de que el programa controle automáticamente el paso de tiempo, imponiendo el tiempo inicial para las simulaciones de 0,0001 días, el crecimiento máximo entre pasos de tiempo de 2 días y el paso de tiempo máximo de 5 días. Esta opción permite al modelo ajustar los pasos de tiempo según los cambios previstos de las variables del problema. Ante cambios importantes de las variables, el paso de tiempo es pequeño, mientras que en el caso contrario, el paso de tiempo será alto para variaciones pequeñas.

5.3. Curvas Características Sólido-Agua

Como los modelos se resuelven utilizando la ecuación de Richards, es necesario definir curvas características sólido-agua para los diferentes materiales. En este caso, se utilizan las opciones que facilita el código para definir las curvas. Para el caso del sistema hidrogeológico, la curva SWCC se define a partir de curvas splines y para el relave se utiliza el modelo Van Genuchten. El uso del modelo Van Genuchten en el relave, entrega resultados de mayor estabilidad numérica en comparación al uso de splines.

La curva spline para la relación saturación-succión es definida utilizando 4 puntos, donde la saturación disminuye hasta el 5% para los 1.000 metros de succión. En cambio, para la relación saturación-conductividad relativa es definida utilizando 3 puntos que definan un descenso de dos órdenes de magnitud cuando la saturación sea del 10%. Este es el carácter aproximado de las curvas que permiten reemplazar el escalamiento por defecto que realiza

el modelo Phreatic de FEFLOW y la razón por la que la solución del flujo en la zona no saturada es solo una aproximación, pero de cualquier forma una mejora respecto a los modos por defecto.

La Figura 5.11 ilustra las curvas SWCC utilizadas para los suelos en función de la succión. A modo de verificación, es posible ajustar un modelo de Van Genuchten para comprobar que los parámetros α y n entreguen valores coherentes. Esto se realiza en la Tabla 5.5, resultando que los parámetros se aproximan a un suelo con contenido limoso según Tuller & Or (2003) (limo: $\alpha = 0,6 [1/m]$ y $n = 1,53$).

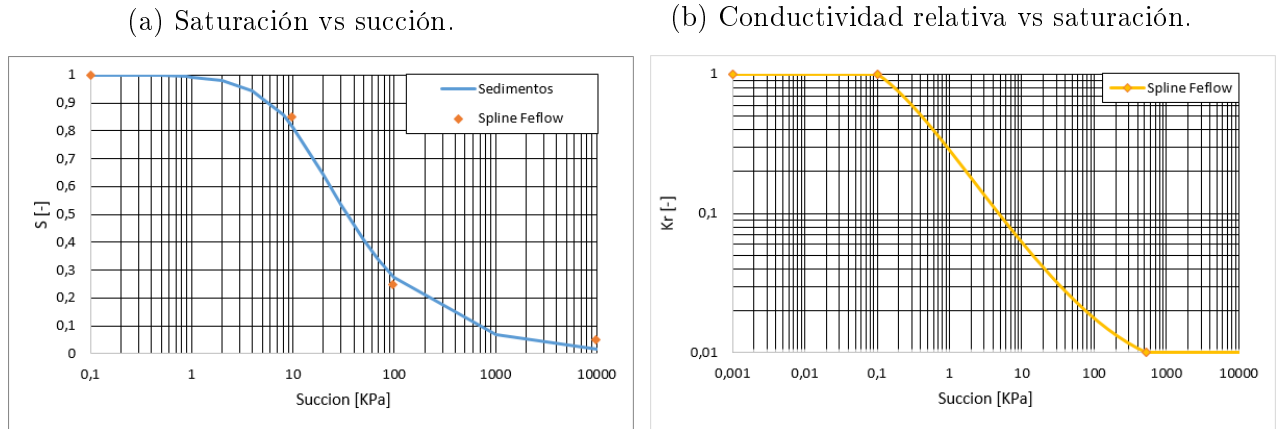


Figura 5.11: SWCC para los suelos.

Tabla 5.5: Parámetros SWCC modelo Van Genuchten para el suelo.

Parámetro	$\alpha [1/m]$	$n [-]$
Suelo	0,8	1,61

Para obtener los parámetros del modelo Van Genuchten del relave, se utilizan como referencia las mediciones de contenido de humedad versus succión de material de relave, realizadas por Golder en el proyecto Quebrada Blanca 2 (Golder, 2016b). Ajustando el modelo Van Genuchten a los puntos (Figura 5.12), se obtienen los parámetros de la Tabla 5.6.

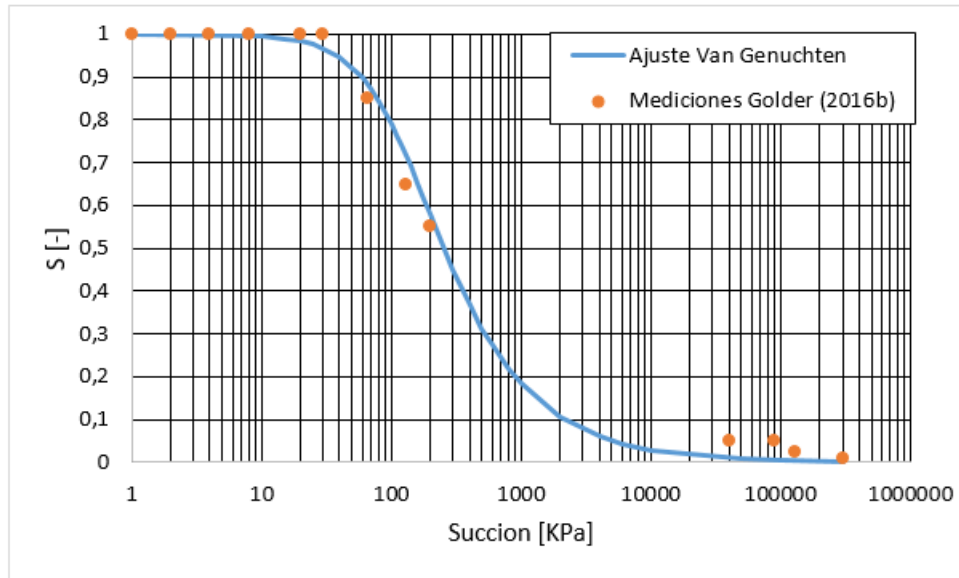


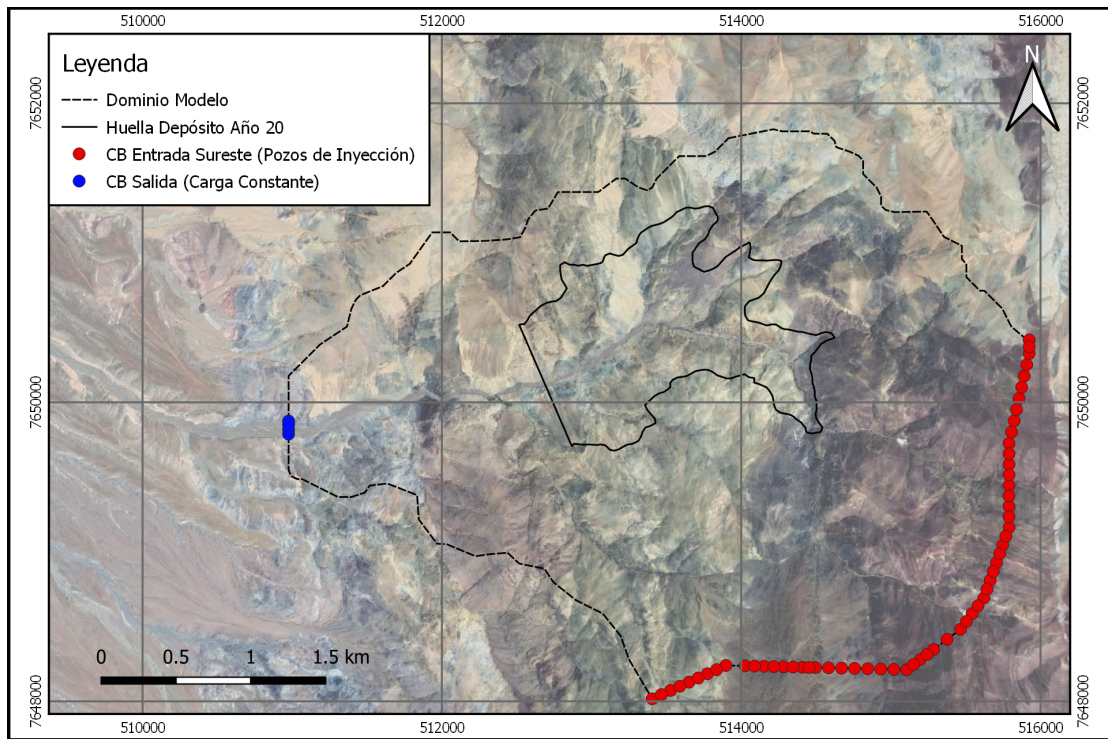
Figura 5.12: SWCC conductividad relativa en función de la saturación para los suelos.

Tabla 5.6: Parámetros SWCC modelo Van Genuchten para el relave.

Parámetro	α [1/m]	n [-]
Relave	0,08	1,8

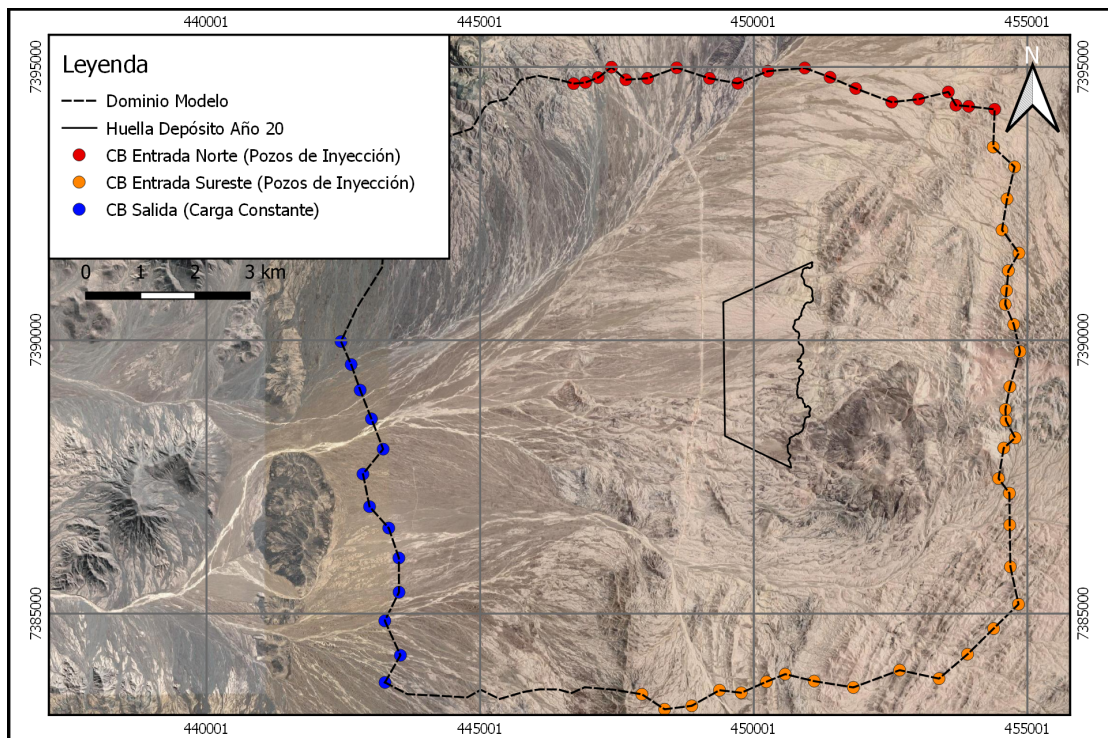
5.4. Condiciones de borde e iniciales

Las condiciones de borde y el tipo de condición utilizado en el modelo para representar las entradas y salidas del modelo, definidas en el capítulo anterior, son presentadas en las Figuras 5.13 y 5.14.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.13: Condiciones de borde, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.14: Condiciones de borde, depósito en planicie.

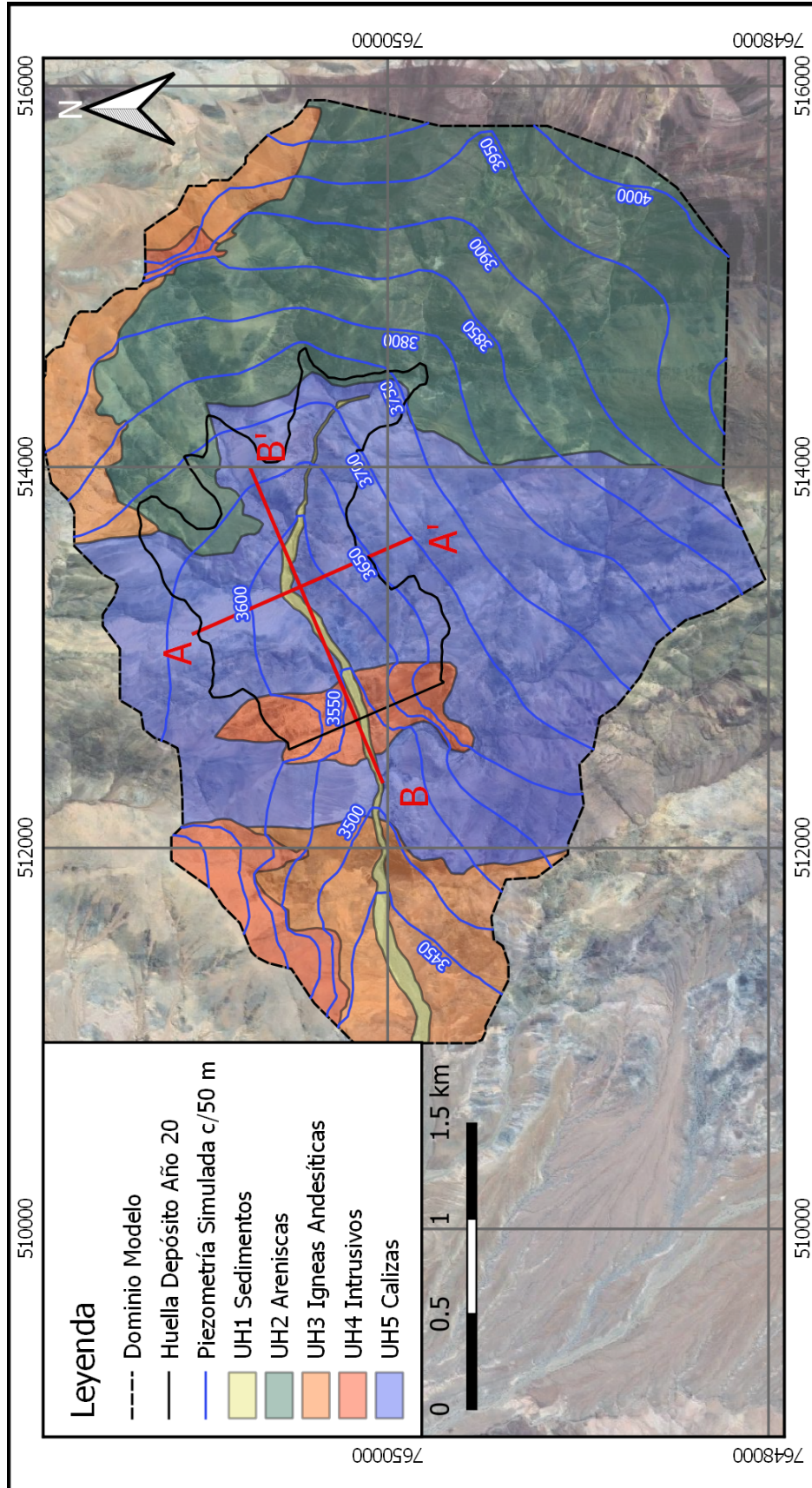
Los valores utilizados para las condiciones de borde del tipo pozo de inyección son las presentadas en las Tabla 4.9, y en las Figuras 4.26 y 4.27. Los valores utilizados para las condiciones de carga hidráulica y profundidad del nivel freático se presentan en la Tabla 5.7. Si bien no se dispone de valores de la piezometría, se estima una profundidad mínima del agua en la salida.

Tabla 5.7: Condición de borde de carga hidráulica por modelo.

Modelo	Carga [m]	Profundidad [m]
Valle	3420,0	4,5
Planicie	1315,2	60,0

5.5. Piezometría del sistema previo a la operación del depósito.

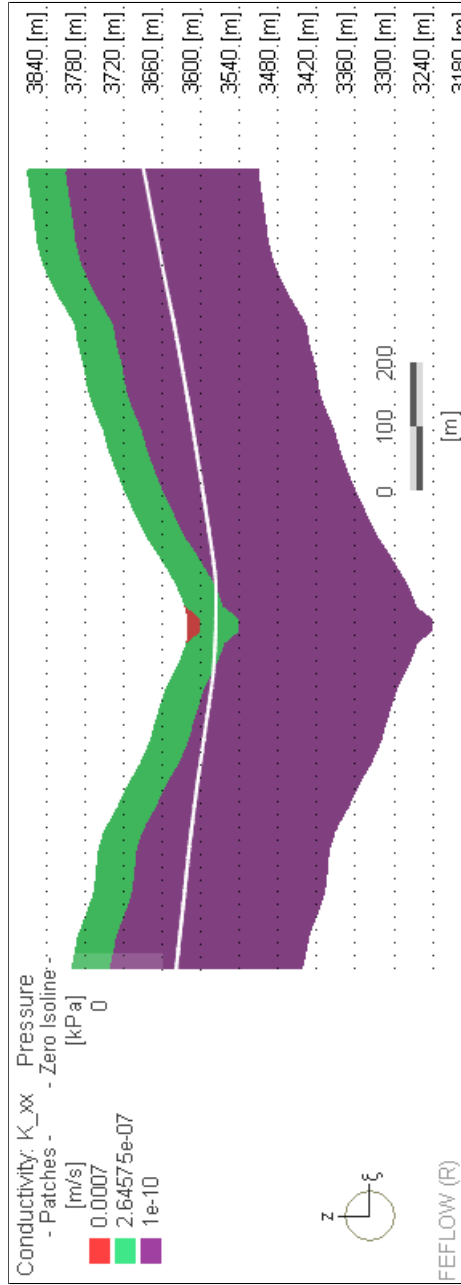
Con las definiciones descritas anteriormente, se realiza la simulación en régimen permanente, sin considerar el depósito de relaves, para obtener la piezometría resultante en cada modelo. Estas se presentan en las Figuras 5.15 y 5.17. Las Figuras 5.16 y 5.18 presentan el nivel freático en los perfiles A-A' y B-B' para ambos modelos.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.15: Piezometría simulada, depósito en valle.

(a) Perfil A-A'



(b) Perfil B-B'

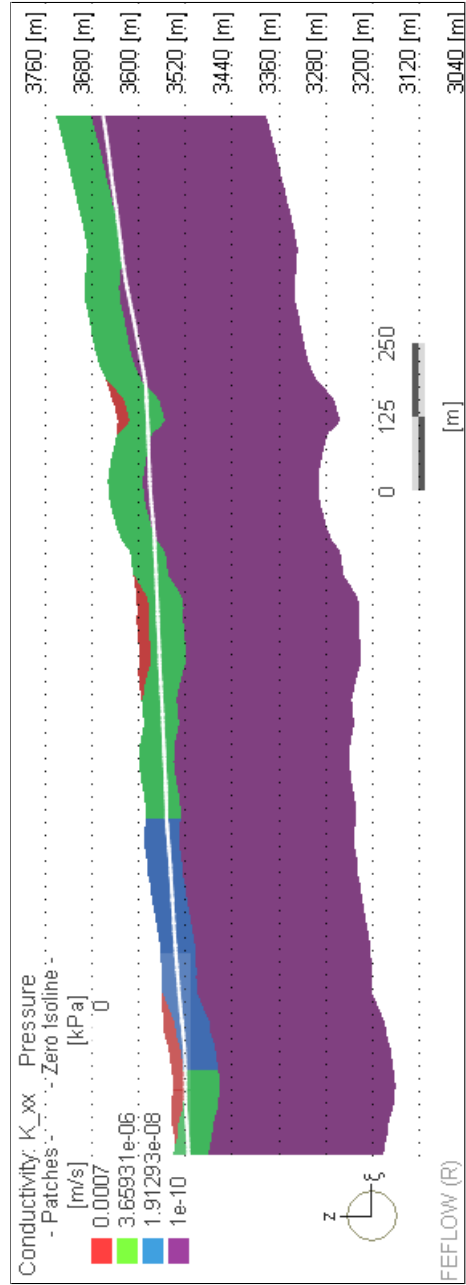
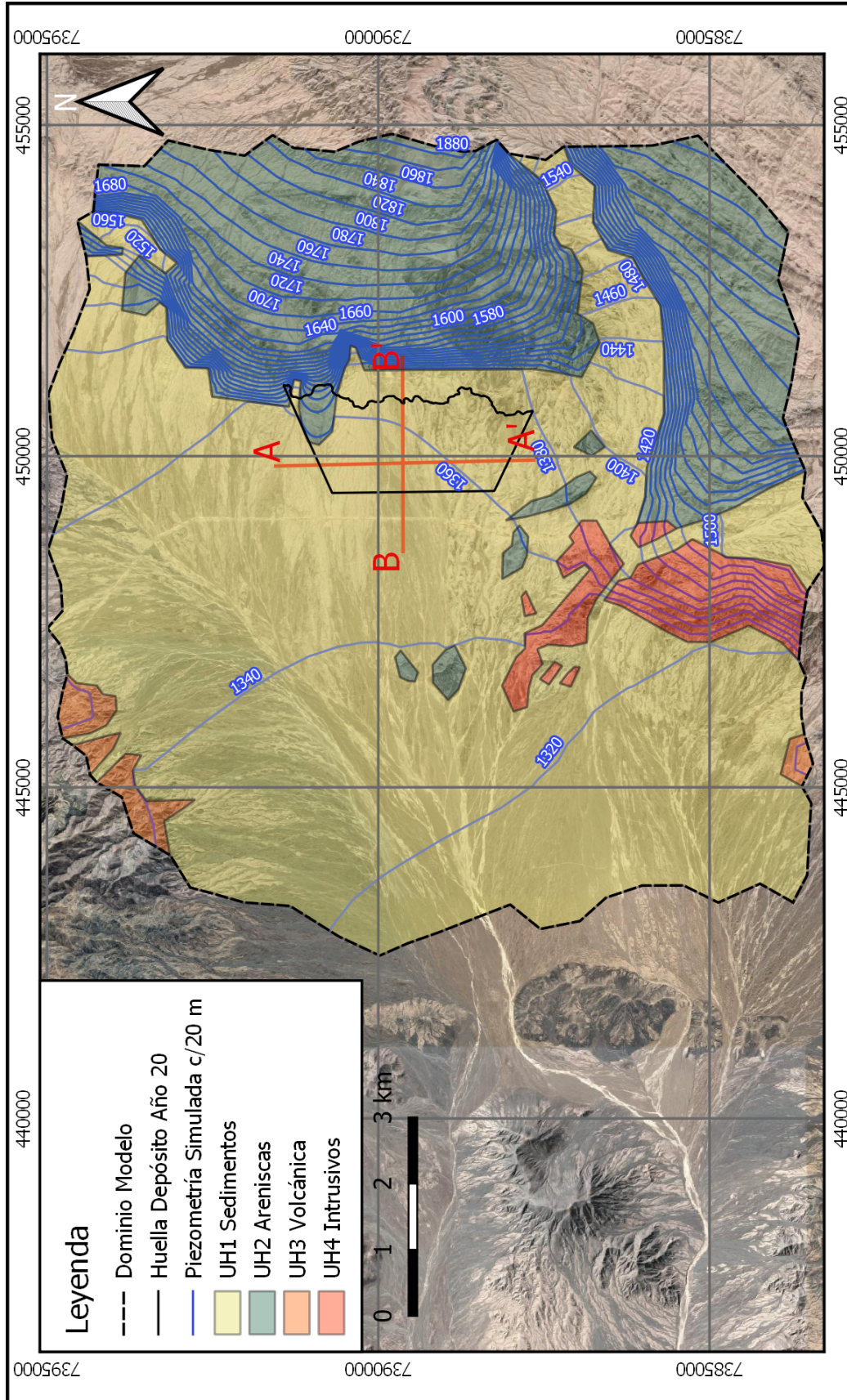


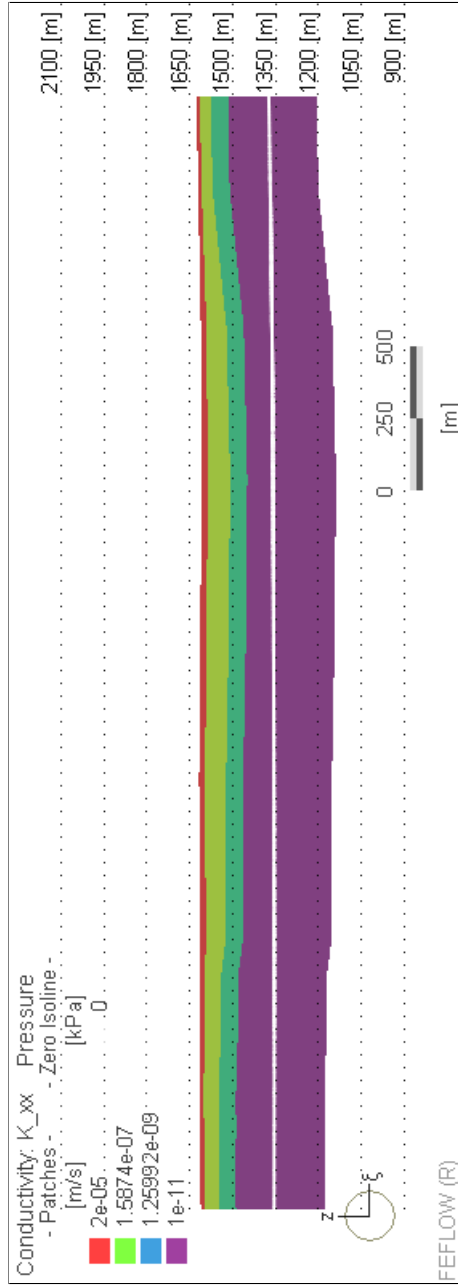
Figura 5.16: Nivel freático, depósito en valle.



Nota: Datum WGS84 19S.

Figura 5.17: Piezometría simulada, depósito en planicie.

(a) Perfil A-A'.



(b) Perfil B-B'.

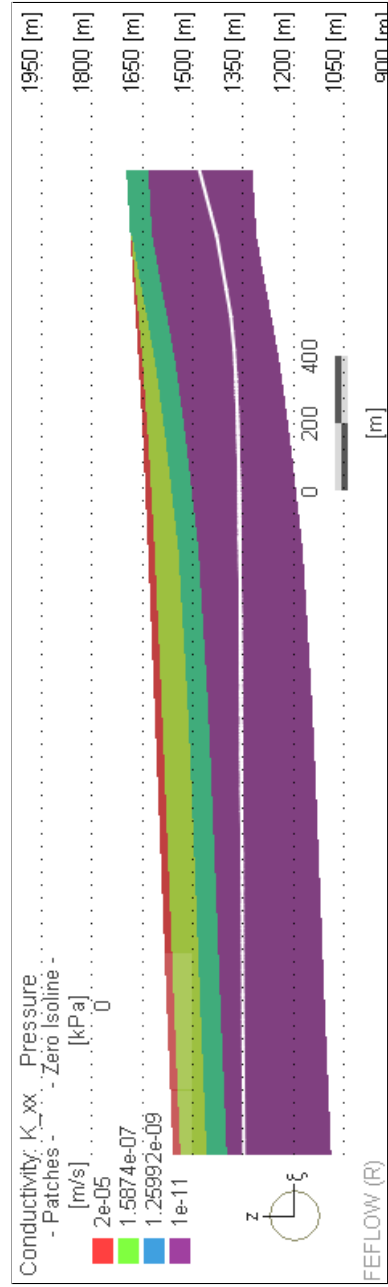


Figura 5.18: Nivel freático, depósito en planicie.

Estos resultados se obtienen de desarrollar una simulación en régimen transitorio con condiciones de borde contantes, lo que equivale a un régimen permanente una vez que los niveles son estables y los flujos de almacenamiento han convergido a un valor cercano a cero ($9 \cdot 10^{-3}$ y $4 \cdot 10^{-4}$ l/s en los modelos en valle y planicie, respectivamente). La Figura 5.19 ilustra el balance de la simulación para ambos modelos.

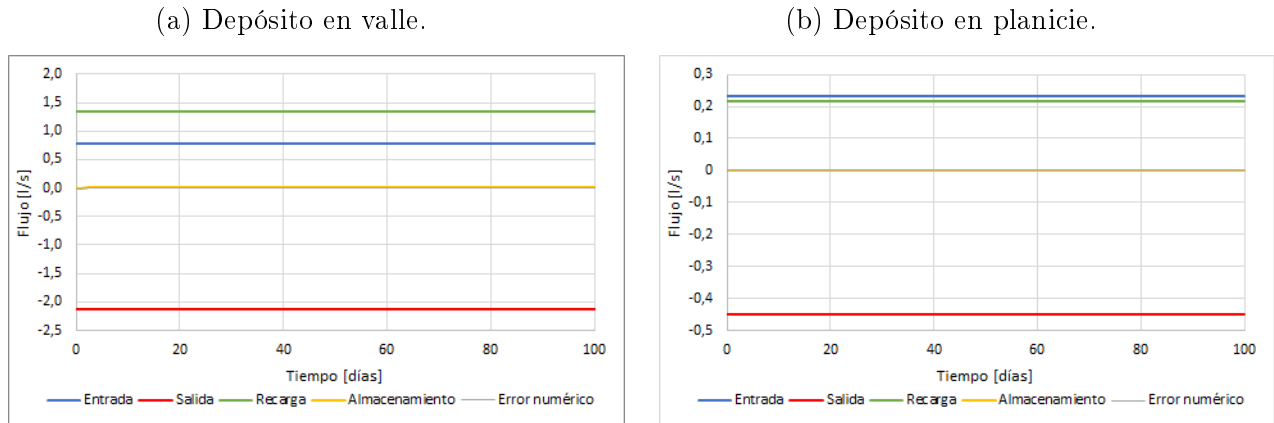


Figura 5.19: Balance modelos situación previa a la operación del depósito.

5.6. Condiciones de borde e iniciales para la representación del depósito de relaves en el modelo

Las condiciones de borde en los modelos deben representar los siguientes flujos:

- El flujo de infiltración desde el depósito de relave fuera de la laguna.
- El flujo de infiltración desde el relave bajo la laguna.
- El flujo de infiltración desde la laguna sobre terreno natural.

El flujo de infiltración desde el depósito de relave fuera de la laguna es producto de suponer que el relave se deposita saturado y que mantiene esa condición durante todo el periodo evaluado. Para representar esta característica, se agrega la condición de borde de carga hidráulica igual a la elevación de la superficie del relave. Además, los elementos nuevos de la malla que definen el relave en una cierta etapa se agregan con saturación inicial igual a 1.

Si bien, en relaves convencionales es esperable que la evaporación pueda secar el estrato superficial hasta la profundidad de extinción, siempre y cuando exista tiempo suficiente entre cada activación del mismo sector de depositación, en este trabajo se considera que el tiempo de reactivación de un sector de depositación es relativamente corto.

La condición de un relave totalmente saturado entrega estimaciones más conservadoras del flujo de infiltración para una evaluación ambiental. Sin embargo, dependiendo de la distancia a la que se ubica la laguna y la pendiente del relave, existen casos donde esta condición puede generar flujos hacia la laguna, de forma que el modelo finalmente reporte flujos de salida desde esta última, en vez de flujos de infiltración.

Cuando esto ocurre, es indicativo de que una parte importante del flujo infiltrado en el depósito de relave es responsable de la generación de la laguna, en una proporción comparable o mayor a la del flujo que la alcanza de forma superficial durante la descarga de relave. Para este trabajo se mantiene la hipótesis de un relave totalmente saturado, verificando que la laguna posteriormente genere una infiltración hacia el acuífero.

Por otro lado, para representar el flujo desde la laguna sobre la superficie del relave y del terreno natural, se agregan condiciones de carga hidráulica igual a la cota de la laguna en los nodos correspondientes.

La Figura 5.20 presenta la distribución de las condiciones de borde H_0 utilizadas para el relave fuera de la laguna (verde musgo) y las condiciones de borde para definir la cota de la laguna (azul) en el año 20 para ambos modelos.

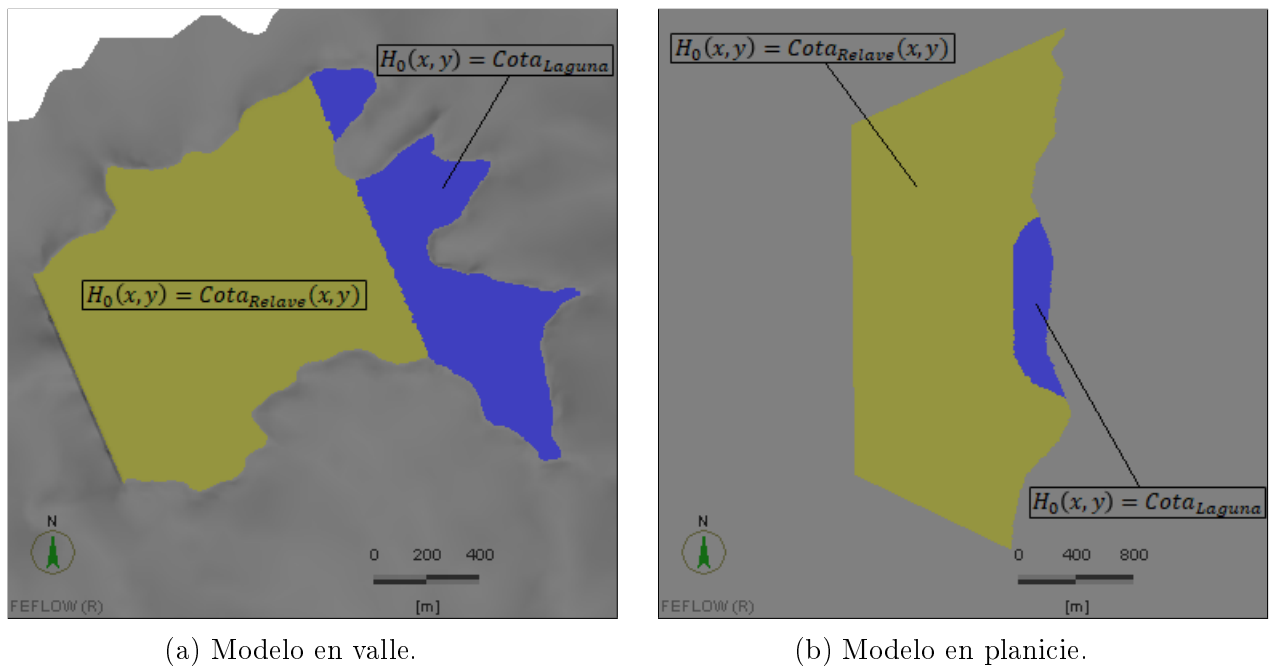


Figura 5.20: Distribución condiciones de borde del tipo carga hidráulica para representar el relave saturado y la laguna de aguas claras.

Capítulo 6

Simulación Modelos Numéricos

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el trabajo de memoria. Los resultados se separan en dos periodos de evaluación: 1 y 20 años de simulación.

En primera instancia, se simulan los modelos para un valle y una planicie, en un periodo de un año de operación. De esta forma se verifica el comportamiento de cada uno de los modelos y se obtienen resultados preliminares de la simulación para la totalidad de operación. Para el primer año, se compararon tres casos para representar el crecimiento del relave:

- Una etapa súbita e inicialmente saturada con una extensión igual a la del depósito al final del periodo representado, utilizando parámetros hidráulicos constantes durante toda la etapa.
- Múltiples etapas representativas de periodos más pequeños que la duración de la etapa entera.
- Una sola etapa pero representando el crecimiento gradual del depósito dentro de la etapa con un cambio en las propiedades hidráulicas.

Es este último método, el que corresponde al principal aspecto analizado en la memoria, puesto que se busca establecer si este tipo de representación proporciona ventajas computacionales, y sobre todo, resultados más representativos del flujo de infiltración que se obtendría en una representación explícita y continua del crecimiento del relave en el modelo.

Las conclusiones que se obtienen para el análisis del primer año de operación se consideran válidas para la representación de la evolución del depósito y de la laguna para las simulaciones del periodo total de 20 años. Estas simulaciones buscan evaluar las variaciones del flujo de infiltración frente a los siguientes casos:

- Variación de la infiltración dado la cantidad de etapas utilizadas en la representación del crecimiento del depósito.
- Análisis de sensibilidad al valor inicial seleccionado para la conductividad hidráulica del relave en el modelo numérico.
- Análisis de sensibilidad de la infiltración frente a cambios de la conductividad hidráulica

saturada del relave.

- Análisis de sensibilidad de la infiltración frente a cambios de la conductividad hidráulica saturada de la unidad hidrogeológica de sedimentos.

Durante las simulaciones es posible que el nivel freático aumente hasta la cota de la superficie, indicando zonas de afloramiento en el modelo. En FEFLOW, esta salida de flujo se representa imponiendo una condición de borde de carga hidráulica igual a la cota de la superficie en todo el periodo de simulación. Si no se define esta condición de borde, en los nodos correspondientes aumentaría la presión por sobre la atmosférica, influenciando sobre el resultado del gradiente hidráulico y, por ende, en el flujo de infiltración. Dado que en la misma interfaz de FEFLOW es difícil evaluar cuándo ocurre el afloramiento dentro de una simulación, y así poder asignar la condición de borde y reanudar la simulación, se utiliza un interprete externo, en este caso Python, para realizar este trabajo. En Python se programa una rutina que evalúa, en cada paso de tiempo, si es que existe aumento de presión por sobre la atmosférica en los potenciales nodos donde podría aflorar agua durante la simulación y que asigne automáticamente la condición de borde, sin tener que detener la simulación de la etapa. En los Anexos C se presenta con mayor detalle la rutina programada.

6.1. Simulación 1 año

6.1.1. Comparación discretización depósito en 4 etapas vs 1 etapa

Los resultados obtenidos para las 3 formas de cómo representar el crecimiento del depósito, se presentan gráficamente en las siguientes figuras. En ellas se presentan los flujos y volúmenes acumulados de las tres componentes de infiltración al sistema (playa, laguna sobre relave y laguna sobre terreno natural) y el error numérico del sistema, obtenidos en la simulación de un año. El depósito es representando en 1 etapa, 4 etapas y en 1 etapa con conductividad variable en el tiempo. En las figuras tipo (a) y (b), se presentan las componentes que definen la infiltración al relave. Además, en estas figuras se agrega un inserto adicional (subgráfico) donde las mismas series se grafican en conjunto con la infiltración de la laguna sobre terreno natural para comparar las escalas de los flujos. En las figuras (c) y (d), referentes a la infiltración directa de la laguna sobre el terreno natural o acuífero, y el error numérico, se les agrega un inserto adicional para visualizar la escala de los máximos flujos registrados al inicio de cada etapa. Las variables y unidades de cada eje de los insertos son las mismas que en los gráficos base. La simulación en 4 etapas contempla aquellas correspondiente a 1, 2, 6 y 12 meses. En el caso de la planicie se utiliza el mes 3, reemplazando el mes 2.

En el caso del depósito en valle (Figura 6.1), con respecto al flujo de infiltración desde el relave fuera de la laguna (Figura 6.1a) se observa que la representación con 1 etapa y con conductividad hidráulica constante entrega un flujo prácticamente constante. Además, se observa que a medida que se aumenta el número de etapas, se obtiene una curva escalonada que converge similar al valor final de la etapa completa. Por otro lado, el modelo con conductividad variable representa un flujo que evoluciona gradualmente en ascenso y va acercándose al flujo final de cada etapa en la representación discreta con conductividad constante. Esto permite inferir que si la representación por etapas, pero utilizando conductividad constante, considerase un alto número de etapas, ésta se acercaría gradualmente a la curva que define la representación con conductividad variable, como alternativa para simular

el crecimiento continuo. Al mismo tiempo, esta figura permite apreciar que el flujo desde el relave en comparación con la laguna es considerablemente menor para este periodo inicial de operación.

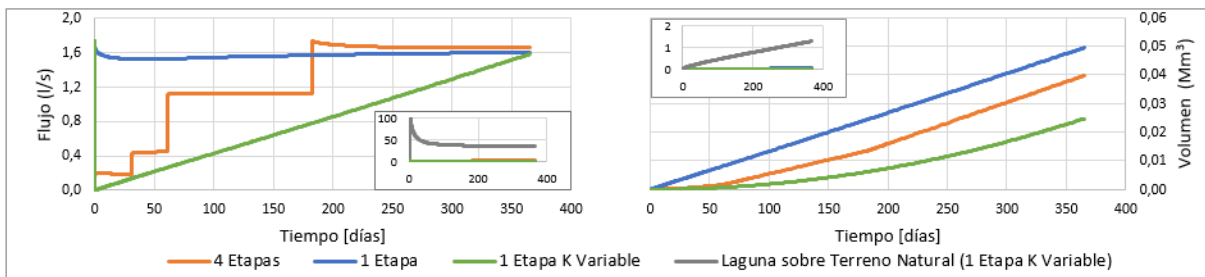
En términos de volumen, se observa que el aumento en el número de etapa, reduce el volumen total infiltrado, por lo que se puede considerar que la representación con conductividad variable, como alternativa al crecimiento gradual, debiese ser una estimación más consistente y probablemente similar a la que se obtendría con un gran número de etapas. Lógicamente, la diferencia en flujo respecto de la entrada por la laguna, genera una diferencia considerable también en términos del volumen. Esto demuestra que el flujo dadas las condiciones del sistema y del depósito, está dominado por la laguna.

Con respecto al flujo de infiltración desde la laguna sobre relave (Figura 6.1b), el análisis es análogo a las entradas desde el relave fuera de la laguna. En términos de magnitud, esta componente es la menor entre todas las componentes del flujo de infiltración.

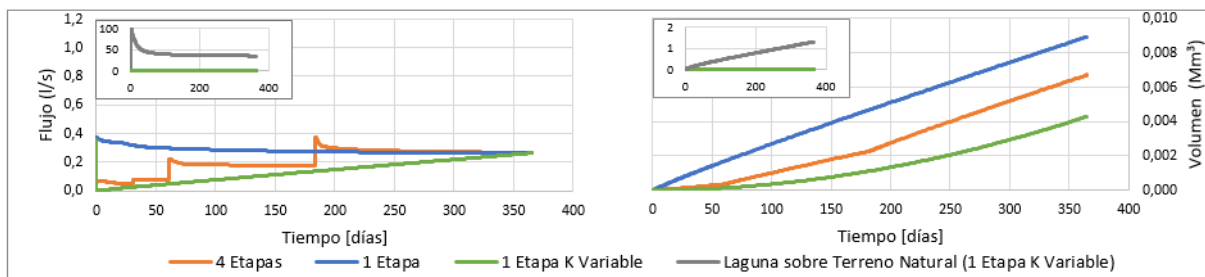
En la Figura 6.1c se observa el detalle del inserto incluido en las figuras a y b. Esta figura y su inserto muestran que el efecto de discretizar en un mayor número de etapas genera flujos extremadamente altos pero en intervalos de tiempo muy cortos, cuando se activa cada etapa. Por otro lado, la representación gradual del crecimiento del depósito no presenta diferencias frente a la etapa con conductividad constante. Las curvas de volumen muestran que los máximos de flujo en cada etapa no son relevantes dado que no hay quiebres apreciables en la curva del volumen, lo cual está asociado a que el tiempo en el que ocurren son muy cortos, determinados por el algoritmo de discretización temporal del modelo. En este caso específico, el volumen desde la laguna obtenido por el modelo con una sola etapa es mayor que aquel que se obtiene con una representación por etapas.

La Figura 6.1d muestra el error numérico, donde se aprecian flujos máximos al inicio de las etapas dado el acomodamiento del modelo frente a las nuevas condiciones de borde que definen las entradas al relave. También, se observa la lógica similitud para el caso de una etapa con conductividad constante y 1 etapa con conductividad variable, puesto que en términos de la laguna, estos casos sólo tienen como diferencial el flujo que infiltra sobre el relave en el tiempo. Si comparamos el volumen acumulado del error frente al total del flujo de infiltración al sistema, resulta ser significativamente menor correspondiente al 0,17% de ésta.

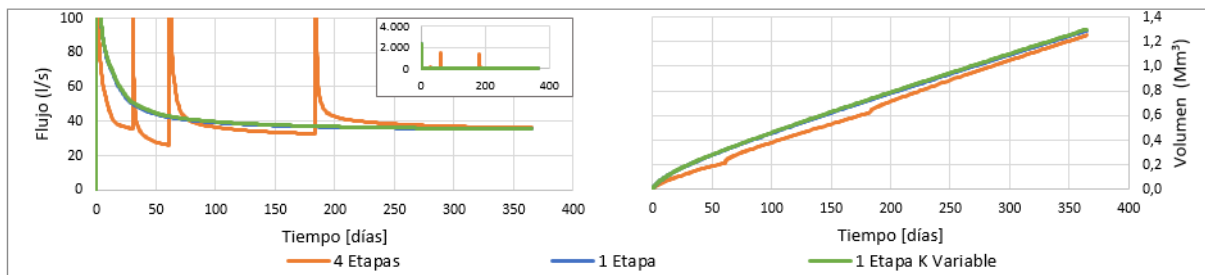
(a) Infiltración desde la playa del relave



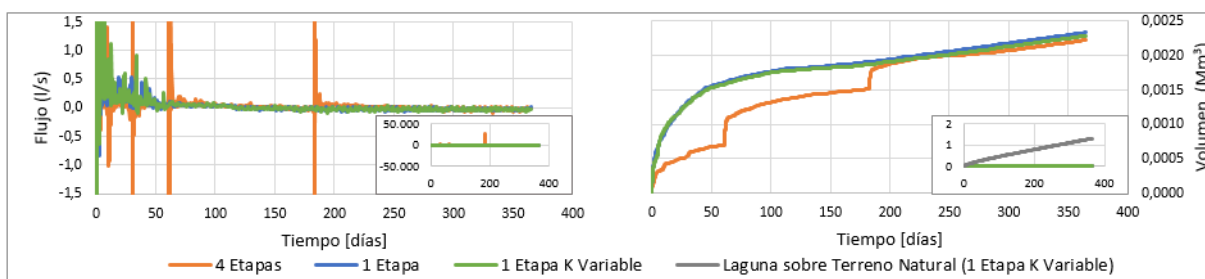
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



Nota: Las series 1 etapa y 1 etapa con K variable, para la infiltración desde la laguna sobre terreno natural, registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.1: Flujo y volumen acumulado para 1 año de simulación con discretización del crecimiento del depósito, modelo en valle.

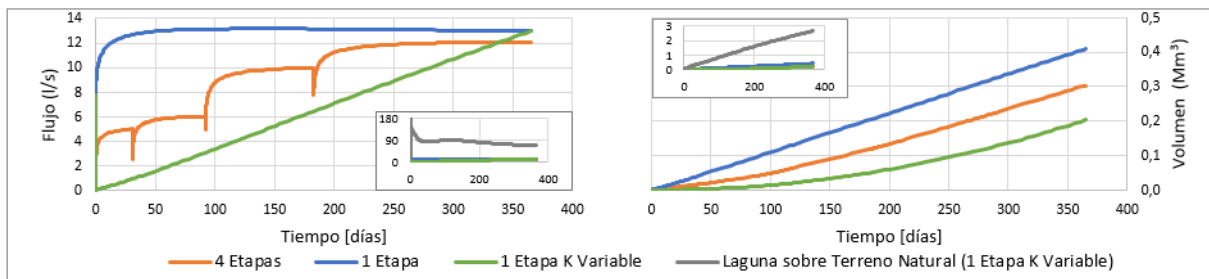
Por otro lado, en el depósito en planicie se observa el mismo comportamiento en la infiltración hacia el relave (Figuras 6.2a y 6.2b), infiriendo que la representación de una etapa con conductividad variable es semejante a una representación con un alto número de etapas con conductividad constante. Además, de los insertos de cada figura se observa que las entradas

son considerablemente menor al flujo que ingresa desde la laguna directamente al sistema hidrogeológico.

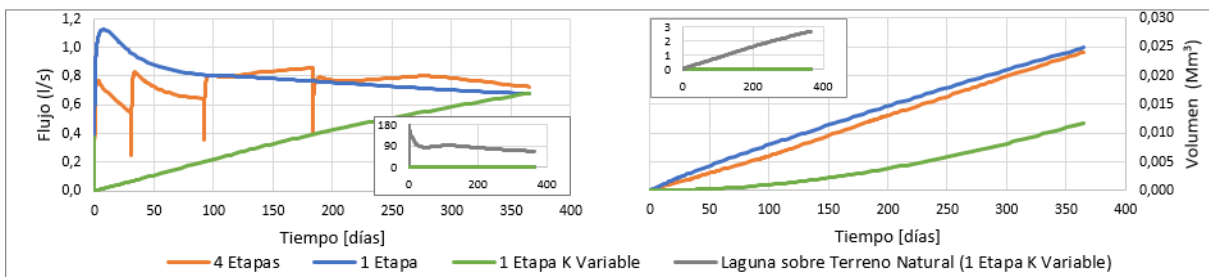
Con respecto a la infiltración desde la laguna sobre terreno natural (Figura 6.2c), se presenta el mismo comportamiento descrito para el caso del depósito en valle, registrando mayores flujos al inicio de cada etapa. Aún así, estos valores máximos no son relevantes en el modelo dado que no generan quiebres apreciables en la curvas del volumen acumulado, dado al corto tiempo en que estos se desarrollan.

Se observa el mismo comportamiento para el error numérico (Figura 6.2d), presentando flujos máximos al inicio de cada etapa dado el acomodamiento a las nuevas condiciones de borde. Del mismo modo, el volumen acumulado del error es significativamente menor frente al total del flujo de infiltración, correspondiente al 0,7 % de éste.

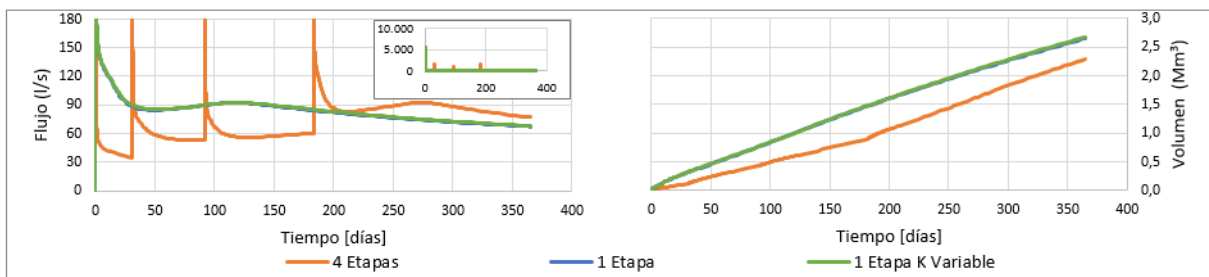
(a) Infiltración desde la playa del relave



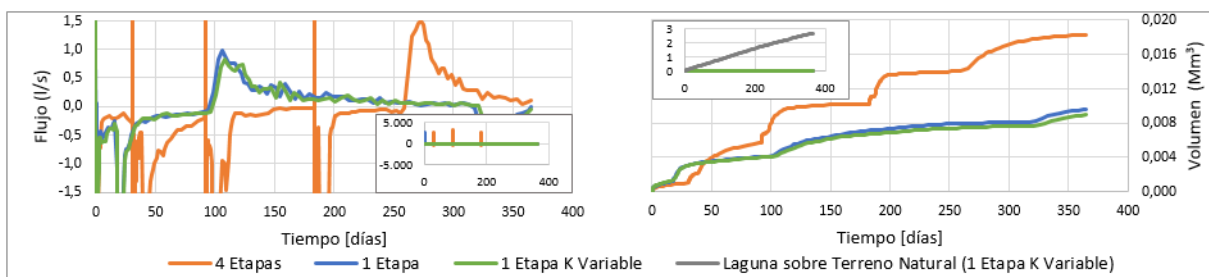
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



Nota: Las series 1 etapa y 1 etapa con K variable, para la infiltración desde la laguna sobre terreno natural, registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.2: Flujo y volumen acumulado para 1 año de simulación con discretización del crecimiento del depósito, modelo en planicie.

En ambos modelos, la infiltración desde la laguna sobre terreno natural es ampliamente mayor frente a las otras dos componentes del flujo al depósito, por lo que las diferencias en los flujos de infiltración al relave son despreciables. La laguna sobre terreno natural genera un domo de infiltración en el sistema hidrogeológico, ilustrado en la Figura 6.3 para ambos modelos. Para el caso del depósito en valle, el domo alcanza rápidamente el nivel freático

del sistema subyacente, aproximadamente en el día 2 de simulación de cada etapa, dado que se encuentra a poca profundidad y para el final del año se aprecia que todo el sistema se mantiene saturado. En el depósito en planicie, el domo de infiltración no alcanza el nivel freático en el año de simulación debido a la profundidad en que se encuentra en la condición inicial.

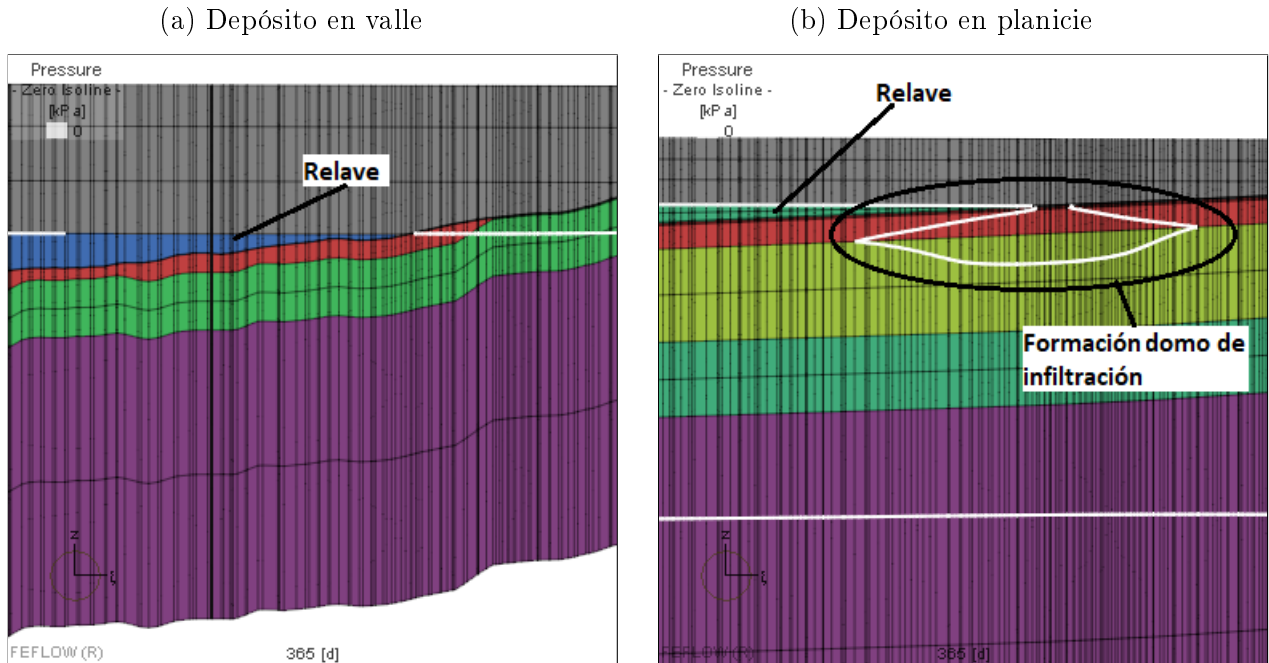


Figura 6.3: Nivel freático y domo de infiltración desde laguna sobre terreno natural al final del primer año.

6.1.2. Alternativas de representación de la laguna en cada etapa

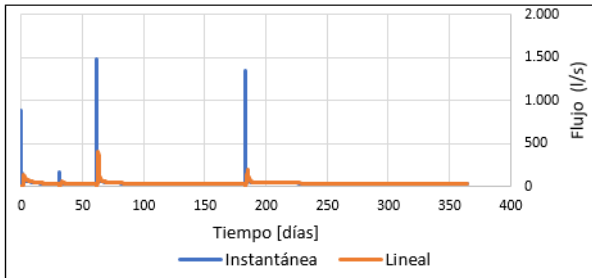
Dado que en el caso en que se represente la operación completa se requerirá de igual forma un número determinados de etapas para el crecimiento del depósito, es deseable reducir el error numérico observado en la infiltración desde la laguna hacia el sistema subyacente. El error de ese flujo está determinado por la súbita activación de las condiciones de borde de carga hidráulica que representa la laguna, y las condiciones de no saturación del suelo.

Para reducir entonces el error numérico se plantea una alternativa donde las condiciones de borde que representan la laguna en cada etapa se activan y aumentan su carga desde un valor cercano al nivel freático subyacente, hasta la cota de espejo de la laguna correspondiente a la etapa. Esto debiese minimizar el gradiente súbito que genera una representación donde las condiciones de borde se activan con el valor de la cota del espejo de la laguna desde el comienzo de la etapa.

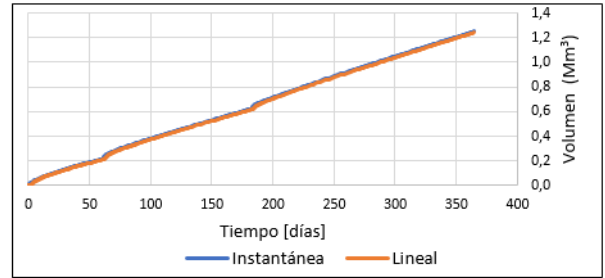
La Figura 6.4 presenta la variación de los flujos y volúmenes de la laguna hacia el terreno natural para el caso del depósito en valle. Se observa en las Figuras 6.4a y 6.4c que utilizar una carga variable lineal reduce significativamente el flujo máximo que se registra al inicio de cada etapa. Además, el volumen acumulado durante todo el periodo no registra cambios, indicando que el flujo medio en cada etapa no cambia si se utiliza cualquiera de las dos representaciones del nivel. Por otro lado, el error numérico del modelo (Figura 6.5) no presenta cambios

significativos entre ambas condiciones de borde, observando una reducción del volumen para el caso de una representación lineal.

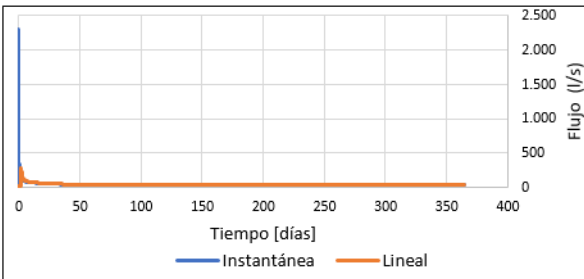
(a) Flujo desde la laguna, 4 etapas.



(b) Volumen desde la laguna, 4 etapas.



(c) Flujo desde la laguna, 1 etapa.



(d) Volumen desde la laguna, 1 etapa.

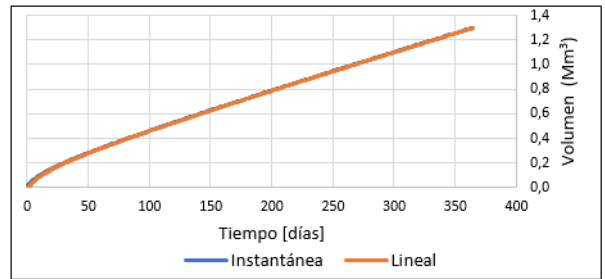
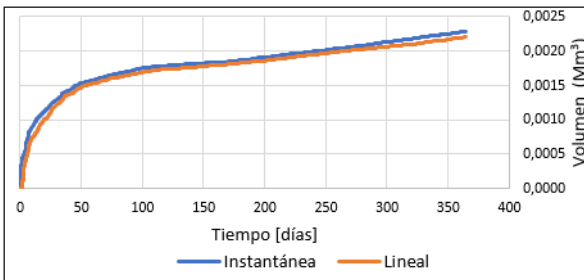


Figura 6.4: Variación de la infiltración desde la laguna hacia terreno natural, en unidades de flujo y volumen, considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en valle.

(a) Error numérico, 4 etapas.



(b) Error numérico, 1 etapa.

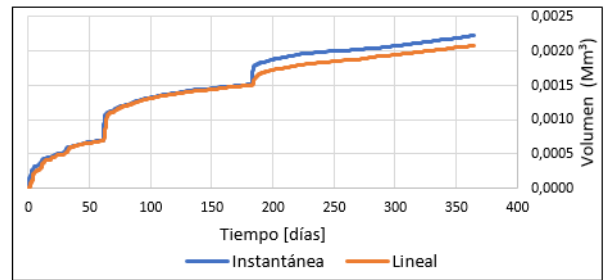
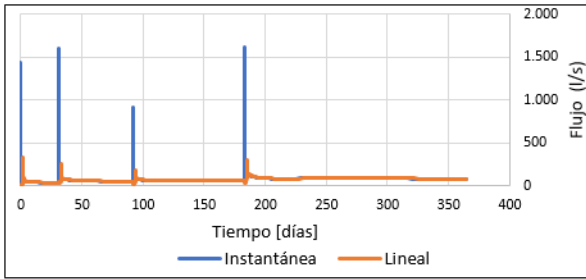


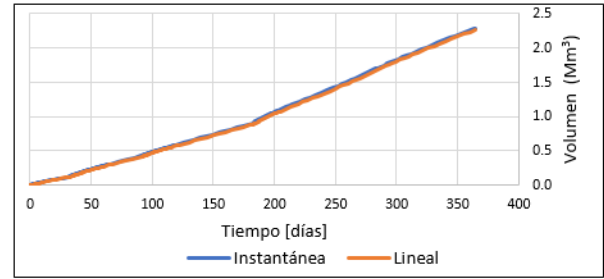
Figura 6.5: Variación del error numérico en unidades de Volumen considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en valle.

En la Figura 6.6, la cual presenta la variación de los flujos y volúmenes de la laguna hacia el terreno natural para el caso del depósito en planicie, se observa las mismas variaciones con respecto al flujo, presentando una reducción significativa del flujo al representar la laguna con una condición de borde variable, sin observar cambios en el volumen acumulado. Por otro lado, el error numérico del modelo (Figura 6.7) no presenta cambios significativos entre ambas condiciones de borde, y tampoco se observa una tendencia clara con el cambio de volumen del error, sin poder indicar si existe o no reducción al considerar alguna de las dos alternativas.

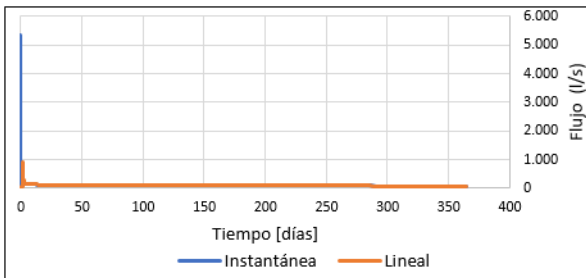
(a) Flujo desde la laguna, 4 etapas.



(b) Volumen desde la laguna, 4 etapas.



(c) Flujo desde la laguna, 1 etapa.



(d) Volumen desde la laguna, 1 etapa.

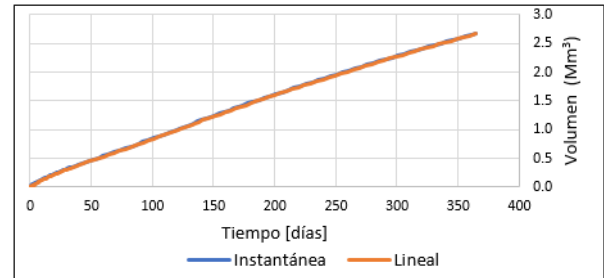
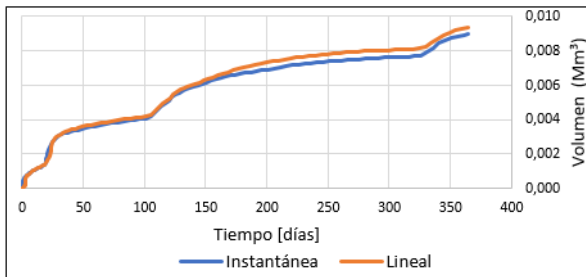


Figura 6.6: Variación de la infiltración desde la laguna hacia terreno natural, en unidades de flujo y volumen, considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en planicie.

(a) Error numérico, 4 etapas.



(b) Error numérico, 1 etapa.

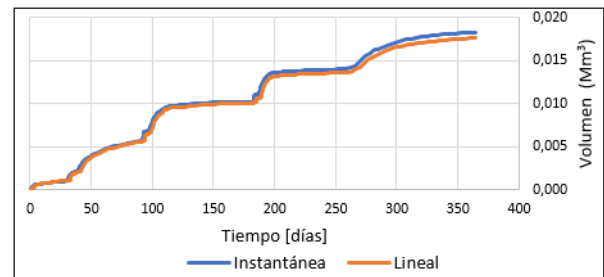


Figura 6.7: Variación del error numérico en unidades de Volumen considerando crecimiento instantáneo y lineal de la laguna, depósito en planicie.

Dado que se observó una reducción importante en el flujo de infiltración máximo registrado de laguna hacia el acuífero, sin que éste afecte el volumen total infiltrado, indica que la utilización de una partida gradual, pero rápida de la laguna en cada etapa, se considera preferible frente a la aparición súbita de la misma.

6.2. Simulación 20 años

Dado los resultados obtenidos en la simulación de 1 año de operación, para el caso en que se considera la operación completa de los depósitos (20 años), se utilizan los siguientes criterios para representar el depósito de relaves en los modelos.

- Se comparan sólo dos tipos de representación. Aquella que considera un número elevado de etapas utilizando una conductividad hidráulica y áreas constantes, y otra que utiliza solo 4 etapas, con el área equivalente de la fecha final de la etapa con conductividad variable dentro de ella para representar el crecimiento gradual del relave.
- En el caso en que se utiliza conductividad hidráulica variable, se considerará un valor inicial igual al 1% del valor representativo del relave. Esto equivale a considerar un área inicial mínima del 1%.
- Para la laguna sobre terreno natural, las condiciones de borde (carga hidráulica) que la representan, varían en un periodo de 2 días, hasta la cota del espejo de la laguna correspondiente a la etapa. Con el fin de definir un criterio reproducible para el valor de la carga inicial, se selecciona el máximo valor original de carga hidráulica en el conjunto de nodos que la representa, antes de activar la laguna.

Al igual que en la simulación del año 1, los resultados se presentan gráficamente, incorporando el flujo y el volumen acumulado de las tres componentes de la infiltración y el error numérico del modelo. En las figuras tipo (a) y (b), se agregan insertos donde las series se compararan con la infiltración desde la laguna sobre terreno natural del caso base, y en las figuras (c) y (d), se agregan insertos para visualizar la escala de los máximos flujos registrados al inicio de cada etapa.

6.2.1. Comparación discretización crecimiento del depósito

Para evaluar la influencia de la representación del crecimiento del depósito de relaves sobre la infiltración, en la simulación de 20 años, se definen 4 y 14 etapas, para el caso del modelo en valle, y en 4 y 13 etapas para el modelo en planicie.

Para el caso del depósito en valle, en la Figura 6.8a se observa que la representación en 14 etapas y con conductividad variable resulta en una curva escalonada semejante a la configuración en 4 etapas pero con conductividad variable. Se observa que los valores finales de cada etapa, en la representación en 14 etapas, se acercan a la curva con crecimiento gradual de la conductividad. Por otro lado, durante todo el periodo se observa flujos medios similares, debido a la semejanza en las curvas de volumen acumulado. Dada a la similitud entre estas dos representaciones, las conclusiones obtenidas en la simulación de 1 año se repiten, infiriendo que el aumentar el número de etapas con conductividad constante logrará obtener la misma curva que de considerar un aumento gradual de la conductividad. Por otro lado, el flujo de infiltración desde el relave, a medida que aumenta el tiempo, adquiere mayor importancia con respecto al flujo de infiltración de la laguna sobre terreno natural.

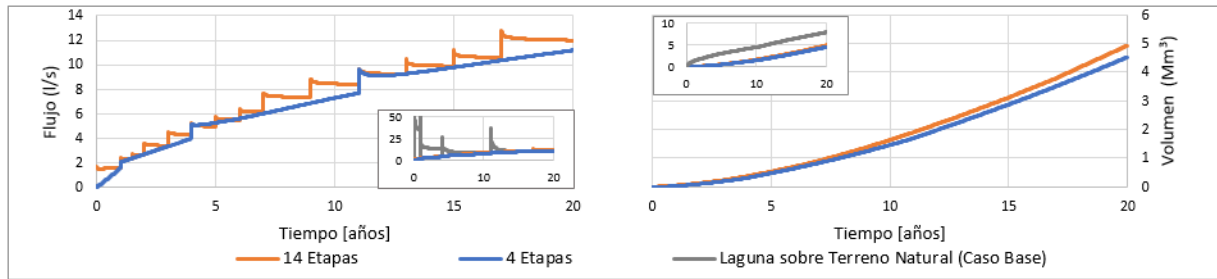
En la Figura 6.8b se observa que al inicio de cada etapa el flujo que infiltra hacia el depósito desde la laguna sobre relave presenta una baja con respecto al valor final de la etapa anterior. Esto ocurre debido a que parte de la laguna queda definida en la superficie nueva de la etapa,

que parte con conductividad del 1 % del valor final. Al igual que en la simulación de 1 año, esta componente corresponde a la menor de todas.

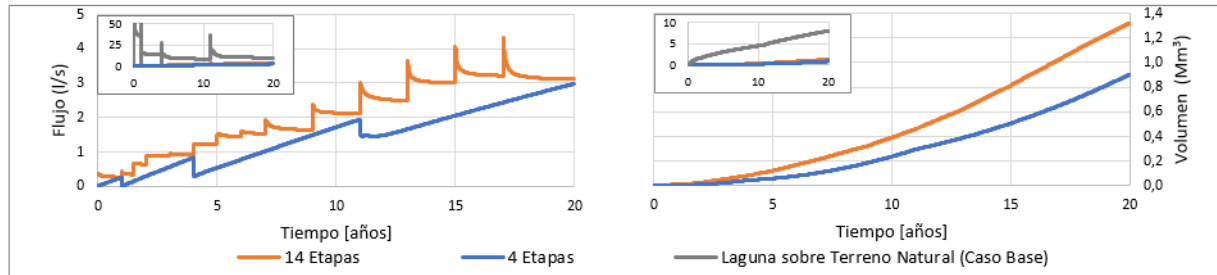
El flujo de infiltración desde la laguna sobre el terreno natural (Figura 6.8c) está condicionado por el momento donde la laguna deja de estar sobre sedimento, cercano al año 9 de simulación. En la representación con 4 etapas, la tercera etapa, que usa la huella final del año 11, la laguna queda sobre la unidad de roca fracturada, por lo que se subestima este flujo en todo ese periodo. Esto podría resolverse por ejemplo, teniendo cuidado de definir las etapas de modo que una de ellas considere una huella de relave con la laguna justo antes del fin de la unidad de sedimentos. Aún así, se observan valores finales semejante para el flujo de infiltración desde la laguna para ambos casos, que sumado a la eliminación del elevado número de flujos máximos, son razones relevantes para preferir una representación con menos etapas. Por otro lado, el domo de infiltración alcanza rápidamente la profundidad del nivel freático del suelo, observando valores constantes en la infiltración.

En la Figura 6.8d, al igual que en el caso de la simulación de 1 año, se registran valores máximos al inicio de cada etapa por el acomodamiento del modelo a las nuevas condiciones de borde. Aún así, el volumen del error numérico es despreciable frente a la infiltración total, resultando menores al 0,1 % de ésta.

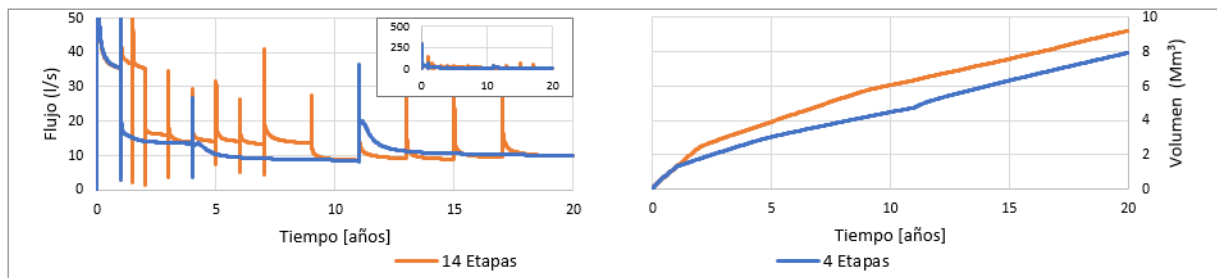
(a) Infiltración desde la playa del relave



(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo

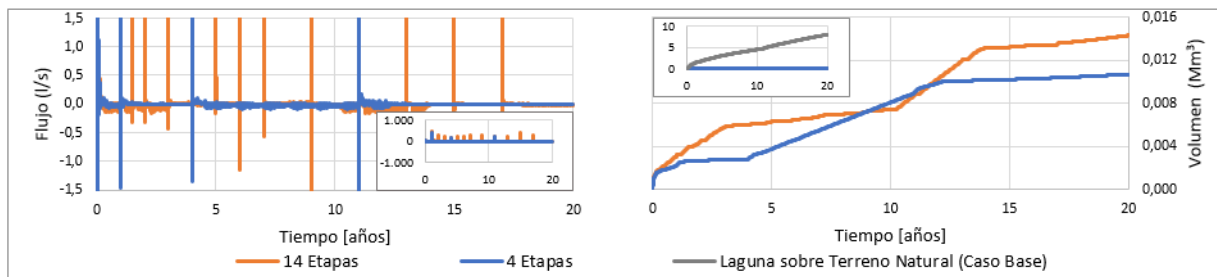


Figura 6.8: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando variación en la discretización de etapas del depósito, modelo en valle.

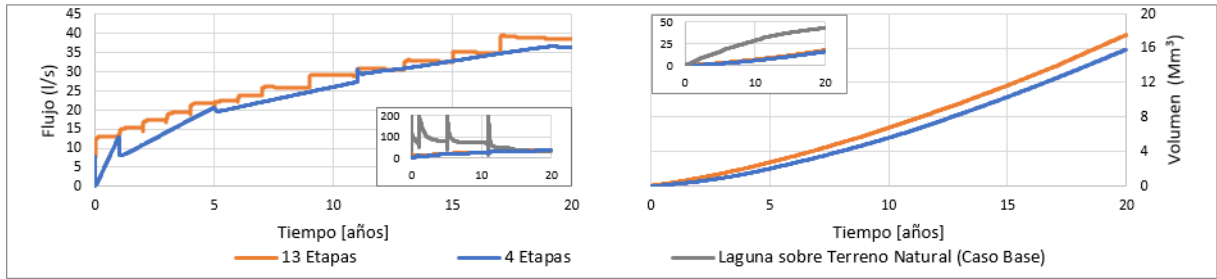
Para el depósito en planicie (Figura 6.9), se obtienen resultados similares a los presentados anteriormente. Por un lado, el flujo de infiltración hacia el relave sin laguna (6.9a) presenta la misma forma escalonada, semejante a los valores obtenidos de una representación gradual del crecimiento. Además, no hay una variación importante del volumen acumulado por esta componente de la infiltración total.

En la Figura 6.9b se observa el mismo efecto presentado en el depósito en valle, con la diferencia de que en este caso toda la laguna sobre relave queda definida en la superficie de relave de la nueva etapa, donde el flujo desciende a valores cercanos a 0 l/s. Aún así, este efecto no es relevante dada la magnitud del flujo comparado con las otras dos componentes de la infiltración al sistema, observado en el inserto.

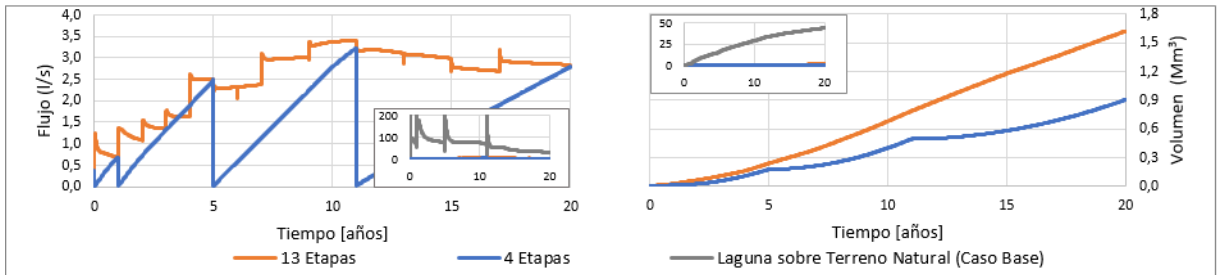
En la Figura 6.9c presenta tres valores constantes que se alcanzan a medida que se saturan las unidades hidrogeológicas de sedimentos modernos, antiguos y roca fracturada. A diferencia del modelo anterior, los flujos son semejantes entre ambos casos, dado que no se definen nodos sobre unidades de roca, presentando diferencias debido a la velocidad de la saturación de las unidades hidrogeológicas, impuesta por la cota del espejo de la laguna.

En la Figura 6.9d, el error numérico presenta leves aumentos del flujo en los instantes en que el domo de infiltración, generado por la laguna, comienza a penetrar una nueva unidad hidrogeológica. Aún así, el error numérico del modelo es insignificante frente a la infiltración total, representando el 0,26 % del volumen acumulado total.

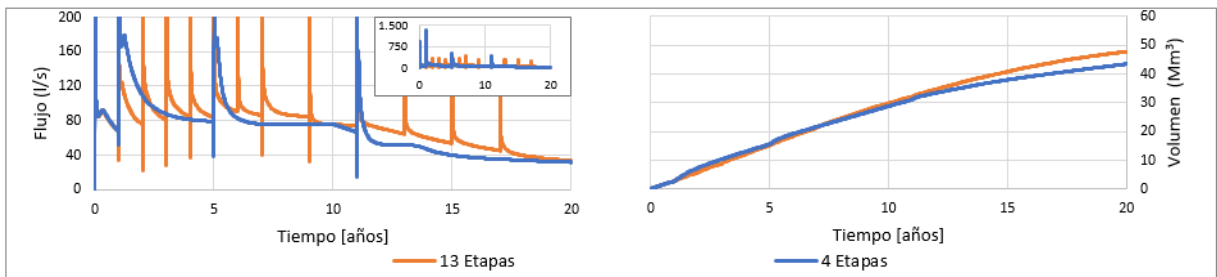
(a) Infiltración desde la playa del relave



(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo

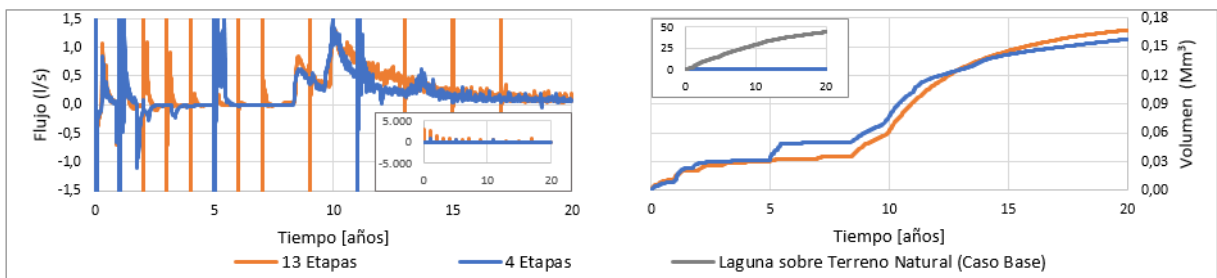


Figura 6.9: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando variación en la discretización de etapas del depósito, modelo en planicie.

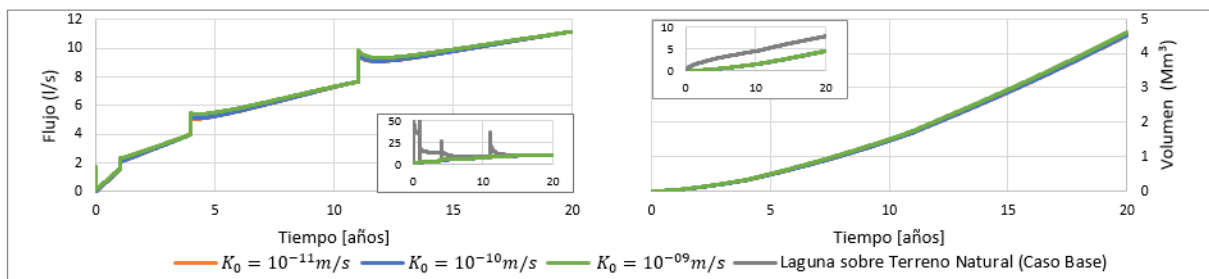
6.2.2. Análisis de sensibilidad con respecto al valor inicial de la conductividad del relave

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos de la simulación de los 20 años de operación considerando dos valores alternativos para el que se utiliza como punto de partida de la conductividad hidráulica del relave. Es importante mantener presente que este valor equivale al área inicial de relave en cada etapa, el que no se ha fijado en cero para evitar inestabilidades numéricas. Los valores considerados corresponden al 10 % ($K_0 = 10^{-9}$ m/s) y 0,1 % ($K_0 = 10^{-11}$ m/s) de la conductividad final del relave.

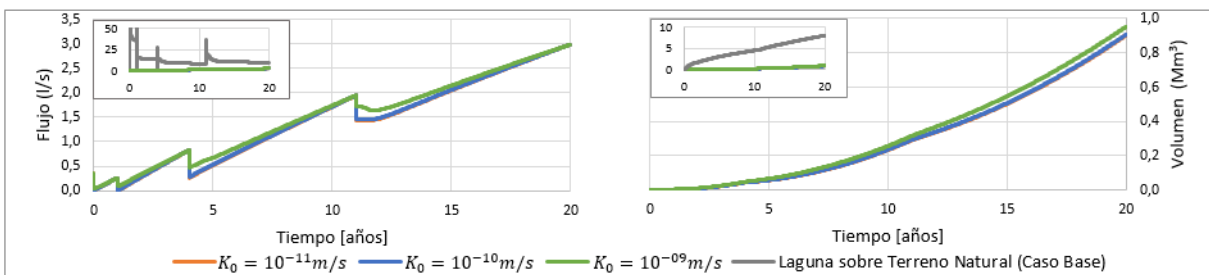
En el caso del depósito en valle, en las Figuras 6.10a y 6.10b se observan diferencias mínimas en la infiltración al relave. Por un lado, los valores para los conductividad inicial del 0,1 y 1 % de la conductividad final, los flujos obtenidos son prácticamente iguales, resultando ser levemente menor el flujo inicial observado para el caso de $K_0 = 10^{-11}$ m/s. Por otro lado, para el valor inicial del 10 % ya se observa una diferencia leve en los flujos al inicio de cada etapa, con mayor claridad en la Figura 6.10b, donde se ve afectado el volumen final. Aún así, hay que resaltar que la variación es despreciable frente a la escala de los flujos de infiltración, por ejemplo, en la Figura 6.10a no se observa en detalle la diferencia que se registra al considerar los 3 valores de K_0 , y en la escala de sus respectivos insertos, no se visualiza la diferencia frente a la infiltración desde la laguna sobre terreno natural.

Por otro lado, la infiltración directa de la laguna sobre el terreno natural no presenta variaciones (Figura 6.10c), resultado esperable dado que no se modifican parámetros relevantes al suelo o que puedan ejercer algún efecto sobre el gradiente hidráulico. Además, el error numérico del modelo no presenta variaciones importantes frente a los 3 valores utilizados para el valor inicial de la conductividad (Figura 6.10d).

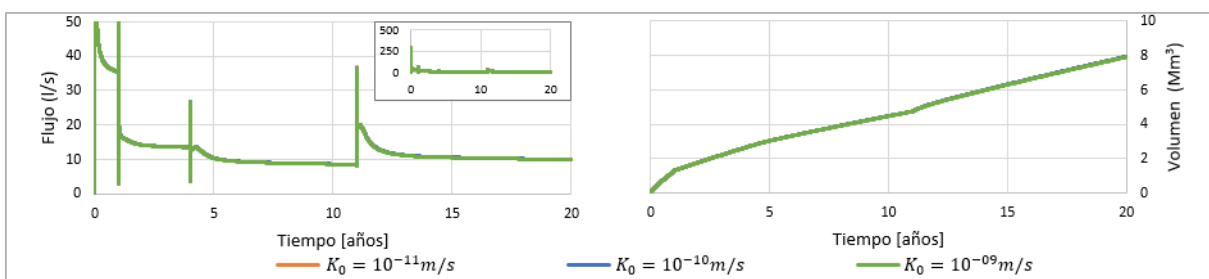
(a) Infiltración desde la playa del relave



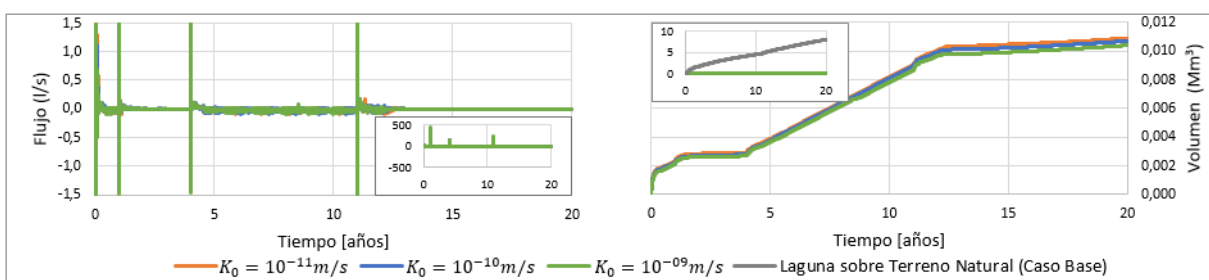
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



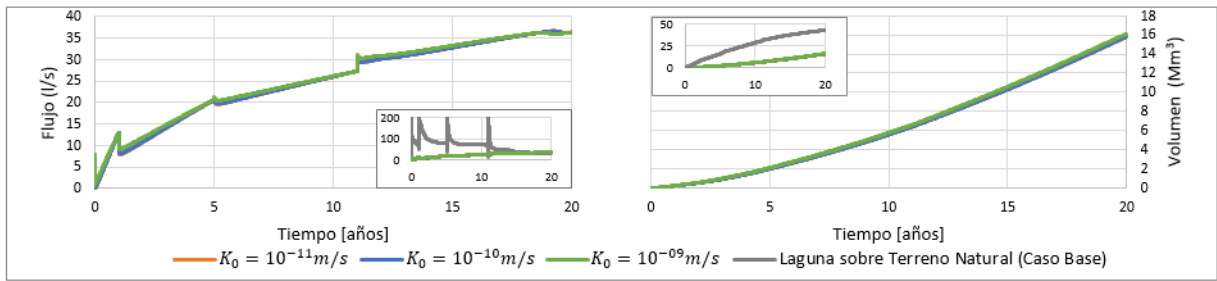
Nota: Las series registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.10: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en el valor inicial de la conductividad hidráulica del relave, modelo en valle.

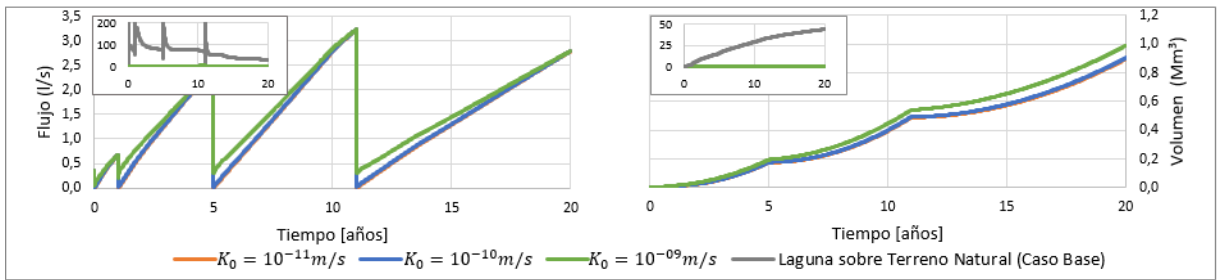
En el modelo de la planicie (Figura 6.11), se observan las mismas variaciones de los flujos de infiltración desde el relave frente al cambio del valor inicial de la conductividad hidráulica, resultando que la mayor diferencia ocurre al utilizar una conductividad inicial del 10 %. Esta diferencia se visualiza con mayor detalle en la Figura 6.11b, donde el volumen se ve afectado frente al aumento del K_0 . Aún así, esta variación no se observa en la escala de su inserto.

Además, el flujo de infiltración desde la laguna sobre terreno natural y el error numérico no presentan variaciones.

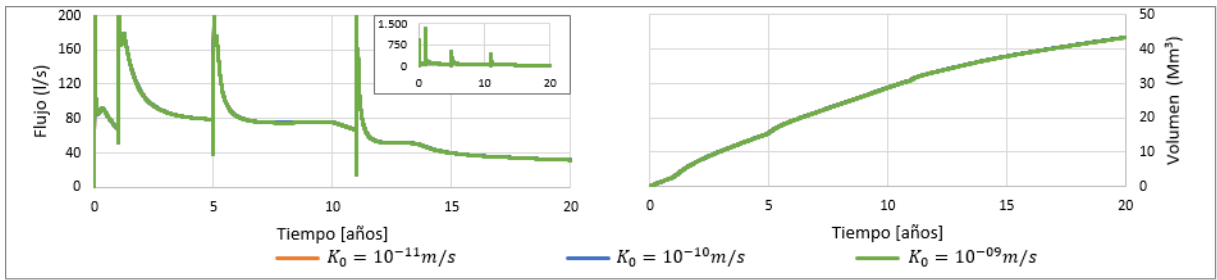
(a) Infiltración desde la playa del relave



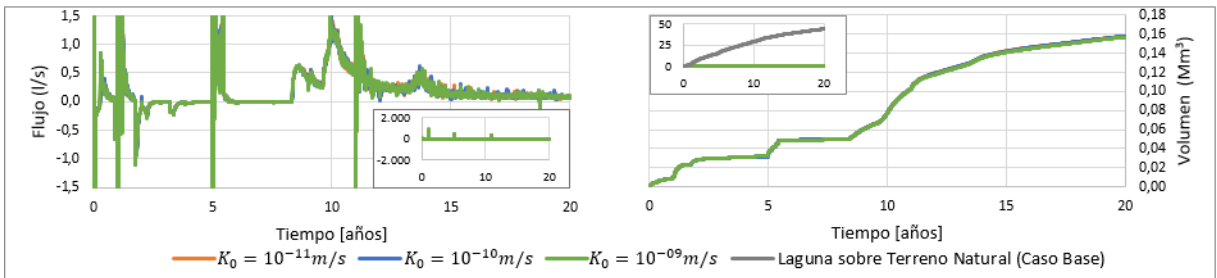
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



Nota: Las series registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.11: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en el valor inicial de la conductividad hidráulica del relave, modelo en planicie.

Por ende, dado que no hay variaciones importantes en el volumen total de la infiltración, se infiere que usar un valor del 1 % de la conductividad hidráulica final, equivalente a partir la simulación con un área de 1 % del total, es adecuado. A partir de considerar el 10 % se generan diferencias mínimas en los flujos, pero que son evitables en la simulación.

6.2.3. Variación en la conductividad hidráulica del relave

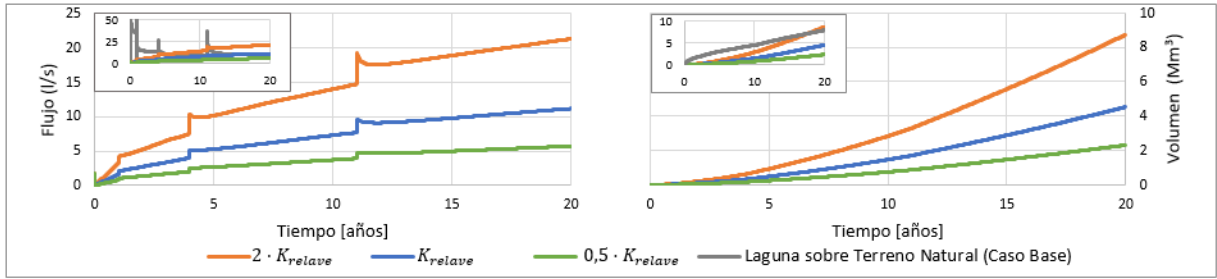
Las Figuras 6.12 y 6.13 presentan los resultados obtenidos de la simulación de los 20 años de operación considerando aumentar al doble y disminuir a la mitad la conductividad representativa del relave, para los depósitos en valle y planicie respectivamente.

Para el caso del depósito en valle, en la Figura 6.12a y 6.12b se observa que los flujos de infiltración al relave se ponderan con el cambio de la conductividad hidráulica del mismo. Además, es posible que el flujo de infiltración desde el relave adquiera mayor importancia frente a la infiltración desde la laguna sobre terreno natural, como es observado en la 6.12a, donde un aumento por 2 de la conductividad representativa del relave genera un mayor flujo de la misma con respecto a la laguna. Por lo tanto, una representación apresurada o errónea de la caracterización de la conductividad representativa del relave afecta proporcionalmente al flujo de infiltración.

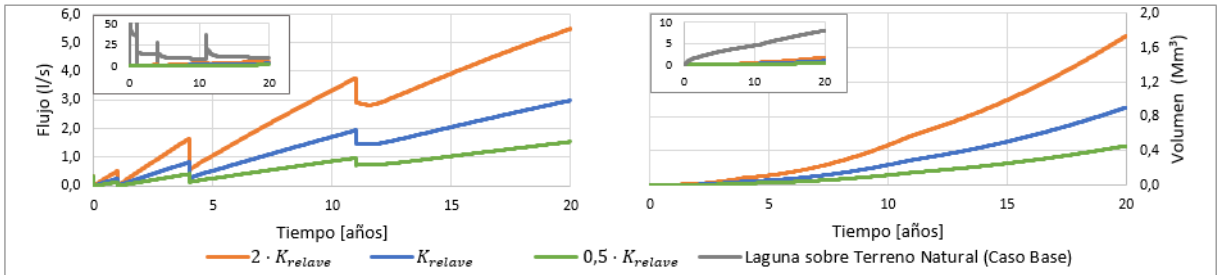
En la Figura 6.12c, la entrada desde laguna hacia el terreno natural se mantienen similares al caso base, presentando una leve variación contrario al aumento o disminución a la conductividad del relave debido al grado de saturación del sistema y la disminución o aumento del gradiente hidráulico.

Por otro lado, el error numérico del modelo (Figura 6.12d) no presenta mayores variaciones frente al caso base, manteniendo valores bajos frente al volumen total de las entradas de flujo.

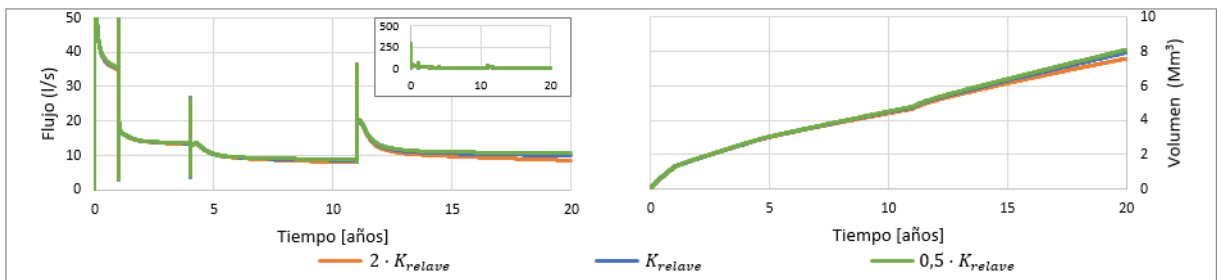
(a) Infiltración desde la playa del relave



(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo

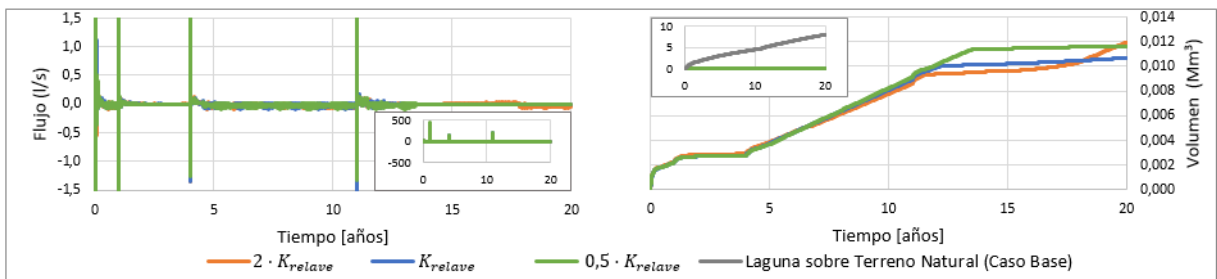
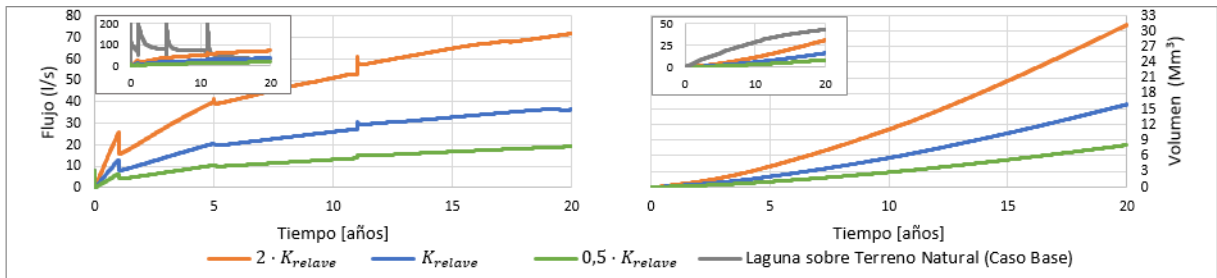


Figura 6.12: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica del relave, modelo en valle.

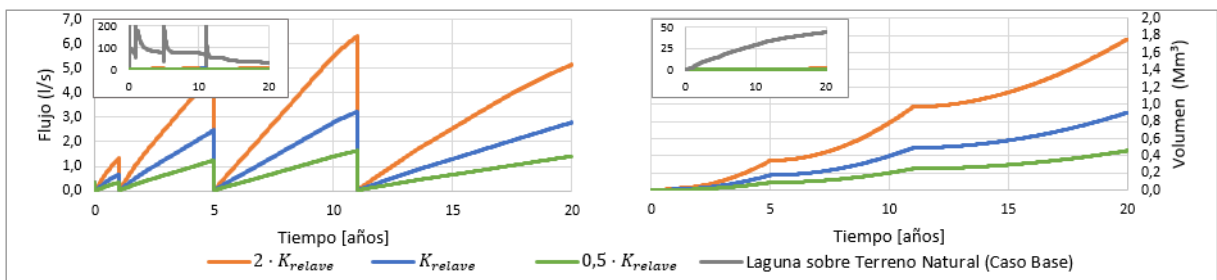
Para el caso del depósito en planicie, se observa el mismo comportamiento registrado para las 3 componentes del flujo de infiltración. Además, es necesario precisar que un cambio menor en la conductividad representativa del relave, como el considerado de $2 \cdot 10^{-8}$ en vez de $1 \cdot 10^{-8}$ m/s podría hacer que el flujo desde el relave sea en algún momento del crecimiento, similar o mayor al de la laguna, como se observa en la Figura 6.13a.

Por otro lado, al igual que en el otro modelo, el error numérico del modelo en la Figura 6.13d no presenta variaciones importantes entre los casos definidos.

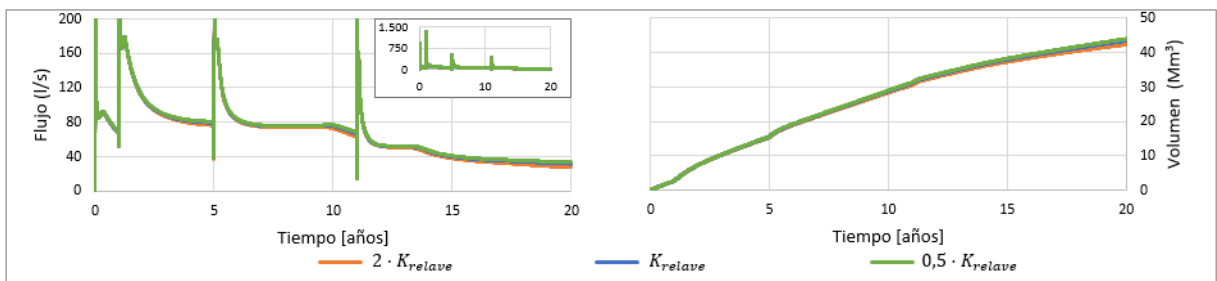
(a) Infiltración desde la playa del relave



(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo

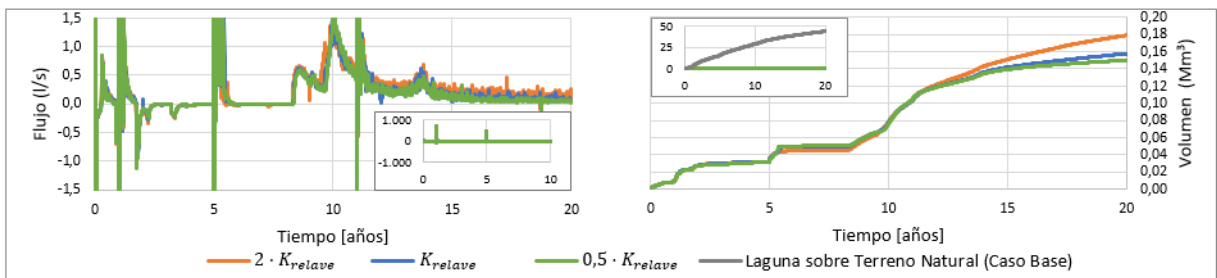


Figura 6.13: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica del relave, depósito en planicie.

6.2.4. Variación en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos

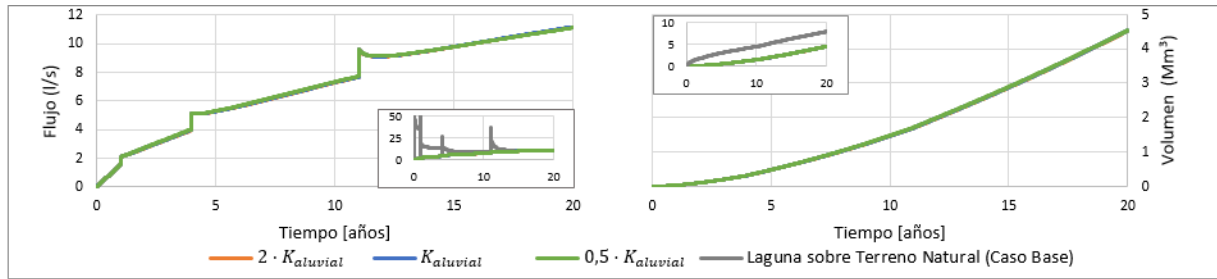
Las Figuras 6.14 y 6.15 presentan los resultados obtenidos de la simulación de los 20 años de operación considerando aumentar al doble y disminuir a la mitad la conductividad de la unidad de sedimentos aluviales, considerado en el modelo conceptual, para los depósitos en valle y planicie, respectivamente.

Para el depósito en valle, en la Figura 6.14a, lógicamente, no se observan variaciones frente al cambio de la conductividad de la unidad de sedimentos. Pero, en la Figura 6.14b se observa un descenso en la última etapa de la infiltración desde la laguna sobre el relave para el caso con menor conductividad de la unidad de sedimentos. Esto se explica dado que el sistema subyacente al depósito alcanza un mayor grado de saturación frente a los otros dos casos, reduciendo el gradiente hidráulico en la zona donde se ubica la laguna sobre relave.

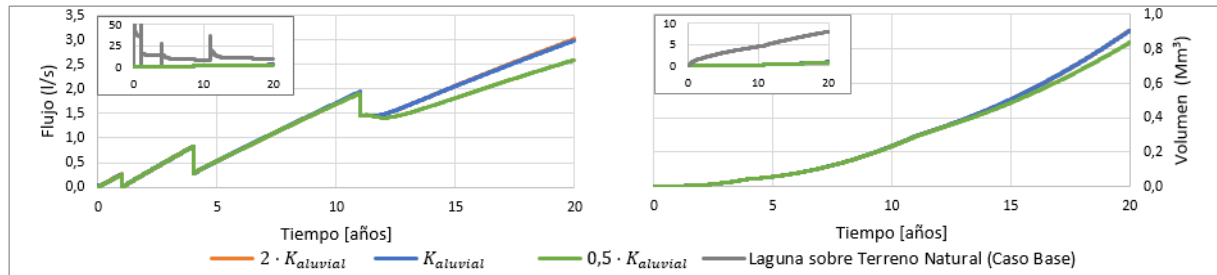
En la Figura 6.14c, para la infiltración de la laguna sobre terreno natural se observa que para las primeras 2 etapas hay un cambio significativo de los flujos, mientras que las 2 últimas etapas las variaciones son pequeñas. Esto se debe principalmente al traslado de la laguna desde la unidad de sedimentos hacia la unidad de roca. Entonces, para las 2 primeras etapas, la laguna presenta nodos definidos sobre la unidad de sedimentos y para las últimas 2 ya no se definen nodos, por lo que no se observan variaciones debido al cambio de la conductividad. En las últimas etapas se observan variaciones atribuibles al aumento o descenso del gradiente hidráulico bajo la zona definida para la laguna.

En la Figura 6.14d, el volumen acumulado del error numérico del modelo, para el caso con aumento de la conductividad, presenta un aumento considerable frente a los otros dos casos. A pesar de esto, el error sigue siendo considerablemente menor frente al volumen total de la infiltración, correspondiente al 0,26 % del volumen para el caso con mayor conductividad.

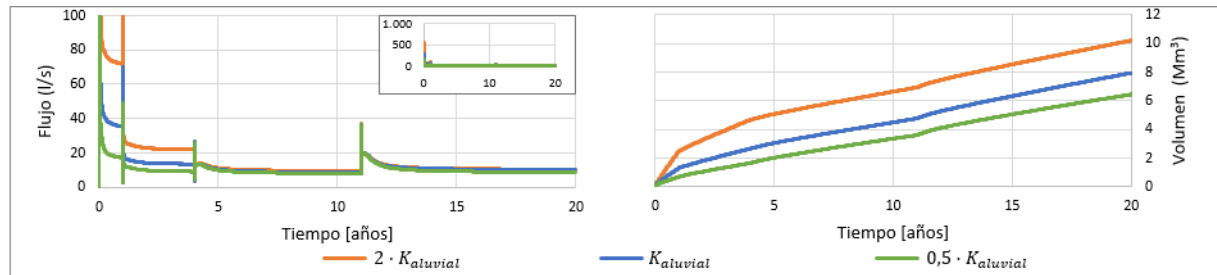
(a) Infiltración desde la playa del relave



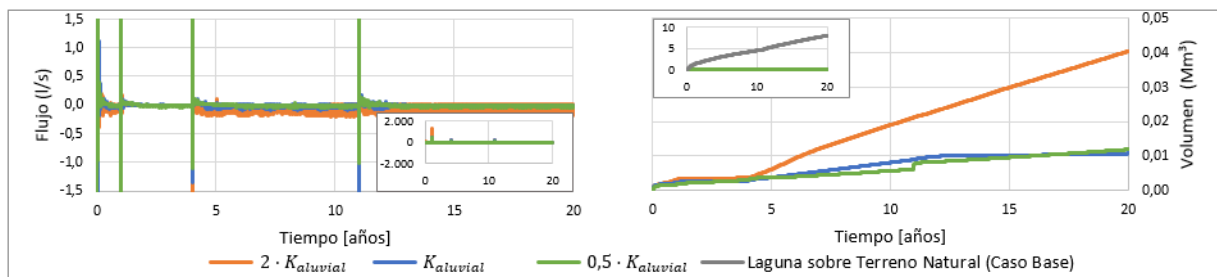
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



Nota: Las series registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.14: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos, modelo en valle.

Para el caso del depósito en planicie, se observa el mismo comportamiento para la infiltración al relave desde la zona sin laguna (Figura 6.15a), donde no se visualizan variaciones frente al cambio de la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos.

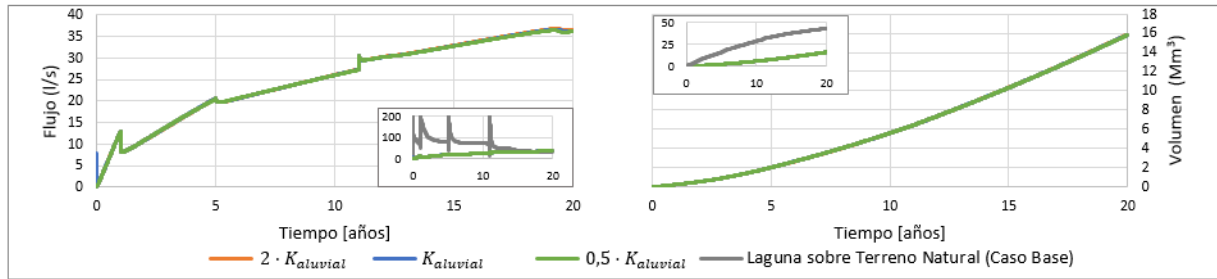
En la Figura 6.15b se observa una variación debido al cambio del gradiente hidráulico bajo el depósito por parte del avance del domo de infiltración provocado por la infiltración

desde la laguna sobre terreno natural. Por lo tanto, para un aumento del flujo, el gradiente disminuye y la infiltración por esta zona disminuye.

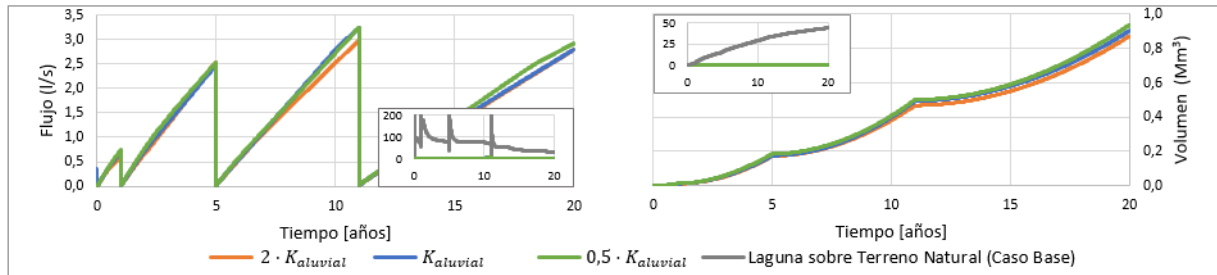
En la Figura 6.15c se observa que el efecto del cambio de la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos se extiende durante todo el periodo de operación, a diferencia del modelo anterior. La variación se relaciona a la magnitud del cambio de la conductividad con respecto al caso base. Además, la capacidad de reducir el gradiente hidráulico bajo la laguna, según la magnitud del flujo de infiltración, influye en la forma de cómo se desarrolla la serie en el tiempo. Para el caso de aumentar la conductividad hidráulica, los sedimentos se saturan con mayor rapidez y el domo de infiltración llega a la roca fracturada en menor tiempo. En cambio, al disminuir la conductividad hidráulica, los tiempos son mayores.

En la Figura 6.15d, se observan variaciones en la serie de flujos del error numérico en el modelo debido a la saturación y el contacto del domo de infiltración en estratos no saturados. A pesar de esto, el error sigue siendo considerablemente menor frente al volumen total infiltrado, correspondiente al 0,26 % para el caso base.

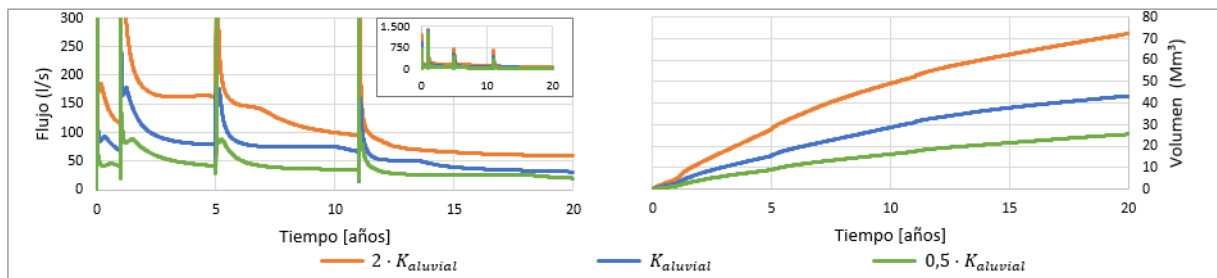
(a) Infiltración desde la playa del relave



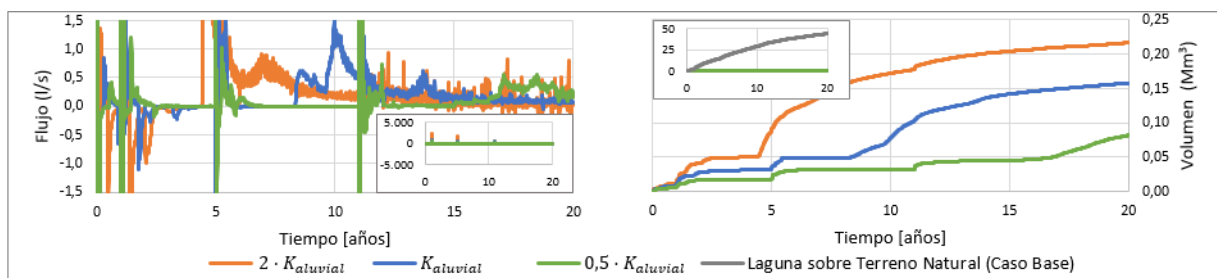
(b) Infiltración desde la laguna sobre el relave



(c) Infiltración desde la laguna sobre terreno natural



(d) Error numérico del modelo



Nota: Las series registran valores muy similares, por lo tanto las curvas colapsan una sobre la otra.

Figura 6.15: Flujo y volumen acumulado para 20 años de simulación considerando cambios en la conductividad hidráulica de la unidad de sedimentos, modelo en planicie.

6.3. Comparación entre la infiltración al relave e infiltración hacia el sistema hidrogeológico

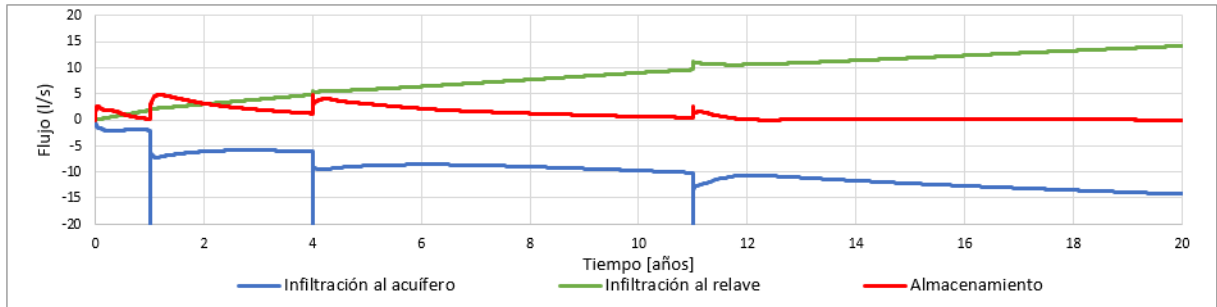
Hasta ahora el flujo de infiltración se ha registrado a partir de los flujos calculados en cada nodo asociado a las condiciones de borde. Como la infiltración se define como una condición de saturación permanente en la superficie del relave, el flujo analizado en las secciones anteriores corresponde al que ingresa al relave en su superficie.

La infiltración del relave hacia el acuífero se obtiene de utilizar herramientas de FEFLOW para analizar flujos en superficies internas del modelo, en este caso, la superficie del contacto entre el relave y el sistema subyacente. Estas herramientas son sensibles a los contrastes de conductividad hidráulica, por lo que en estricto rigor, al reportar cualquiera de los dos flujos se debe verificar que el balance hídrico de un volumen dado en el sistema completo cierre.

La diferencia entre lo que infiltra al relave y hacia el sistema hidrogeológico corresponde al almacenamiento interno del relave. Si el almacenamiento del relave presenta variaciones pequeñas, el flujo evaluado en los nodos debiese corresponder con la infiltración al acuífero. Para analizar si posibles diferencias son relevantes en la representación de la infiltración, se analiza el flujo en la base del relave.

Las Figuras 6.16 y 6.17 registran el desarrollo de la infiltración desde el depósito hacia el sistema hidrogeológico subyacente, comparado con la infiltración al relave. El signo del almacenamiento en el relave significa liberación del flujo cuando es positivo y captura de agua cuando es negativo.

(a) Evolución del flujo de infiltración



(b) Evolución del volumen acumulado

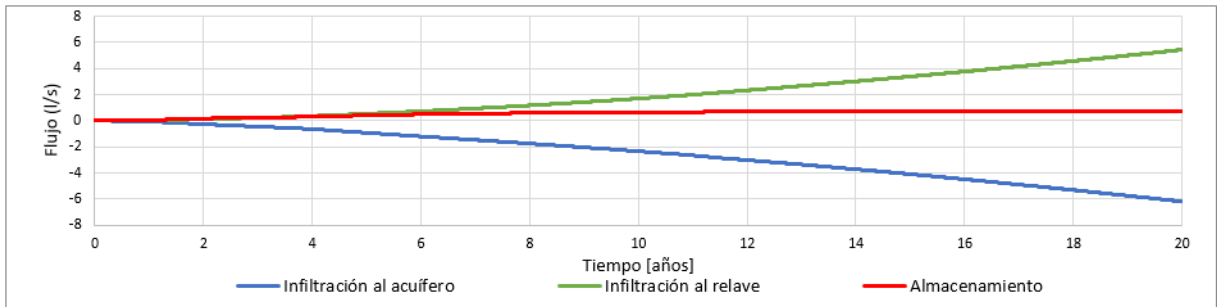
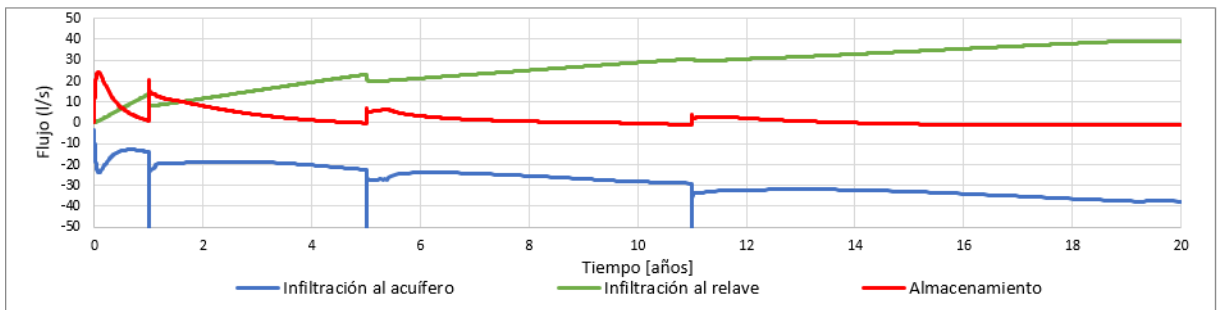


Figura 6.16: Comparación entre la infiltración al relave y al acuífero, depósito en valle.

(a) Evolución del flujo de infiltración



(b) Evolución del volumen acumulado

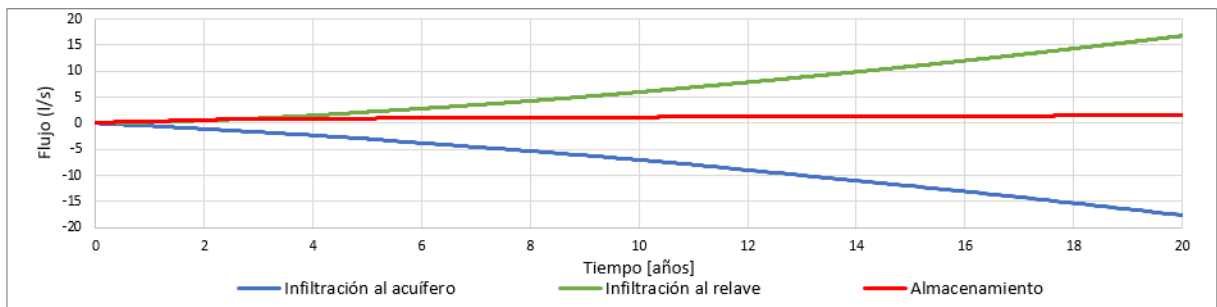


Figura 6.17: Comparación entre la infiltración al relave y al acuífero, depósito en planicie.

En las figuras se aprecia que al inicio de cada etapa existe un drenaje desde los relaves debido a la liberación de la humedad que aparece súbitamente en los elementos nuevos. El aporte por este drenaje va disminuyendo a medida que ocurre la simulación, donde prácticamente la totalidad del flujo ocurriendo en la superficie del depósito, ingresaría al sistema subterráneo.

Pese a la diferencia observada entre el flujo de infiltración hacia el acuífero y la infiltración al relave, la magnitud de esta diferencia no es comparable frente a la infiltración desde la laguna hacia el terreno natural en los primeros años de la operación, como ha sido revisado en la sección anterior.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo, se ha analizado una alternativa de representación de un depósito de relave, donde su crecimiento continuo se modela a partir de una conductividad hidráulica variable, en reemplazo de la variación continua del área. Este supuesto surge de considerar la variación del área como el producto entre el área final de la etapa de análisis y un factor de forma $f(t)$, que varía entre 0 y 1. Este factor de forma es ponderada por la conductividad hidráulica representativa del relave, intercambiando sus roles en la ecuación de Darcy.

Se ha revisado la importancia de representar el relave explícitamente en el modelo numérico y de forma tridimensional. Además, se ha analizado una forma de representar el crecimiento continuo del depósito como alternativa a la utilización de numerosas etapas discretas.

La representación explícita del relave permite que la herramienta numérica construida resuelva con una base física, la interacción entre el relave y el sistema subyacente, de forma que el gradiente hidráulico vertical que determina el flujo de infiltración, sea variable en el tiempo, y un resultado de las propiedades hidráulicas y la geometría de las unidades hidrogeológicas.

Se ha discutido cómo modelaciones de tipo bidimensional no aseguran que la interacción entre el depósito y el sistema subyacente quede debidamente representada. Esto considerando que los controles hidrogeológicos frecuentemente actúan de forma tridimensional, y que una representación bidimensional requiere suponer anchos representativos para cada perfil para obtener un flujo de infiltración total de la instalación.

Se considera que una representación tridimensional, posee ventajas explícitas frente a aquellas de tipo bidimensional, o donde el relave corresponde a una condición de borde de recarga, cuando el objetivo central del modelo es estimar flujos de infiltración para evaluaciones de impacto ambiental.

Respecto a la forma de representar el crecimiento del depósito, los resultados obtenidos en el trabajo permiten comprobar que una representación en etapas discretas, utilizando en cada etapa una conductividad hidráulica variable para el relave, como una alternativa para representar el cambio del área en el tiempo, debiese entregar una aproximación suficiente a

los flujos de infiltración desde el relave, al menos equivalente en calidad a la que entregaría una representación utilizando una mayor discretización que utilice una cantidad importante de etapas y donde la conductividad hidráulica del relave se considere constante.

Por otro lado, una menor cantidad de etapas disminuye los flujos de carácter numéricos, asociados a la activación de elementos de la malla y condiciones de borde que representan la laguna. Estos flujos numéricos, normalmente son parte del error de balance, y por lo tanto es deseable evitar su generación en el desarrollo del modelo.

Es recomendable que la elección de las etapas asegure que los flujos que se van estimar no estén subestimados. Por ejemplo, el caso en que la laguna se ubica sobre terreno natural donde la extensión de la unidad de sedimentos superficial este limitada, como es el caso de un valle angosto de alta montaña.

En cuanto al supuesto necesario de un valor inicial para la conductividad hidráulica, que equivalentemente representa un valor del área inicial del relave de cada etapa, cuando la conductividad hidráulica saturada representativa del relave (no consolidado) es aproximadamente $1 \cdot 10^{-8}$ m/s los resultados revelan que considerar un valor inicial del 1 % de la conductividad hidráulica del relave es lo suficientemente bajo para representar correctamente el aumento de la superficie de relave en el tiempo. Para valores menores de la conductividad hidráulica inicial, no se observaron diferencias significativas. De cualquier forma, se recomienda que en cada modelación se verifique que el flujo inicial asociado a este valor de conductividad hidráulica, sea suficientemente pequeño respecto del balance hídrico del modelo que definen otras condiciones de borde.

Hay que considera que, en una evaluación ambiental, el flujo de interés es aquel que ingresa al acuífero. En general, este debiese ser suficientemente cercano al que resulta de condiciones de borde impuestas en la superficie del relave (y que representan el balance hídrico superficial del depósito). Si bien los flujo pueden tener diferencias menores asociadas al almacenamiento del relave, que normalmente durante la operación se encuentra saturado, al momento de evaluar balances de agua en el acuífero subyacente, se debe considerar el flujo que atraviesa por la interfaz entre suelo y relave.

Por otro lado, el trabajo realizado permite evidenciar también que, en la estimación del flujo de infiltración, para casos equivalentes a los representados, existen factores igualmente o más relevantes que la representación del depósito. Estos corresponden, por ejemplo, los valores de la conductividad hidráulica del relave y de las unidades subyacentes que pueden controlar el flujo de infiltración desde la laguna, como por ejemplo unidades aluviales.

En ambos casos analizados en este estudio, se pudo apreciar que la conductividad hidráulica representativa del relave es más importante para determinar la magnitud del flujo de infiltración, que la forma en que se discretiza el crecimiento del depósito. Es este sentido, se puede identificar que el respaldo técnico de los valores de conductividad del relave puede ser más relevante en una evaluación de impacto ambiental, que el número de etapas utilizado para discretizar el crecimiento del relave (cuando se usa una conductividad variable como alternativa para representar el crecimiento del área). Además, hay que notar que para relaves permeables, es importante analizar casos en los que la extensión del área del depósito pueda determinar un flujo de infiltración desde el relave que es comparable o mayor al de la laguna.

La conductividad hidráulica de unidades aluviales es fundamental en controlar el flujo de infiltración simulado desde la laguna, por cuanto es el primer control hidrogeológico vertical en respuesta al gradiente hidráulico definido por dicha condición. En estricto rigor, este flujo debiese estar asociado a la conductividad hidráulica vertical de los sedimentos aluviales (o de la roca fracturada en el caso en que esta sea la unidad en contacto con la laguna). Sin embargo, dado que normalmente la conductividad vertical no se mide, sino que se establece como un factor de la horizontal, son propiedades que en la modelación normalmente están fuertemente correlacionadas.

Si bien, en los casos donde la laguna se ubique progresivamente sobre unidades de menor conductividad, como roca fracturada o roca competente, y la relevancia de la unidad aluvial disminuya, es importante mantener presente que el flujo desde la laguna estará controlado por la conductividad de la unidad receptora, y las condiciones de saturación que se hayan alcanzado. Por esto, las unidades sobre las que se ubicará la laguna en el crecimiento del depósito debiesen contar con una robusta caracterización de conductividad hidráulica.

7.1. Sugerencias para trabajos futuros

Para trabajos futuros se recomienda verificar la influencia en el flujo de infiltración al considerar la consolidación del relave a medida que se agregan nuevas etapas a la simulación. La consolidación tiene dos efectos asociados, la reducción de la conductividad hidráulica del relave producto de la compresión del espacio poroso, y la exudación de un adicional de agua producto de lo mismo. El peso relativo de estos dos efectos determinará si la estimación del flujo infiltrado desde un relave se reduce o aumenta respecto del caso donde no se considera consolidación.

En la misma línea con respecto a los cambios de la conductividad hidráulica del relave, se espera que el efecto de la segregación de las partículas también juegue un rol importante, dado que puede provocar diferencias en los tamaños de las partículas en las zonas dentro del relave, y por ende, diferencias de las conductividades. Cerca de la zona de vertido, se esperan conductividades mayores, dado que habrá un mayor porcentaje de arenas o material más grueso. En cambio, a medida que nos alejamos en el depósito, las conductividades serán menores dada la mayor concentración de material fino. Este aspecto puede normalmente ser analizado mediante análisis de sensibilidad, puesto que es imposible establecer a priori cuál será el resultado real de un proceso de segregación, en la etapa de diseño de un depósito de relaves.

Finalmente, es recomendable repetir las evaluaciones realizadas en este trabajo utilizando Modflow-USG. Dado que este código utiliza diferencias finitas en un esquema de volúmenes de control, es interesante validar los resultados obtenidos en el código FEFLOW. Uno de los principales desafíos que se anticipan en el uso de MODFLOW-USG para una representación como la evaluada en este trabajo, corresponde a que en MODFLOW, los nodos de cálculo se ubican en el centro de la celda, y no en su superficie. Por lo anterior, una condición de borde, que represente el ingreso de flujo en la superficie del relave (en la superficie de la última capa en evaluación en cada etapa) debe analizarse con mayor cuidado, no siendo equivalente, a priori, establecer directamente una condición de borde de carga constante.

Bibliografía

- Arcadis (2009). *Anexo 23 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Caserones - Estimación de Infiltraciones al Acuífero Depósito de Lamas La Brea.*
- Arcadis (2015). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minerales Primarios Minera Spence.*
- Arcadis (2017). *Estudio de Impacto Ambiental Continuidad Operativa Tranque de Relaves El Torito Operación El Soldado.*
- Arcadis (2018). *Anexo 4.4 B Estudio de Impacto Ambiental Desarrollo de Infraestructura y Mejoramiento de Capacidad Productiva de Collahuasi - Estimación de Infiltraciones Depósito de Relaves Pampa Pabellón.*
- Campaña, J., Valenzuela, L., Figueroa, A., and Alarcon, J. C. (2015). The quillayes sand tailings dam in chile design and operation. Tailings and Mine Waste Conference.
- DGA (2015). *Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común de los Salares de Navidad y Mar Muerto.*
- Domenico, P. A., Schwartz, F. W., et al. (1998). *Physical and chemical hydrogeology.* Wiley New York.
- DS N° 248 Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves (2007). Diario oficial de la republica de chile, santiago, chile, 11 de abril de 2007.
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology.* Pearson Education.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. (1979). Groundwater: Englewood cliffs. *New Jersey.*
- Golder (2016a). *Anexo 4-12 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Desarrollo Mantoverde - Modelo Hidrogeológico Numérico para el Tranque de Relaves Ladera Sur.*
- Golder (2016b). *Anexo 4.2.7 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Minero Quebrada Blanca Fase 2 - Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico Depósito de Relaves QB2.*
- Ley N° 19300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994). Diario oficial de la republica de chile, santiago, chile, 1 de marzo de 1994.
- Lottermoser, B. (2007). *Mine wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

- MWH (2008). *Anexo E Proyecto Ampliación de Capacidad de Extracción y Procesamiento de Mineral Sulfurado de Minera Escondida - Modelo Hidrogeológico de la Cuenca de Laguna Seca.*
- MWH (2014). *Anexo 4-E Estudio de Impacto Ambiental Candelaria 2030 - Continuidad Operacional - Hidrogeología Candelaria 2030.*
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. *Santiago: SERNAGEOMIN.*
- Sanders, L. L. (1998). *A Manual of Field Hydrogeology.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Schlumberger Water Services (2009). *Anexo 6-C Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Sierra Gorda - Modelo Numérico Mina Catabela.*
- SEA (2012). *Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA.*
- Sernageomin (2018). *Análisis del Catastro de Depósitos de Relaves en Chile y guía de estructura de datos.*
- Smith, L. and Wheatcraft, S. W. (1993). Groundwater flow. *Handbook of hydrology.*

Anexos

Anexo A

Geología

La información geológica es obtenida de las cartas geológicas desarrolladas por el Sernageomin. Las cartas utilizadas para las dos zonas de estudio corresponden a las siguientes, presentando además su escala y el año de su realización:

1. Depósito en valle
 - (a) Carta Quehuita 1:50000 (2001)
 - (b) Carta Cerro Yocas 1:50000 (2001)
2. Depósito en planicie
 - (a) Hoja Palestina 1:100000 (2000)
 - (b) Carta Oficina Domeyko 1:100000 (2007)

A continuación, se realiza una descripción de las unidades geológicas presentes en cada zona de estudio y se ilustra su distribución superficial en los mapa geológicos correspondientes.

A.1. Valle

En la zona del valle, se identifican las siguientes unidades geológicas (Figura A.1):

Plioceno Superior-Cuaternario:

- Depósito aluviales (Qal): Gravas, ripios, arenas y limos polimícticos, no consolidados, asociados a sistemas de drenaje ocasional o cauces inactivos.
- Depósito coluviales (Qc): Gravas, ripios y arenas situados en conos de faldeos abruptos.

Oligoceno-Plioceno:

- Depósitos de piedemonte (Tsg): Gravas, ripios, limos y arenas polimícticos, de mala selección y baja consolidación, expuestos en la zona de la precordillera. Se intercala con las ignimbritas miocenas (10-6 Ma) y en sus niveles basales, localmente, contienen óxidos de Cu como cemento.
- Ignimbrita Carcote, 5.8 ± 0.4 Ma (TMic): Extenso depósito de flujo piroclástico, de

composición dacítica-riolítica, de color rosado claro a gris claro, con variado grado de soldamiento. Tiene escasos fenocristales de plagioclasa y biotita.

Eoceno (intrusivos):

- Granodioritas, ca. 42-43 Ma (Tgd): Granodioritas de hornblenda y biotita, de grano medio y fino.
- Dioritas (Td): Dioritas finas de piroxeno y biotita, dioritas cuarcíferas de hornblenda, dioritas de dos piroxenos y dioritas de piroxeno y hornblenda.

Eoceno (cuerpos hipabisales):

- Formación Icanche, 53-43 Ma (TEi): Secuencia principalmente volcánica, consistente en coladas andesíticas y dacíticas, brechas y aglomerados volcánicos, tobas líticas y de ceniza, depósitos dacíticos de bloques y cenizas, y una menor proporción de rocas riolíticas y sedimentarias clásticas. Localmente se diferencian:
 - (a) Andesitas de hornblenda y piroxeno.
 - (d) Dacitas de biotita y hornblenda.
 - (r) Riolitas.
 - (t) Tobas.
 - (c) Conglomerados y areniscas.

Cretacico Superior-Eoceno Inferior

- Formación Tolar (KTt): Secuencia sedimentaria clástica rojiza, de origen continental, que aflora en el Sierra del Medio.
 - Miembro 1 (1): Conglomerados brechosos gruesos.
 - Miembro 2 (2): Areniscas rojas y pardas, con estratificación en artesa, fangolitas e intercalaciones de calizas micríticas (c) con bioclastos, de origen lacustre.
 - Miembro 3 (3): Conglomerados gruesos pardo rojizos, con estratificación en artesas e imbricación.
 - Miembro Yocas (y): Conglomerados verdes, gruesos y de bloques, compactos y fuertemente propilitizados.

Triasico Superior-Cretacico Inferior

- Formación Quehuita (JKq, Jq): Secuencia sedimentaria de origen, principalmente, marino en los niveles inferiores (Jq) y continental en los niveles superiores (JKq).
 - Miembro Inferior (m): lutitas fisibles, calcilutitas, calcarenitas, calizas, y lutitas fisibles yesíferas. Marino, litoral a plataforma carbonática infralitoral.
 - Miembro Punilla (p): Areniscas cuarcíferas medias a finas, lutitas pardas y areniscas calcáreas sin fósiles. Fluvial anastomosado.

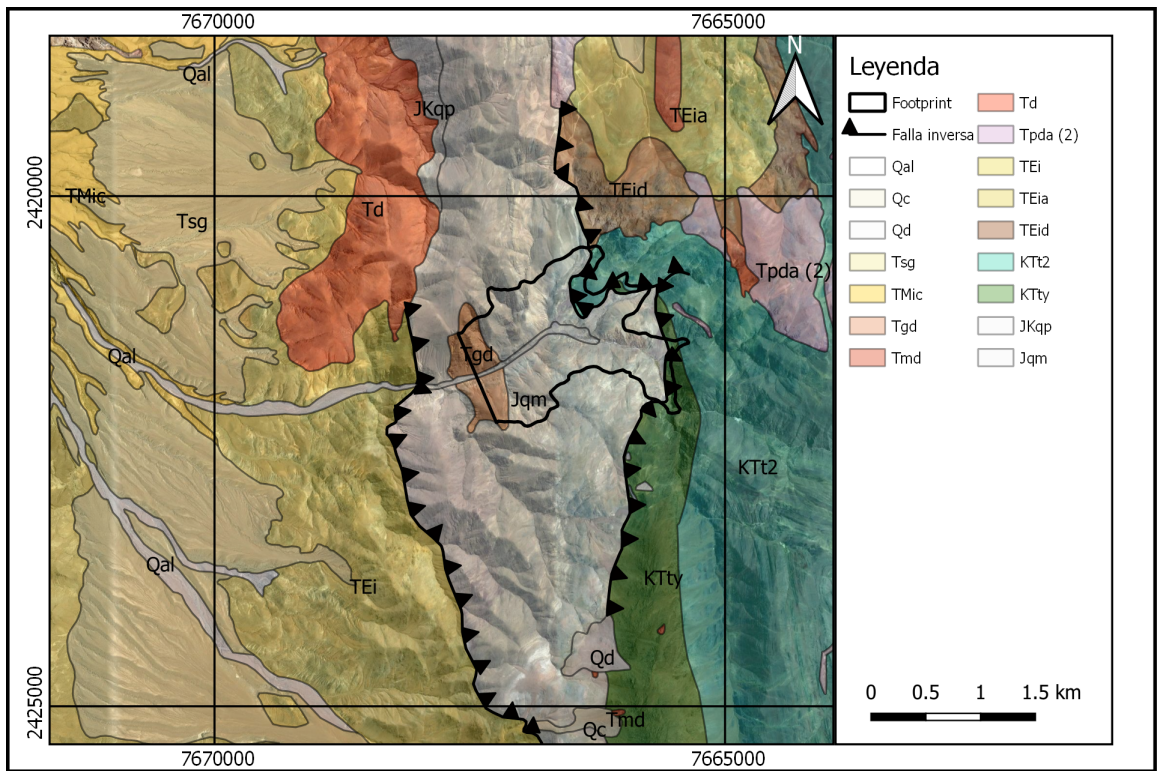


Figura A.1: Geología local depósito en valle.

A.2. Planicie

En la zona de la planicie, se identifican las siguientes unidades geológicas (Figura A.2):

Cuaternario

- Depósitos aluviales y coluviales modernos (Qa): Sedimentos no consolidados, polimícticos (aluviales) y monomícticos (coluviales), formados por gravas, arcillas y limos, de color pardo claro, amarillo y blanco. Representan depósitos de flujos de detritos relacionados con corrientes de barro y/o avenidas, que están asociados al sistema de drenaje más joven.

Mioceno Superior-Plioceno

- Depósitos aluviales y coluviales antiguos (MPla): Gravas, arenas gravosas, arenas y limos, con intercalaciones menores de ceniza volcánica, algunas de ellas retrabajadas (depósitos de piedemonte y corrientes de barro) que forman llanuras extensas ("pampas"). Se encuentran mal estratificados, semiconsolidados y cementados por cloruros, sulfatos y nitratos. En algunos lugares, cubren las gravas del Mioceno Inferior-Medio (Mg) o bien constituyen parte del relleno de paleocanales labrados en ellas. Representan depósitos de antiguos abanicos aluviales de baja pendiente y conos de deyección seccionados por los cauces de las quebradas actuales.

Mioceno Inferior-Medio

- Depósitos de gravas antiguas (Mg): Gravas polimícticas clasto y matriz soportadas y niveles de arenas cuarcíferas. Se encuentran localmente consolidadas y, en parte, cementadas por carbonato de calcio y/o cloruro de sodio.

Paleoceno Superior

- Pórfidos dacíticos, 62-64 Ma (Papd): Pórfidos de anfíbola y biotita.

Cretacico Superior

- Batolito Sierra del Buitre e intrusivos asociados, 74-66 Ma (Kssb): Complejo de rocas plutónicas expuesto constituido por:
 - Miembro (a) Manzodioritas cuarcíferas a granodioritas de anfíbola y biotita.
 - Miembro (c) Granodioritas de biotita y anfíbola.
 - Miembro (d) Dioritas de anfíbola y piroxeno.
- Formación Quebrada Mala, 84-69 Ma (Ksqm): Secuencia volcanosedimentaria continental de hasta 3700 m de potencia. Constituye extensos afloramientos discontinuos, está intruida por rocas plutónicas del Cretácico Superior (Batolito Sierra del Buitre y rocas afines) y es cubierta, en discordancia, por gravas del Mioceno.
 - (3b) Andesitas afaníticas de anfíbolas.
 - (3a) Ortoconglomerados y areniscas con estratificación gruesa en capas métricas de hasta 50 m de espesor. Están constituidos por clastos volcánicos redondeados.
 - (2d) Andesitas y andesitas basálticas de dos piroxenos y olivino, y dacitas.
 - (2a) Areniscas cuarzo-feldespáticas y volcanodetríticas que alternan con lavas andesíticas porfíricas de piroxeno y anfíbola.

Jurásico

- Formación Sierra El Cobre (Jsc): Secuencia sedimentaria marina fosilífera, constituida por:
 - Miembro c (c): Areniscas calcáreas y calizas.
 - Miembro b (b): Areniscas calcáreas muy finas.
 - Miembro a (a): Areniscas calcáreas y lutitas con intercalaciones de lava andesíticas.

Carbonifero-Permico

- Pórfidos riolíticos (Ppr): Conjunto de intrusivos subvolcánicos que afloran en la zona. Corresponden a pórfidos con fenocristales de cuarzo, ortoclasa y biotita.
- Riolitas Sierra del Jardín (CPsj): Secuencia volcánica riolítica constituida por pórfidos y tobas soldadas.
- Formación Cerro El Árbol (CPca): Secuencia de areniscas arcósicas y calcáreas, lutitas rojas, conglomerados y calizas marinas fosilíferas. Está constituida por:
 - Miembro a (a): Calizas grises micriticas, fosilíferas, que alcanzan hasta 50 m de espesor.

- Miembro b (b): Areniscas cuarcíferas, con algunas intercalaciones de niveles conglomerádicos, que alcanzan 40 m de espesor.
- Miembro c (c): Lutitas fisibles de color verde a claro grisáceo.

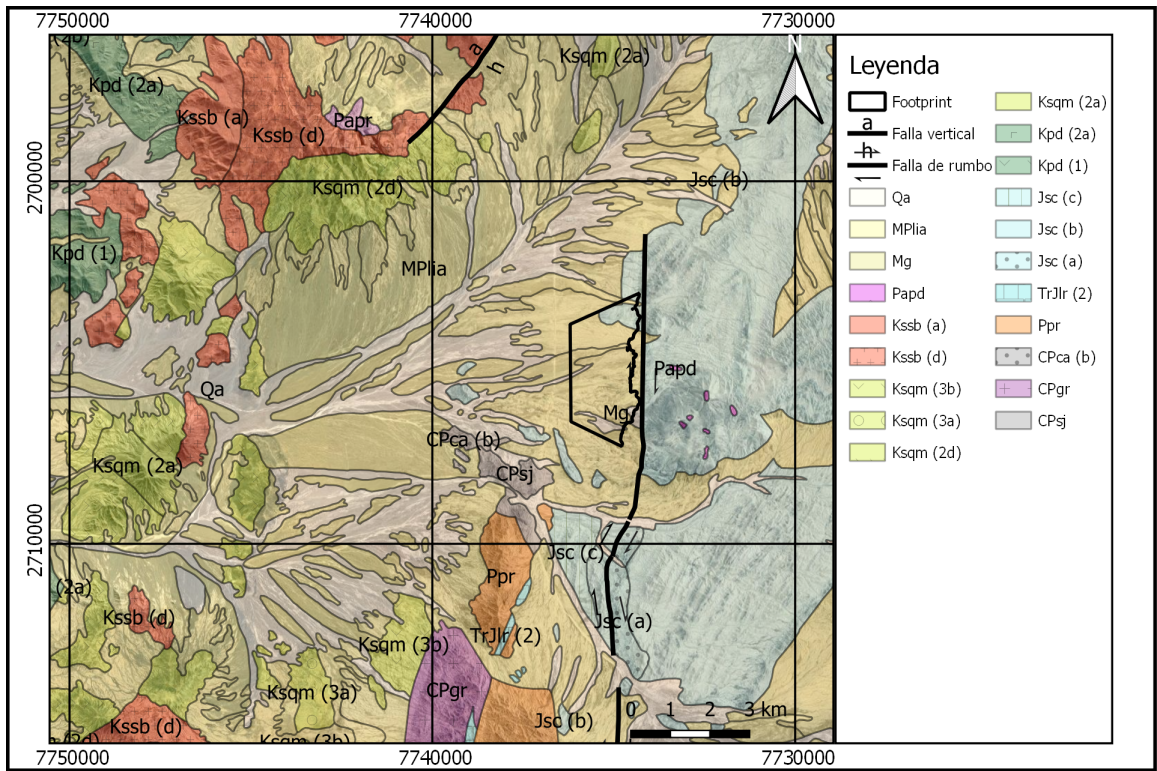


Figura A.2: Geología local depósito en planicie.

Anexo B

Representación del Depósito por Etapas

La representación del crecimiento del depósito se discretiza según etapas, elegidas con el criterio de tener huellas separadas equidistantes. En este apartado, se presentan los datos utilizados para la caracterización temporal y geométrica de la discretización elegida para cada caso y modelo.

B.1. Discretización temporal

La discretización temporal de las etapas del depósito se separan en dos periodos de evaluación, el primero correspondiente a un horizonte de 1 año y el segundo al tiempo total considerado para la operación, es decir, 20 años. Las etapas y el tiempo que representa cada etapa se presentan en las siguientes secciones.

B.1.1. Periodo de evaluación 1 año

Depósito en valle

Tabla B.1: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en valle. Discretización en 4 etapas.

Etapas	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Mes 1	0	31	31
Mes 2	31	61	30
Mes 6	61	183	122
Año 1	183	365	182

Tabla B.2: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en valle. Discretización en 1 etapa.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365

Depósito en planicie

Tabla B.3: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en planicie. Discretización en 4 etapas.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Mes 1	0	31	31
Mes 3	31	92	61
Mes 6	92	183	91
Año 1	183	365	182

Tabla B.4: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en planicie. Discretización en 1 etapa.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365

B.1.2. Periodo de evaluación 20 años

Depósito en valle

Tabla B.5: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en valle. Discretización en 14 etapas.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365
Año 1,5	365	548	183
Año 2	548	730	182
Año 3	730	1.095	365
Año 4	1.095	1.460	365
Año 5	1.460	1.825	365
Año 6	1.825	2.190	365
Año 7	2.190	2.555	365
Año 9	2.555	3.285	730
Año 11	3.285	4.015	730
Año 13	4.015	4.745	730
Año 15	4.745	5.475	730
Año 17	5.475	6.205	730
Año 20	6.205	7.300	1.095

Tabla B.6: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en valle. Discretización en 4 etapas.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365
Año 4	365	1.460	1.095
Año 11	1.460	4.015	2.555
Año 20	4.015	7.300	3.285

Depósito en planicie

Tabla B.7: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en planicie. Discretización en 13 etapas.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365
Año 2	365	730	365
Año 3	730	1.095	365
Año 4	1.095	1.460	365
Año 5	1.460	1.825	365
Año 6	1.825	2.190	365
Año 7	2.190	2.555	365
Año 9	2.555	3.285	730
Año 11	3.285	4.015	730
Año 13	4.015	4.745	730
Año 15	4.745	5.475	730
Año 17	5.475	6.205	730
Año 20	6.205	7.300	1.095

Tabla B.8: Tiempo de inicio, final y duración de cada etapa, depósito en planicie. Discretización en 4 etapas.

Etapa	Tiempo Inicial [d]	Tiempo Final [d]	Duración [d]
Año 1	0	365	365
Año 5	365	1.825	1.460
Año 11	1.825	4.015	2.190
Año 20	4.015	7.300	3.285

B.2. Cotas del depósito de relaves por etapas

Para cada una de las etapas definidas anteriormente, se presentan a continuación la cota máxima y mínima del depósito de relaves, y la altura del muro con respecto al punto más bajo del eje de este, para cada modelo.

Depósito en valle

Tabla B.9: Cotas máxima y mínimas para cada etapa, depósito en valle.

Etapa	Cota Máxima [m.s.n.m.]	Altura Muro [m]	Cota Mínima [m.s.n.m.]
Mes 1	3.586,1	24	3.585,2
Mes 2	3.597,1	35	3.595,7
Mes 6	3.622,2	60	3.620,0
Año 1	3.642,6	81	3.639,8
Año 1,5	3.656,4	94	3.653,3
Año 2	3.667,2	105	3.664,0
Año 3	3.684,1	122	3.680,4
Año 4	3.697,3	135	3.693,2
Año 5	3.708,4	146	3.704,1
Año 6	3.718,0	156	3.713,5
Año 7	3.726,5	165	3.722,0
Año 9	3.741,4	179	3.736,5
Año 11	3.754,2	192	3.749,0
Año 13	3.765,4	203	3.760,2
Año 15	3.775,5	214	3.770,2
Año 17	3.784,7	223	3.779,4
Año 20	3.797,3	235	3.791,6

Depósito en planicie

Tabla B.10: Cotas máxima y mínimas para cada etapa, depósito en planicie.

Etapa	Cota Maxima [m.s.n.m.]	Altura Muro [m]	Cota Minima [m.s.n.m.]
Mes 1	1597,8	10	1597,3
Mes 3	1601,3	14	1600,7
Mes 6	1605,0	18	1604,1
1	1610,0	23	1608,8
2	1617,0	30	1615,3
3	1622,1	35	1620,1
4	1626,4	39	1624,2
5	1630,1	43	1627,7
6	1633,4	46	1630,8
7	1636,4	49	1633,6
9	1641,8	54	1638,7
11	1646,5	59	1643,2
13	1650,8	64	1647,3
15	1654,7	67	1651,0
17	1658,4	71	1654,5
20	1663,5	76	1659,3

B.3. Profundidad y cota del espejo de la laguna por etapas

Para cada una de las etapas definidas anteriormente, se presentan a continuación la profundidad y cota del espejo de la laguna de aguas claras, producto de considerar un porcentaje determinado de la diferencia entre la cota máxima y mínima del depósito, para ambos modelos. Para el caso del depósito en valle, se utiliza el 33 %, y para el modelo en planicie se utiliza el 20 %.

Depósito en valle

Tabla B.11: Cota y profundidad de la laguna para cada etapa, depósito en valle.

Etapas	Profundidad Laguna [m]	Cota Laguna [m.s.n.m.]
Mes 1	0,3	3585,5
Mes 2	0,4	3596,1
Mes 6	0,7	3620,7
1	1,0	3640,8
1,5	1,0	3654,3
2	1,1	3665,1
3	1,2	3681,6
4	1,3	3694,5
5	1,4	3705,5
6	1,5	3715,0
7	1,5	3723,5
9	1,6	3738,1
11	1,7	3750,7
13	1,7	3761,9
15	1,8	3772,0
17	1,8	3781,2
20	1,9	3793,5

Depósito en planicie

Tabla B.12: Cota y profundidad de la laguna para cada etapa, depósito en planicie.

Etapa	Profundidad Laguna [m]	Cota Laguna [m.s.n.m.]
Mes 1	0,09	1597,4
Mes 3	0,13	1600,8
Mes 6	0,18	1604,2
1	0,25	1609,0
2	0,33	1615,6
3	0,40	1620,5
4	0,45	1624,6
5	0,48	1628,2
6	0,52	1631,3
7	0,56	1634,2
9	0,61	1639,3
11	0,66	1643,8
13	0,70	1648,0
15	0,75	1651,7
17	0,79	1655,2
20	0,85	1660,1

Anexo C

Código Python

C.1. Integración de FEFLOW en Python

Si bien FEFLOW cubre una amplia gama de funcionalidades para la resolución de diversos problemas del flujo en medios porosos o la simulación de transporte, hay casos en que el control extendido del usuario sobre los procesos internos en el software es deseado y útil.

Muchos de estos casos se pueden incorporar mediante el concepto de complemento FEFLOW y su interfaz de programación abierta controlada por el Administrador de interfaz FEFLOW (IFM). Además, la integración de Python a FEFLOW y de FEFLOW en Python proporciona una opción adicional para interactuar con el software utilizando un código propio.

Las funciones de FEFLOW en Python son incorporadas con el módulo *ifm*. Dado que este no es un módulo estándar de Python, se debe especificar la ubicación del módulo FEFLOW de Python:

```
import sys
sys.path.append('C:\\Program Files\\DHI\\2017\\FEFLOW_7.1\\bin64')
import ifm
```

Los requerimientos para utilizar las funciones de FEFLOW en un interprete externo de Python son la instalación de FEFLOW 7.1 y de Python 2.7, dado que actualmente otras versiones no son compatibles.

La incorporación de FEFLOW a Python ofrece tres bloques de métodos básicos para la programación:

- Métodos de control del núcleo (KERNEL)
- Funciones de la interfaz de programación de aplicaciones (API)
- Las llamadas (Callbacks)

C.1.1. Métodos de control KERNEL

Los métodos de control del núcleo permiten al usuario iniciar y detener la simulación, cargar y guardar documentos y controlar otros aspectos de la simulación. Los métodos utilizados para este trabajo son los siguientes.

doc = ifm.loadDocument("NombreArchivoEntrada")

Este método intenta cargar el modelo FEFLOW dado. El único argumento es la ruta completa al documento. El método devuelve el documento cargado en caso de éxito. De lo contrario, el método devuelve un valor booleano `isinstance(doc, bool) == true`:

doc.saveDocument("NombreArchivoSalida")

Este método guarda el modelo actual FEFLOW usando el nombre del archivo dado.

doc.startSimulator("NombreArchivoDAC", Formato Archivo, Pasos Guardados)

Inicia la simulación del modelo FEFLOW actual o continúa una simulación en pausa. Opcionalmente, se admiten hasta tres argumentos:

- Nombre de archivo a un archivo DAR o DAC de salida (archivos que guardan todo el proceso de la simulación).
- Formato de archivo que se almacenará (0 corresponde al predeterminado).
- Cantidad de pasos guardados para el archivo de salida del resultado a DAC. Este puede ser una lista de pasos de tiempo o el número de pasos de salida que se deben omitir entre las salidas (entero entero). Si se omite, se guardan todos los pasos de tiempo.

doc.stopSimulator()

Detiene la simulación actual en ejecución o finaliza el modo de simulación después de que se haya completado la simulación.

C.1.2. Funciones API

El IFM incluye una gran cantidad de funciones que pueden ser utilizadas para resolver diversos problemas en la simulación o que ayudan a automatizar aspectos como asignar propiedades a los elementos o nodos. Las funciones a utilizar se explicará al momento de definir las rutinas utilizadas en el trabajo. La lista completa de funciones se encuentran disponibles en el [Help de FEFLOW 7.1](#).

C.1.3. Callbacks

Los Callbacks representan ubicaciones en el código FEFLOW interno donde se puede llamar desde un intérprete externo, en nuestro caso Python. De esta forma, se puede asignar tareas dentro de la simulación de forma sencilla. Los Callbacks utilizados en este trabajo son dos, que son:

- `preTimeStep(doc)`: Callback que representa el momento antes que se defina el paso de tiempo siguiente de la simulación.
- `postFlowSimulation(doc)`: Callback que representa el momento posterior a que se resuelve la ecuación de flujo en todo los nodos del modelo.

C.2. Explicación de rutinas y funciones generadas para resolver los problemas durante la simulación

C.2.1. Identificación nodos con afloramiento durante la simulación

Antes de definir la función para verificar las presiones y determinar si hay afloramiento en el nodo, es necesario en el modelo crear una selección de nodos donde potencialmente podría generarse este fenómeno. En estos casos en particular, el afloramiento puede ocurrir potencialmente aguas abajo del muro del depósito de relaves. Esta selección de nodos la denominamos *ZonaAfloramiento* en FEFLOW, cuyos índices son guardados en un vector en Python, que denominamos *SectorAfloramiento* mediante la siguiente rutina:

```
IDsel=doc.findSelection(0,'ZonaAfloramiento')
NodoFEFLOW=doc.enumSelectionItems(0,IDsel,-1)
SectorAfloramiento.append(NodoFEFLOW+1)
while NodoFEFLOW>0:
    NodoFEFLOW=doc.enumSelectionItems(0,IDsel,NodoFEFLOW+1)
    if NodoFEFLOW>0:
        SectorAfloramiento.append(NodoFEFLOW+1)
```

Donde

- `doc.findSelection(0,'ZonaAfloramiento')`: registra la identidad de la selección de nodos en FEFLOW.
- `doc.enumSelectionItems(0,IDsel,i)`: registra la identidad del nodo siguiente al nodo `i` en la selección, donde el primer argumento de la función corresponde al tipo de selección (0 para nodos), el segundo argumento es la identidad de la selección y el tercer argumento corresponde al nodo anterior al buscado en la selección (si se coloca -1, el nodo resultante será el primero de la selección).

De esta forma, el ciclo guarda todos los nodos siguiendo el orden que se presentan en FEFLOW en su selección. Es necesario mencionar que el traspaso de identidad de los nodos de FEFLOW a Python, y viceversa, es necesario restar o sumar 1 debido al origen de la enumeración en cada uno. Por un lado, FEFLOW enumera desde el 1 y Python desde el 0.

Para identificar y añadir la condición de borde del tipo afloramiento en los nodos de la selección *ZonaAfloramiento*, cuyas presiones superen a la presión atmosférica durante la simulación, se define la siguiente función, que corresponde al Callback `preTimeStep()`, que llama al modelo antes de definir el paso de tiempo para la siguiente resolución de las ecuaciones.

```

seepage=[]
def preTimeStep(doc):
    for i in SectorAfloramiento:
        presion=doc.getResultFlowPressureValue(i-1)
        if presion>0:
            doc.setBcFlowTypeAndValueAtCurrentTime(i-1,1,1,doc.getZ(i-1))
            seepage.append(i)

```

Donde:

- *doc.getResultFlowPressureValue(i-1)*: función que registra la presión del nodo i.
- *doc.setBcFlowTypeAndValueAtCurrentTime(i-1,1,1,h)*: función que define la condición de borde del tipo carga hidráulica para el nodo i, con valor de *h*.
- *doc.getZ(i-1)*: función que registra la cota del nodo i.

Así, los nodos cuyos valores de presión superen a la atmosférica, en cualquier punto de la simulación, se le asigna una condición de borde del tipo carga hidráulica con valor igual a la cota del terreno. Además, los nodos donde se define la condición de borde son guardados en una lista denominada *seepage*. De esta forma, en los siguientes pasos de tiempo es posible revisar si es que este nodo, en cualquier momento de la simulación, empiece a ingresar agua debido al descenso de la presión por el efecto de otros nodos nuevos con afloramiento.

C.2.2. Identificación nodos que pierden la condición de afloramiento durante la simulación

Durante la simulación, es posible que el aumento de nodos sacando agua debido al afloramiento, invierta el flujo en algunos nodos donde las presiones empiezan a disminuir por debajo de la presión atmosférica. Para verificar lo anterior, se define la siguiente función, que corresponde al Callback *postFlowSimulation()*, que llama al modelo posterior a la resolución de la ecuación del flujo en un paso de tiempo.

```

def postFlowSimulation(doc):
    balance=doc.budgetFlowCreate()
    for nodo in seepage:
        FlujoNodo = doc.budgetComponentsQueryFlowAtNode(balance,nodo-1)
        if FlujoNodo[1]>0:
            doc.setBcFlowTypeAndValueAtCurrentTime(nodo-1,0,0,1000)
            seepage.remove(nodo)

```

Donde:

- *doc.budgetFlowCreate()*: crea datos de evaluación del balance para el modelo.
- *doc.budgetComponentsQueryFlowAtNode(balance,nodo-1)*: recupera los componentes del flujo en el tiempo actual para el nodo i. El resultado es un vector que incorpora, en este orden, el flujo total, el flujo por condiciones de borde y el área.
- *doc.setBcFlowTypeAndValueAtCurrentTime(nodo-1,0,0,1000)*: elimina la condición de borde en el nodo i.

Dado que el inicio de cada etapa de simulación el vector *seepage*, que guarda los nodos donde se ha definido la condición de borde, es definido nuevamente como un vector vacío, es necesario definir una rutina para que Python identifique cuales nodos en el modelo tienen está condición al inicio de la simulación, y guardarlos nuevamente en el vector. La rutina es la siguiente:

```
for nodo in SectorAfloramiento:  
    presion=doc.getResultsFlowPressureValue(nodo-1)  
    if presion==0:  
        seepage.append(nodo)
```

Donde todas las funciones ya han sido revisadas en las rutinas presentadas anteriormente.