



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

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS NUMÉRICOS DE ELEMENTOS  
FINITOS EN DOS Y TRES DIMENSIONES APLICADO A ESTUDIOS DE  
DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN DE PORO EN MINERÍA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CARLOS MARTÍN HUBNER TORRES**

**PROFESOR GUÍA:**

**RODRIGO GONZÁLEZ ALARCÓN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

**PAULO HERRERA RICCI**

**CARLOS ESPINOZA CONTRERAS**

**SANTIAGO DE CHILE**

**ABRIL 2013**

## Resumen

La distribución de las presiones de poro en la pared del rajo minero es uno de los datos de entrada clave para los estudios de estabilidad geotécnica del rajo, lo que significa que está intrínsecamente relacionado con maximizar la recuperación del mineral y disminuir los costos operacionales a través del diseño de las paredes del rajo y de sistemas de drenaje artificial.

En la actualidad es ampliamente utilizada la modelación numérica con un enfoque bidimensional para la obtención de la distribución de presión de poro en el tiempo, debido a los beneficios que entrega en cuanto a su fácil construcción de los modelos, tiempos de resolución bajos, facilidad de probar distintas alternativas de drenaje artificial, entre otros. No obstante, existe la inquietud si al considerar que los flujos no son estrictamente radiales se genera una diferencia significativa con los resultados obtenidos por medio de la modelación numérica con un enfoque bidimensional.

En este trabajo de título, las comparaciones entre los resultados obtenidos por medio de enfoques tridimensional y bidimensional concluyeron que existen diferencias significativas generadas por la geometría semi radial del rajo, así como también por la conceptualización del efecto producido por un pozo de bombeo como método de drespresurización artificial. Estas diferencias se logran compensar a través de conductividades hidráulicas equivalentes y por medio de un procedimiento adaptado de representación del efecto de los pozos de bombeo sobre la sección bidimensional.

Estas conclusiones entregan beneficios comerciales importantes a los consultores que hacen uso de modelos bidimensionales, reduciendo el tiempo involucrado en el proceso de calibración con la piezometría aledaña a la sección modelada, disminuyendo la incerteza de los resultados, y de la posibilidad de obtener resultados más precisos de simulación de distribución de presión de poros en el tiempo utilizando modelos numéricos bidimensionales.

## **Agradecimientos**

Resulta sumamente difícil realizar los agradecimientos adecuados a la enorme cantidad de gente que estuvo involucrada en mi proceso educativo, haciendo posible que actualmente finalice esta importante etapa de mi vida. Sin lugar a duda a los que debo resaltar más son mi familia, particularmente mi madre y hermana, de quienes recibí apoyo constante e incondicional durante todos los años que pasé en la Universidad de Chile.

No puedo dejar de mencionar a los amigos que estuvieron en el transcurso, los que fueron saliendo tanto de la carrera misma, como de la Rama Andinismo Ingeniería, Área de Difusión Colegios de la FCFM, entre otros lugares.

Quiero hacer especial mención a la confianza entregada por Schlumberger Water Services para realizar este trabajo de título, dando todas las herramientas y comodidades posibles para transformar este último escaño en un proceso más agradable.

Intencionalmente pretendo evitar mencionar los nombres específicos de las personas detalladas en los párrafos anteriores, pero hago el compromiso escrito de que una vez terminado este proceso me encargaré personalmente de agradecerles por todo su apoyo.

# Tabla de contenido

Resumen .....	ii
Agradecimientos .....	iii
Tabla de contenido.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Índice de tablas .....	ix
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.2. Metodología general del trabajo .....	3
1.3. Organización del informe .....	8
<b>2. Marco conceptual.....</b>	<b>9</b>
<b>3. Caracterización del rajo a modelar.....</b>	<b>17</b>
3.1. Características geométricas.....	18
3.2. Características de la grilla.....	25
3.3. Condiciones de borde.....	26
3.4. Condiciones iniciales. ....	28
3.5. Tiempos de simulación. ....	29
3.6. Puntos de observación. ....	31
3.7. Características hidrogeológicas de macizo rocoso.....	32
3.7.1. Parámetros en condición saturada.....	33
3.7.2. Parámetros en condición no saturada.....	34
<b>4. Resultados y análisis .....</b>	<b>38</b>
4.1. Casos sin pozos de bombeo. ....	39
4.1.1. Comparación de casos bidimensionales.....	39
4.1.2. Comparación de caso pseudo-tridimensional con modelo bidimensional. ....	42
4.1.3. Comparación de caso tridimensional con modelo bidimensional.....	44
4.1.4. Conductividad hidráulica equivalente entre enfoques. ....	48
4.2. Casos con pozos de bombeo. ....	52

4.2.1.	Comparación de casos bidimensionales con pozo de bombeo en la sección de observación. ....	53
4.2.1.1.	Pozo de bombeo out-pit. ....	54
4.2.1.2.	Pozo de bombeo in-pit. ....	56
4.2.2.	Comparación de caso pseudo-tridimensional con modelo bidimensional con pozo de bombeo en la sección de observación. ....	59
4.2.3.	Comparación de caso tridimensional con modelo bidimensional con pozo de bombeo en la sección de observación. ....	63
4.2.3.1.	Pozo de bombeo out-pit. ....	63
4.2.3.2.	Pozo de bombeo in-pit. ....	66
4.2.3.3.	Evaluación de representación del efecto de un pozo de bombeo en el modelo bidimensional. ....	68
4.2.4.	Representación del efecto del pozo de bombeo en el modelo bidimensional cuando se encuentra fuera de la sección de observación. ....	75
4.2.4.1.	Pozo de bombeo out-pit. ....	77
4.2.4.2.	Pozo de bombeo in-pit. ....	78
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>81</b>
5.1.1.	Conclusiones técnicas. ....	81
5.1.2.	Beneficios comerciales. ....	84
5.1.3.	Futura investigación. ....	85
<b>6.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>86</b>
<b>7.</b>	<b>Glosario</b> .....	<b>88</b>
<b>8.</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>89</b>
8.1.1.	Anexo I: Condiciones Iniciales. ....	89
8.1.2.	Anexo II: Tablas de resultados de ECMS para la conductividad hidráulica equivalente. ....	90

## Índice de figuras

Figura 1: Comparación visual de enfoque tridimensional y bidimensional.....	3
Figura 2: Impactos potenciales de optimizar la pendiente de un rajo.....	11
Figura 3: Orientación radial del flujo subterráneo a gran escala. ....	14
Figura 4: Vista aérea de Chuquicamata. ....	19
Figura 5: Vista aérea de Minera La Escondida.....	19
Figura 6: Dimensiones del rajo tipo considerado en el análisis.....	20
Figura 7: Sector A: Pared del rajo genérico.....	21
Figura 8: Sector B: Zona de la pendiente inter-rampas. ....	22
Figura 9: Vista en planta del volumen tridimensional. ....	24
Figura 10: Identificación de las superficies con condiciones de borde.....	26
Figura 11: Representación de un pozo de bombeo a través de condiciones de borde. ....	28
Figura 12: Piezómetros con los puntos de observación.....	31
Figura 13: Curva de contenido de agua. ....	36
Figura 14: Conductividad hidráulica en condición no saturada para $K_{sat}=1E-8$ [m/s].....	37
Figura 15: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para $K=1E-7$ [m/s]. ....	40
Figura 16: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para $K=1E-8$ [m/s]. ....	41
Figura 17: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para $K=1E-9$ [m/s]. ....	41
Figura 18: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para $K=1E-10$ [m/s]. ....	42
Figura 19: Modelo pseudo-tridimensional en FEFLOW 6.0. ....	43
Figura 20: Modelo tridimensional visto en FEFLOW 6.0. ....	44
Figura 21: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para $K=1E-7$ [m/s]. ....	45
Figura 22: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para $K=1E-8$ [m/s]. ....	46
Figura 23: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para $K=1E-9$ [m/s]. ....	46
Figura 24: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para $K=1E-10$ [m/s]. ....	47
Figura 25: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para $K=1E-7$ [m/s] y $K_{eq} = 1E-8$ [m/s] respectivamente. ....	50
Figura 26: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para $K=1E-8$ [m/s] y $K_{eq} = 5E-9$ [m/s] respectivamente. ....	51

Figura 27: Posición pozo out-pit en la sección de observación bidimensional.....	54
Figura 28: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo out-pit para $K=1E-08$ [m/s]......	55
Figura 29: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo out-pit para $K=1E-09$ [m/s]......	56
Figura 30: Posición pozo in-pit en la sección de observación bidimensional.....	57
Figura 31: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo in-pit para $K=1E-08$ [m/s]......	58
Figura 32: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo in-pit para $K=1E-09$ [m/s]......	58
Figura 33: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo out-pit para $K=1E-08$ [m/s]. .....	61
Figura 34: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo out-pit para $K=1E-09$ [m/s]. .....	61
Figura 35: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo in-pit para $K=1E-08$ [m/s]. .....	62
Figura 36: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo in-pit para $K=1E-09$ [m/s]. .....	62
Figura 37: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo out-pit para $K=1E-08$ [m/s] y $K_{eq}=5E-09$ [m/s]......	65
Figura 38: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo out-pit para $K=1E-09$ [m/s] y $K_{eq}=9E-10$ [m/s]......	65
Figura 39: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo in-pit para $K=1E-08$ [m/s] y $K_{eq}=5E-09$ [m/s]. .....	67
Figura 40: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo in-pit para $K=1E-09$ [m/s] y $K_{eq}=9E-10$ [m/s]. .....	67
Figura 41: Posición de los nodos en la criba del pozo representado.....	72
Figura 42: Posición de los pozos out-pit fuera de la sección visto en planta.....	77
Figura 43: Posición de los pozos in-pit fuera de la sección visto en planta.....	79
Figura 44: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para $K=1E-7$ [m/s] y $K_{eq} = 1E-8$ [m/s] respectivamente. ....	90

Figura 45: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-8$  [m/s] y  $K_{eq} = 5E-9$  [m/s] respectivamente. .... 91

Figura 46: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-9$  [m/s] y  $K_{eq} = 9E-10$  [m/s] respectivamente. .... 91



## Índice de tablas

Tabla 1: Calificación de resultados según error cuadrático medio. ....	6
Tabla 2: Producción nacional de minerales metálicos 2011. ....	9
Tabla 3: Tabla de costo y beneficio Caso Mina Morenci. ....	12
Tabla 4: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow. ....	40
Tabla 5: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D. ....	43
Tabla 6: Resumen de la comparación caso 3D vs 2D. ....	45
Tabla 7: Conductividad hidráulica equivalente para modelos bidimensionales. ....	49
Tabla 8: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow con pozo out-pit. ....	55
Tabla 9: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow con pozo in-pit. ....	57
Tabla 10: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D con pozo out-pit. ....	59
Tabla 11: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D con pozo in-pit. ....	60
Tabla 12: Resumen de la comparación casos 3D vs 2D con pozo out-pit. ....	64
Tabla 13: Resumen de la comparación casos 3D vs 2D con pozo in-pit. ....	66
Tabla 14: Ejemplo de procedimiento matemático generalmente usado para representar el efecto sobre la presión de poros de un pozo de bombeo. ....	70
Tabla 15: Factores de corrección calibrados según el caso y tipo para $K=1E-08$ [m/s]. ....	74
Tabla 16: Factores de corrección calibrados según el caso y tipo para $K=1E-09$ [m/s]. ....	74
Tabla 17: Eficacias entre utilizar un factor de corrección variable frente a uno constante. ....	75
Tabla 18: Factores de corrección según distancia del pozo out-pit para $K=1E-8$ [m/s]. ....	77
Tabla 19: Factores de corrección según distancia del pozo out-pit para $K=1E-9$ [m/s]. ....	78
Tabla 20: Factores de corrección según distancia del pozo in-pit para $K=1E-8$ [m/s]. ....	79
Tabla 21: Factores de corrección según distancia del pozo in-pit para $K=1E-9$ [m/s]. ....	79

# 1. Introducción

En el ámbito de la minería, específicamente en el área de la hidrogeología minera, es de especial interés el análisis de la distribución de la presión de poro ejercida por el agua subterránea, la cual es inducida por las excavaciones de un rajo y dependiente de las características hidrogeológicas de la roca. Cuando la explotación de un yacimiento ocurre bajo el nivel freático, se genera un gradiente de presiones que induce el flujo subterráneo hacia el fondo y las paredes de la excavación (Beale, 2007). Un control inapropiado de este fenómeno podría causar problemas operacionales (Vutukuri & Singh, 1995) y de estabilidad geotécnica en los taludes debido a la disminución de la resistencia al corte del macizo rocoso causado por el aumento de la presión de poro (González, 2009).

Con el objetivo de estudiar y predecir este comportamiento se ha recurrido en los últimos años, al desarrollo de modelos numéricos que permitan representar de forma precisa el flujo de agua subterránea. Hoy existen múltiples códigos comerciales<sup>1</sup> con los cuales se pueden desarrollar modelos numéricos del flujo subterráneo, ofreciendo distintas metodologías y herramientas de modelación, tales como modelación bidimensional (2D) o tridimensional (3D), de elementos finitos o diferencias finitas, incluyendo o no a la zona no saturada, entre otros.

Muchos trabajos han simplificado la modelación de presión de poro al interior de un rajo a través de secciones 2D radiales a éste, asumiendo que debido a la geometría y naturaleza del problema, se tiene un flujo esencialmente con la misma orientación radial de la sección, logrando de esta forma, simular de forma sencilla (en costos y tiempo) el flujo que se experimenta hacia el fondo de la explotación y su consecuente distribución de presiones de poro (Beale, 2007). Visto desde una escala global, esta simplificación suele entregar resultados calibrados a la piezometría registrada, aunque éstos pueden diferir en casos donde el fenómeno de flujo tenga una fuerte componente tridimensional, como es el caso de:

- 1) Sistemas fuertemente controlados por estructuras geológicas.

---

<sup>1</sup> Algunos softwares comúnmente utilizados: MODFLOW, MODFLOW-SURFACT, FEFLOW, SEEP/W, MINEDW, etc.

- 2) Unidades hidrogeológicas que desvían la orientación radial del flujo, tales como niveles de arcilla o limos.
- 3) Secciones cercanas a donde existen sistemas de drenaje artificiales que generan un efecto localizado en un sector particular del rajo.
- 4) Rajos donde la geometría propiamente tal tiene una influencia importante en el flujo subterráneo.

En relación a lo anterior, es de gran interés avanzar en el estudio de los diversos casos mencionados, a modo de entender los efectos en la distribución de la presión de poro y así lograr mejoras en la metodología de modelación bidimensional.

## 1.1. Objetivos

El objetivo central de este trabajo responde a la comparación del enfoque metodológico bidimensional en contraste con un enfoque tridimensional para la determinación de la distribución espacial y temporal de la presión de poros para un rajo minero ficticio generado en base a características que se han observado en la realidad. Particularmente se hará referencia al estudio de la influencia generada por la geometría del rajo y a casos en que hay presencia de pozos de bombeo cercanos a la sección bidimensional, que usualmente se utilizan como método de despresurización artificial en faenas mineras.

Los objetivos específicos son:

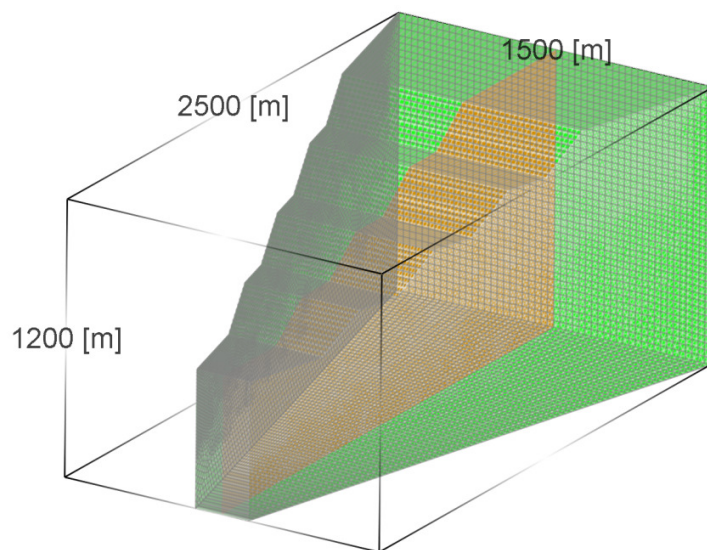
- La determinación de parámetros hidrogeológicos, geométricos y temporales que influyen en la implementación y resolución numérica de los distintos modelos en 2D y 3D, de modo de obtener un rajo ficticio tipo conceptualmente correcto, y lograr resultados consistentes en las simulaciones bidimensionales de SEEP/W y tridimensionales de FEFLOW.
- Entender el fenómeno del drenaje natural producido por la excavación del rajo minero, como también el drenaje artificial generado por pozos de bombeo aplicado a zonas del rajo, a través de la comparación de los resultados simulados por los

distintos enfoques, y lograr determinar los posibles motivos del porqué se producen las diferencias en los resultados.

- Proponer metodologías de aproximación adecuadas, de forma de obtener mejores resultados en la modelación bidimensional con SEEP/W, a modo de compensar el efecto de la geometría y/o pozos de bombeo.

## 1.2. Metodología general del trabajo

A grueso modo, la metodología general consistió en utilizar un sector de rajo minero ficticio que posee características geométricas e hidrogeológicas similares a las observadas en faenas mineras del norte de Chile<sup>2</sup>, la que será modelada numéricamente con elementos tridimensionales utilizando el software FEFLOW v6.0 desarrollado por DHI-WASY. De la misma forma, un perfil bidimensional representativo de la sección será modelado numéricamente con el software SEEP/W v2007 desarrollado por Geo-Slope, a modo de comparar los resultados de la distribución de la presión de poros obtenido bajo los distintos enfoques y obtener conclusiones en base a estos.



**Figura 1: Comparación visual de enfoque tridimensional y bidimensional.  
Fuente: FEFLOW, DHI WASY.**

<sup>2</sup> De ahora en adelante se le hará referencia como “rajo tipo”.

En la Figura 1, el volumen de color verde representa la sección de rajo ficticio tipo a modelar numéricamente. Además, en color naranja se encuentra resaltada la sección bidimensional representando el corte transversal localizado en la mitad del volumen y que será el correspondiente modelo bidimensional representativo. Al contrario de lo que la apariencia de la figura indica, el dominio del modelo numérico tridimensional no es axisimétrico, sino cartesiano, y su configuración se detalla en el apartado 3.1.

Ubicados en la sección bidimensional se disponen una serie de puntos de observación situados en función del interés geotécnico, que representarán una serie de piezómetros implementados con sensores de cuerda vibrante (ver apartado 3.6). Estos puntos de observación registran la carga hidráulica modelada, tanto para el enfoque bidimensional como para tridimensional, a modo de que con los resultados obtenidos se pueda lograr una comparación analítica entre los dos enfoques utilizados.

Por definición, la carga hidráulica de un punto es la suma de su elevación y la presión de poros expresada en metros. Si se obtiene la diferencia entre el resultado de carga hidráulica de un mismo punto de observación, obtenida a través de los dos enfoques, la diferencia será exclusivamente debido a la presión de poro, ya que la elevación del punto de observación es exactamente la misma para los dos modelos numéricos. Utilizando esta ventaja, se escoge como forma analítica el error cuadrático medio (ECM) para determinar las diferencias entre los enfoques, definida en la Ecuación 1:

$$ECM_{p,m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Xt_{p,m,i} - Xb_{p,m,i})^2}{n}} \quad [1]$$

dónde:

$ECM_{p,m}$  [m]: es el error cuadrático medio del piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$Xt_{p,m,n}$  [m]: es el valor de la carga hidráulica medida en el sensor  $i$  del modelo tridimensional para el piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$Xb_{p,m,n}$  [m]: es el valor de la carga hidráulica medida en el sensor  $i$  del modelo bidimensional para el piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$p$  [ ]: piezómetro medido.

$m$  [ ]: mes de registro.

$n$  [ ]: cantidad de sensores del piezómetro.

Identificar si cierto piezómetro en el modelo bidimensional subestima o sobrestima la carga hidráulica en relación a los valores obtenidos por modelo tridimensional, resulta ser una información sumamente útil para este trabajo de título, por lo tanto se incorpora un signo al error cuadrático medio tal como muestra la siguiente ecuación:

$$ECMS_{p,m} = \text{Signo}(\overline{Xt}_{p,m} - \overline{Xb}_{p,m}) \cdot ECM_{p,m} \quad [2]$$

dónde:

$ECMS_{p,m}$  [m]: es el error cuadrático medio con signo del piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$ECM_{p,m}$  [m] es el error cuadrático medio del piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$\text{Signo}$  [+/-]: es una función que entrega el signo matemático de su argumento.

$\overline{Xt}_{p,m}$  [m]: es el valor promedio de la carga hidráulica medida en el modelo tridimensional para el piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

$\overline{Xb}_{p,m}$  [m]: es el valor promedio de la carga hidráulica medida en el modelo bidimensional para el piezómetro  $p$  en el mes  $m$ .

Con la incorporación del signo al error cuadrático medio se deriva que si el EMCS obtenido es negativo, significa que en promedio el modelo bidimensional sobrestima en relación al modelo tridimensional las cargas hidráulicas medidas para el piezómetro en cuestión. Su contra recíproco también es cierto, es decir que si el signo es positivo, el modelo bidimensional subestima las cargas hidráulicas simuladas en comparación al modelo tridimensional para el piezómetro seleccionado.

Relacionar la magnitud del error cuadrático medio obtenido con su importancia en la estabilidad geotécnica no resulta ser algo directo, ya que va a depender principalmente del proceso iterativo que se tiene con el diseño geotécnico aplicado a la pared del rajo. Es perfectamente posible que para diseños geotécnicos conservadores se tenga que diferencias significativas entre la presión de poro simulada y la real, no produzcan un cambio significativo en los factores de seguridad determinados para la pendiente, y por lo tanto, no generen problema alguno de inestabilidad en el rajo. Asimismo, resulta factible el caso contrario, donde pequeñas diferencias detectadas entre la presión de poro simulada por el modelo numérico y la observada

en la realidad, produzcan un fuerte impacto en el factor de seguridad de la pendiente, pudiendo provocar inestabilidad localizada en el rajo, o inclusive problemas globales de estabilidad.

Considerando que el análisis geotécnico del rajo se escapa de los alcances de este trabajo de título, resulta necesario incorporar en este informe una escala generalizada que relacione el error cuadrático medio con la posible importancia en el análisis geotécnico, utilizando como base la experiencia en proyectos ya realizados relacionados a esta temática. También la magnitud del error cuadrático medio de cada piezómetro resultará importante para determinar dónde se encuentran localizadas las mayores diferencias en la pared del rajo, como también su comportamiento en el tiempo.

En relación a lo anterior, la Tabla 1 entrega la relación entre la magnitud del ECM y su diagnóstico particular utilizado para este trabajo de título:

<b>Magnitud del ECM</b>	<b>Diagnóstico de la situación</b>
Entre 0 a 15 [m]	Diferencias adecuadas entre los distintos enfoques para el piezómetro determinado.
Entre 15 a 30 [m]	Diferencias de consideración entre los distintos enfoques para el piezómetro determinado.
Sobre 30 [m]	Diferencias preocupantes entre los enfoques, que requieren de mayor análisis para el piezómetro determinado.

**Tabla 1: Calificación de resultados según error cuadrático medio.**  
Fuente: Elaboración propia.

Si bien los rangos de magnitud del ECM escogidos que se presentan en la tabla anterior están definidos en virtud de la experiencia en proyectos similares, también tienen una justificación geométrica, ya que tal como será detallado más adelante, la altura de los bancos dentro de la pared del rajo tienen una altura promedio de 15 metros, en otras palabras, superar ese valor de ECM equivaldría a fallar en un banco promedio de altura de presión de poro; de igual forma, superar los 30 metros del ECM es como fallar en dos bancos promedio en el sector.

No se utiliza un formato normalizado del ECM expresado en porcentajes, ya que no tiene mayor implicancia geotécnica tener diferencias del 30% si es que esta diferencia corresponde a 1 metro de presión; el caso contrario, es preocupante tener diferencias de 30 metros a pesar de que sea un 1% de diferencia normalizada.

Cabe destacar que no se realizarán comparaciones de flujos de entrada o de salida entre los modelos numéricos, debido a la dificultad que representa hacer comparativos estos flujos entre un enfoque bidimensional y uno tridimensional. En general, y tal como se entenderá durante este trabajo de título, la finalidad de un modelo bidimensional va enfocada en entregar distribuciones de presiones de poro calibradas a base de un buen ajuste con los datos de piezometría aledaña, sin ahondar profundamente en los caudales involucrados (sea recarga, pozos de bombeo, etc.), pero sí teniendo cuidado en cumplir criterios de balance volumétrico interno de cada modelo numérico.

El software utilizado para realizar los modelos bidimensionales es SEEP/W desarrollado por Geo-Slope en su versión 2007, principalmente debido a los buenos resultados que ha entregado la experiencia en proyectos liderados por Schlumberger Water Services relacionados con cálculos de distribución de la presión de poro. Además, en base a esta experiencia, se han definido métodos y procesos desarrollados internamente para construir y resolver los modelos numéricos con un enfoque bidimensional, los que serán utilizados en partes de este trabajo.

Si bien este código numérico posee un buen desempeño para dos dimensiones, su versión del código en 3D no ha recibido buenas críticas. Ante esto, se optó por usar FEFLOW desarrollado por DHI-WASY en su versión 6.0, que entrega las herramientas para abordar modelos tridimensionales que sean congruentes con el modelo bidimensional a representar, tanto en términos geométricos, de grilla, de ecuaciones utilizadas en la resolución y de los parámetros hidrogeológicos involucrados.

Es necesario aclarar que este trabajo de título no pretende centrar el análisis en comparar el desempeño individual de los softwares involucrados, si no exclusivamente en la comparación de resultados obtenidos por los enfoques bidimensional y tridimensional. Con el objetivo anterior se opta por explicar detalladamente los modelos numéricos utilizados (ver Capítulo 3), a modo de que se pueda asumir que la resolución en ambos softwares es equivalente entre software, y de esta forma centrarse netamente en los resultados.

Es también importante mencionar que en algunas ocasiones se considerarán los resultados de la modelación tridimensional como valores de referencia para procesos de adaptación de los modelos bidimensionales en algunas de sus características hidrogeológicas, abriendo la posibilidad de entender de que son datos más adecuados a la realidad; no obstante, no es la intención de este trabajo ensalzar la modelación tridimensional en desmedro del enfoque



bidimensional, ya que este último posee diversos beneficios que lo hacen más atractivo para los casos de modelación considerados, tal como será mencionado en el marco conceptual.

### 1.3. Organización del informe

El Capítulo 2 hace relación al marco conceptual en el que se desarrolla el trabajo de título, dando a entender las razones y el contexto en que tienen sentido los cálculos, análisis y conclusiones que se entregarán. El marco conceptual es de suma importancia, ya que ofrece los detalles que definen los casos en que resultan de interés aplicar las metodologías descritas.

El Capítulo 3 entrega las características de los modelos numéricos empleados, dando especial énfasis a la relación y congruencia entre los distintos parámetros de modelación empleado en los distintos softwares. En general la modelación numérica es muy sensible a tales parámetros, pudiendo entregar diferencias significativas en los resultados.

En el Capítulo 4 se entregan los resultados de las comparaciones, además se busca encontrar los motivos de las diferencias entre los resultados, como también probar distintas alternativas metodológicas de la modelación bidimensional que homologuen los resultados con el enfoque tridimensional.

Finalmente, el Capítulo 5 entrega las conclusiones de lo desarrollado en el trabajo de título desde un punto de vista técnico, los beneficios potenciales de ellas y se plantea la futura investigación relacionada a esta línea de trabajo.

## 2. Marco conceptual

Chile es un país con una industria minera de gran relevancia mundial, donde destaca la explotación de minerales metálicos tales como Cobre, Molibdeno, Oro, Plata y Hierro (SERNAGEOMIN, 2011). Del total de la producción, las grandes compañías mineras lideran la extracción de minerales, tal como se observa en la Tabla 2.

<b>Categoría</b>	<b>Cobre (tmf<sup>3</sup>)</b>	<b>Molibdeno (tmf)</b>	<b>Plata (kg)</b>	<b>Oro (Kg)</b>	<b>Hierro (tmf)</b>
Grandes	4,859,400	40,698	37,631	1,178,518	5.998.267
Medianas	305,581	-	6,385	98,399	1.749.175
Pequeñas	92,214	-	1,391	14,355	-
<b>Total</b>	<b>5,257,195</b>	<b>40,698</b>	<b>45,137</b>	<b>1,291,272</b>	<b>7,747,442</b>

Tabla 2: Producción nacional de minerales metálicos 2011.

Fuente: SERNAGEOMIN.

En particular sobre la producción de cobre, mineral obtenido casi en su totalidad por la gran minería, cerca del 85% del material bruto se extrae a través de faenas a cielo abierto, dejando sólo un 15% por faenas subterráneas (Ortíz, 2008).

Bajo este contexto es que se entiende el objetivo de este trabajo de título, donde los principales interesados en obtener simulaciones de la distribución de la presión de poro corresponde a la gran minería a cielo abierto.

El porqué, tiene relación con el tratar de cumplir la meta de cualquier mina a cielo abierto, que consiste esencialmente en optimizar las configuraciones de la excavación en el que se accede al pórfido mineralizado, con tal de maximizar el mineral recuperado y en consecuencia los ingresos financieros, sin desmedro de la seguridad operacional de la faena.

Cuando la excavación de un rajo alcanza el nivel freático, resulta absolutamente necesario lidiar con el drenaje natural del subsuelo (Beale, 2007), debido a que en caso de que el agua ingrese al rajo, puede generar problemas operacionales tan sencillos como complicaciones de acceso a las zonas de trabajo, aumento de uso de explosivos, mayor frecuencia de fallos en las

---

<sup>3</sup> Toneladas métricas finas.

explosiones, mayor desgaste en los equipos utilizados, generación de drenaje ácido y condiciones inseguras de trabajo. Aún así, la razón fundamental de preocuparse del drenaje natural sigue siendo la optimización de la pendiente de la pared del rajo.

Para el escenario nacional, se suele obtener grandes beneficios al instalar un programa de despresurización artificial, particularmente debido al gran tamaño de las excavaciones de las faenas mineras. Esto conlleva a la posibilidad de optimizar la pendiente del rajo, manteniendo la seguridad dentro de la mina a través del análisis geotécnico de la influencia que produce la despresurización artificial, haciendo necesario como variable de entrada estudios de las distribuciones temporales de la presión de poro.

Para entender, desde un punto de vista técnico, la relevancia de la presión de poros en la estabilidad del rajo, se debe introducir nociones básicas de geotecnia, ya que en el marco de la exigencia gubernamental, se posee una ‘Guía Metodológica para la Presentación de Proyectos a Rajo Abierto’ (SERNAGEOMIN, 2010), donde se detalla la importancia intrínseca de estudios de estabilidad de los taludes en la faena.

La estabilidad de un suelo tiene una fuerte relación con la resistencia al corte máxima que posea, y que suele representarse bajo la ley de falla de Mohr-Coulomb dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = \sigma \cdot \tan\phi + c \quad [3]$$

dónde:

$\tau$ [Pa]:	Resistencia al corte en una falla potencial.
$\sigma$ [Pa]	Tensión normal al plano de falla.
$\phi$ [rad]:	Ángulo interno de fricción del suelo.
$c$ [Pa]:	Cohesión del suelo en la superficie de falla.

La influencia de la presión de poros se involucra con el concepto de tensión normal efectiva introducida por Terzaghi (1943), donde se debe corregir la tensión normal cuando se encuentra bajo la presión de un fluido, tal como se muestra en la Ecuación 4.

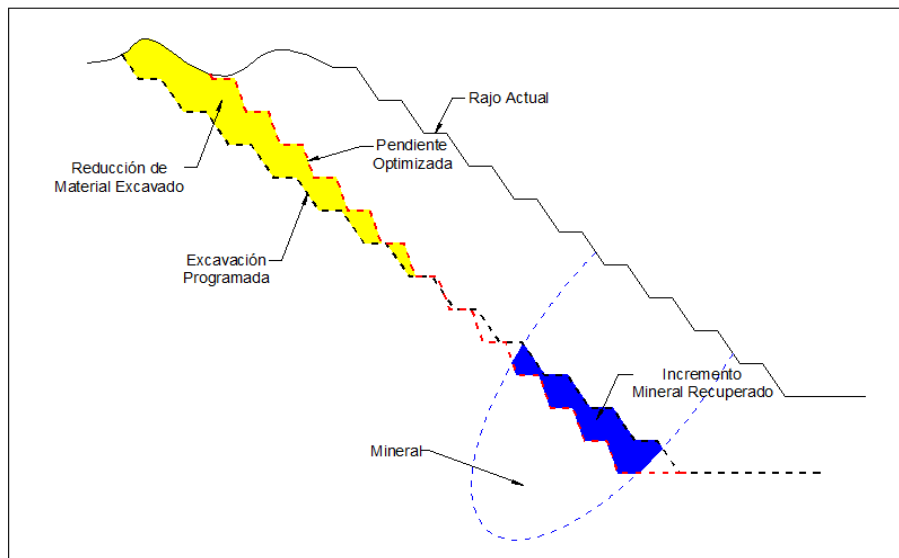
$$\sigma' = \sigma - u \quad [4]$$

dónde:

- $\sigma'$  [Pa]: Tensión normal efectiva
- $\sigma$  [Pa]: Tensión normal del suelo.
- $u$  [Pa]: Presión de poros del agua.

La presión de poro ejercida por el agua subterránea es nula cuando se encuentra exactamente en el nivel freático, y positiva cuando está bajo ese nivel. Por lo tanto, se entiende que al disminuir la presión de poro aumenta la tensión normal efectiva, lo que a su vez aumenta la resistencia del material al corte antes de una falla (González, 2009).

En la práctica, mejorar la resistencia del suelo a través de la despresurización otorga la oportunidad de mejorar el ángulo de la pendiente general del rajo, reduciendo los costos de excavación y mejorando la recuperación de mineral (Stacey, 2009), tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2: Impactos potenciales de optimizar la pendiente de un rajo.**  
**Fuente: Stacey, 2009.**

El impacto de tener pendientes más empinadas va a variar dependiendo de la faena, pero a modo de entender su magnitud, se presentan algunos ejemplos genéricos en los siguientes párrafos (Stacey, 2009).

Si se tiene una pendiente de 500 metros de profundidad con un ángulo de 50° y se puede optimizar 1° adicional, esto se traduce en aproximadamente una reducción de 3,600 [m<sup>3</sup>] de material excavado por cada metro lineal de superficie.

Si aplicamos el mismo concepto del ejemplo anterior a una geometría similar a las que vemos en el norte de Chile, con una forma elipsoidal de 2000 [m] de largo, 1000 [m] de ancho y 400 [m] de profundidad, y con un ángulo general de la pendiente de 38°, y se lograra incrementar 1° el ángulo de la pendiente, se reduciría la excavación en unas 90 millones de toneladas. Asumiendo un costo promedio de US\$1 por tonelada, esto significa un ahorro de US\$90 millones sólo relacionados a la excavación.

Lo anterior sólo tiene relación a una reducción total de costos que se obtiene por conceptos de optimización de pendiente, pero también hay una reducción en los costos anuales operacionales proyectados que se pueden obtener al incorporar un programa de despresurización. Estos costos son difíciles de proyectar o estimar, pero se tiene como antecedente los datos de la Mina Morenci-Rajo Metcalf ubicada en Arizona, U.S.A. quienes implementaron un programa de drenaje artificial interno al rajo durante su operación entre los años 1998 al 2004 (Beale, 2007), ver Tabla 3.

Ítem	Beneficio (US\$/año)	Beneficio (US\$/ton)
Ahorro en gastos de explosiones.	389,000	0.010
Ahorro en mantención de la pendiente.	960,000	0.024
Reducción de operación de sumideros dentro del rajo.	164,000	0.004
Ahorro en gastos de acarreo de material	709,000	0.018
Ahorros en mantención de equipos.	800,000	0.020
Gastos de energía	-53,000	-0.001
<b>Total Costo Beneficio</b>	<b>2,969,000</b>	<b>0.074</b>

Tabla 3: Tabla de costo y beneficio Caso Mina Morenci.  
Fuente: Beale, 2007.

Desarrollar un programa de despresurización también tiene un costo asociado, el cual puede ser muy elevado según sean los requerimientos específicos de despresurización que posea el rajo, no obstante, en líneas generales los beneficios ya mencionados suelen superar con creces los costos del programa.

Las directrices generales que se sugieren para el desarrollo de un programa de despresurización son las siguientes (Beale, 2007):

- Paso 1: Recolectar datos hidrogeológicos y desarrollar un modelo conceptual generalizado del sitio de la faena.
- Paso 2: Determinar la necesidad y objetivo de un programa de despresurización enfocado en la mina.
- Paso 3: Llevar a cabo la recolección de datos específicos al área de la pared del rajo.
- Paso 4: Preparar un modelo hidrogeológico conceptual específico a la pared del rajo.
- Paso 5: Desarrollar un modelo numérico hidrogeológico de la pared del rajo.
- Paso 6: Diseñar e implementar las medidas de despresurización requeridas.
- Paso 7: Monitorear las presiones de poro antes y durante la excavación del rajo.

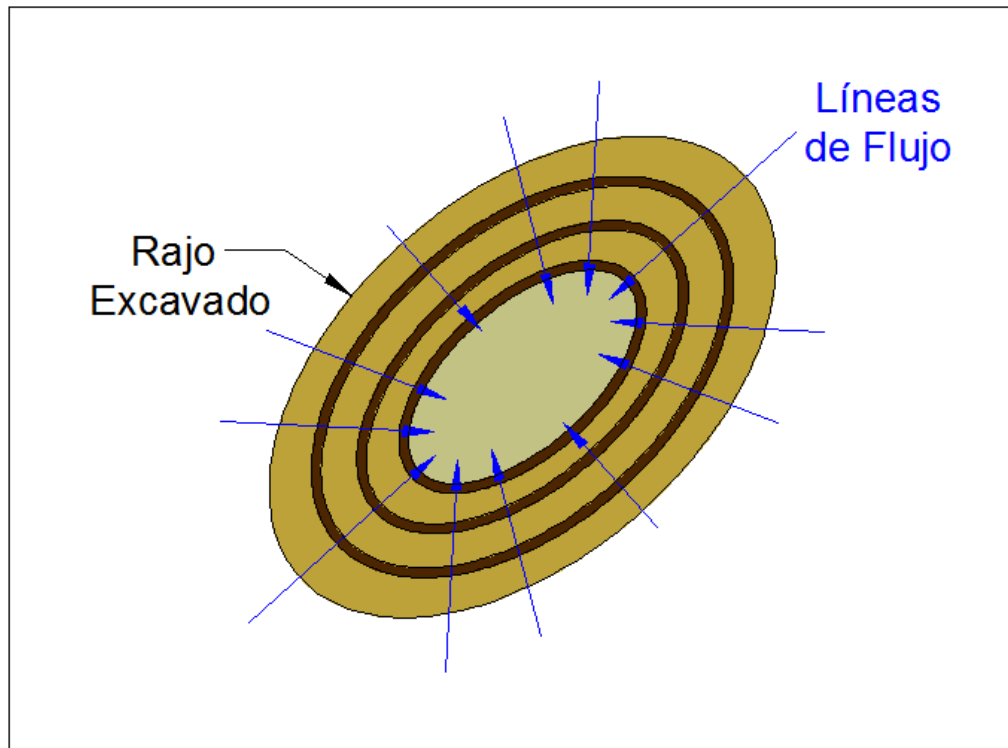
El paso 5 es de directa relación con los objetivos planteados, y es en este punto donde entra un debate respecto a qué tipo de enfoque utilizar, tridimensional o bidimensional, en base a tiempos de resolución, representación de flujos subterráneos, precisión de resultados, restricciones geométricas, etc. Los argumentos del debate, harán que la balanza se incline hacia uno o el otro enfoque dependiendo de la situación particular de cada faena minera, particularmente referente a proyecciones de excavaciones bajo el nivel freático, nivel potencial de despresurización requerido, cantidad de datos hidrogeológicos disponibles, entre otros factores.

Si se parte de la base de que el flujo subterráneo en las inmediaciones de un rajo a cielo abierto es intrínsecamente tridimensional, el enfoque lógico de enfrentar un problema de modelamiento de flujo subterráneo debiese ser teniendo elementos tridimensionales.

Actualmente los códigos numéricos incorporados en los softwares de modelación, en conjunto con la capacidad de procesamiento de los computadores, son capaces de resolver modelos numéricos tridimensionales de grandes rajos (Martínez & Ugorets, 2010), sin embargo,

determinar si resulta práctico y económicamente rentable construir tales modelos es de suma importancia, especialmente evaluando su capacidad de ser flexibles al evaluar distintas opciones de despresurización artificial y las modificaciones constantes del plan minero de excavación.

Es aquí donde entra el enfoque bidimensional, basado en el supuesto que, desde un punto de vista global, la orientación del flujo subterráneo es cuasi-radial, por lo que los modelos numéricos pueden orientarse paralelo a las líneas de flujo, reduciendo el problema a dos dimensiones tal como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3: Orientación radial del flujo subterráneo a gran escala.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Este enfoque radial bidimensional entrega varios beneficios comparado con el enfoque tridimensional, tales como:

- Las secciones pueden coincidir con las secciones características de los modelos geotécnicos bidimensionales. Esto permite que los datos geológicos recolectados se concentren en las áreas cercanas a las secciones claves de estabilidad, pudiendo utilizarse la información en conjunto, como es el caso de

la litología, alteración y mineralización, que sirven para conceptualizar las unidades hidrogeológicas de los modelos.

- El dominio del modelo bidimensional es más acotado, lo que permite aumentar el refinamiento de la grilla para poder representar con un mayor nivel de detalle gradientes verticales complejos de presión de poro, que suelen presentarse cuando se tienen unidades hidrogeológicas o geometrías de excavación exigentes.
- Durante etapas de diseño geotécnico y optimización de pendientes, se requiere que los resultados de la calibración de los modelos numéricos tengan un buen ajuste con los datos de la piezometría aledaña. Los modelos bidimensionales destacan para estos propósitos, ya que son más fáciles de manejar, modificar y controlar; sumado a tener tiempos de resolución considerablemente menor, lo que significa que se puede realizar un mayor número de iteraciones en la calibración para obtener un mejor ajuste.
- Acorde con el punto anterior, la simulación de escenarios futuros es más rápida, permitiendo probar diversas alternativas de despresurización artificial en poco tiempo, a modo de obtener el nivel de disipación objetivo de la presión de poro.
- Las revisiones de los modelos en minería son frecuentes, especialmente con nuevos datos de piezometría disponible, cambios en los planes mineros futuros, proyección de nuevos planes de despresurización, etc. En muchos casos resulta impracticable efectuar tantas modificaciones periódicas utilizando un modelo tridimensional, al contrario de lo sencillo que resulta en un modelo bidimensional.

La calibración de los modelos bidimensionales se realiza con los datos de piezometría aledaña, sean a través de pozos de observación o sondajes habilitados con múltiples sensores de cuerda vibrante en el eje vertical. Durante el proceso de calibración, se suele ajustar principalmente las conductividades hidráulicas saturadas de las unidades hidrogeológicas presentes en la sección, a modo de llegar al mejor ajuste con los datos piezométricos. Además, en caso de haber sistemas de drenaje artificial –tales como drenes horizontales o pozos de bombeo- se suelen incorporar sus efectos como condiciones de borde al modelo bidimensional que representen el drenaje artificial esperado en la sección. Estas condiciones de borde también



pueden considerarse como variables secundarias de calibración, ya que también pueden ajustarse para mejorar el resultado de la calibración en el sector. En última instancia, en caso que el ajuste aún no sea adecuado, se procede por modificar otros parámetros, tal como el coeficiente de compresibilidad del esqueleto o valores de humedad saturada o residual, aunque sólo se opta como recurso ulterior para mantener consistencia de las unidades hidrogeológicas entre las diferentes secciones bidimensionales del rajo.

Entonces, se entiende que al existir tantas variables disponibles para calibrar, que los resultados finales de la calibración suelen lograr un buen ajuste con los valores de la piezometría aledaña, no obstante, surge una gran pregunta ¿Son congruentes los parámetros hidrogeológicos calibrados con los parámetros reales? En otras palabras, si fuese capaz de obtener un buen set de datos puntuales reales de conductividad hidráulica o de almacenamiento en la sección. ¿Existiría correspondencia entre esos valores y los obtenidos por medio de la calibración del modelo numérico?

En proyectos reales, los reportes geológicos de las pruebas hidráulicas realizadas en los sondajes, entregan rangos de conductividades hidráulicas que se relacionan a cada unidad hidrogeológica presente en el rajo (Kruseman & De Ridder, 1990). Durante la calibración de los modelos numéricos bidimensionales impera el criterio de no utilizar conductividades fuera de tal rango, sin embargo hay ocasiones donde queda la impresión de que es necesario escaparse del rango para obtener una mejor calibración.

Es posible que las conductividades hidráulicas obtenidas por el modelo numérico tiendan a compensar otros efectos en la distribución de la presión de poro, como por ejemplo, los relacionados a la geometría tridimensional del rajo, al sistema de drenaje artificial presente y a otros factores que imponen un flujo subterráneo tridimensional localizado. Es parte de los objetivos de este trabajo de título lograr evaluar, y en la medida de lo posible mejorar, la congruencia entre el flujo subterráneo real, el modelo conceptual y el modelo numérico asociado; dando como resultado una modelación de la distribución de la presión de poro más precisa y conceptualmente más válida.

### **3. Caracterización del rajo a modelar**

Uno de los puntos clave de este trabajo de título consiste en lograr definir un rajo ficticio tipo que sea representativo a los observados en faenas mineras del norte de Chile, tanto desde el punto de vista de diseño geométrico producto de las excavaciones de un plan minero, como también desde el punto de vista hidrogeológico.

El porqué utilizar un rajo ficticio tipo representativo y no un caso real, responde a varios puntos que se consideraron importantes al minuto de plantear el objetivo de este estudio, entre los que destacan: mantener la confidencialidad de los datos de clientes involucrados con Schlumberger Water Services; aislar los efectos en los resultados de parámetros específicos que influyen en la modelación numérica, particularmente geometría y conductividad hidráulica; y por último, hacer que los análisis y conclusiones sean más extensivas que a sólo un caso particular real.

En detalle, definir las características geométricas busca que el diseño de la pared del rajo tipo sea consistente con un estado de excavación de faenas mineras representativas situadas en el norte de Chile.

Por otro lado, definir las características de la grilla usada, condiciones de borde y condiciones iniciales, tiene relación a seguir un procedimiento de modelación numérica que es usualmente utilizado en este tipo de estudios de distribución de presión de poro. Algunos ejemplos de lo anterior, son determinar los tamaños de los elementos numéricos de los modelos, la forma de considerar el flujo regional de agua subterránea de un acuífero presente y una metodología para determinar condiciones iniciales al modelo cuando no se tiene mayor información piezométrica de los estados de excavación previos de rajos con varios años en operación.

Los tiempos de simulación y puntos de observación, van enfocados principalmente a representar a lo que acontece regularmente en un plan de monitoreo de mediciones piezométricas en los rajos, tanto en la localización de los puntos de monitoreo, como su frecuencia en el tiempo.

Por último, se definen las características hidrogeológicas del macizo rocoso, donde se busca utilizar un set de parámetros hidrogeológicos representativos, con la salvedad de dos supuestos que no se observan en casos reales: que todo el macizo rocoso tenga una sólo unidad hidrogeológica homogénea y que exista la ausencia absoluta de fallas geológicas. Estos supuestos no fueron asumidos con la intención de facilitar la modelación numérica, si no con el objetivo de responder cuál es el efecto aislado producido por la conductividad hidráulica del macizo rocoso para los distintos análisis que se llevaron a cabo durante este estudio.

### 3.1. Características geométricas.

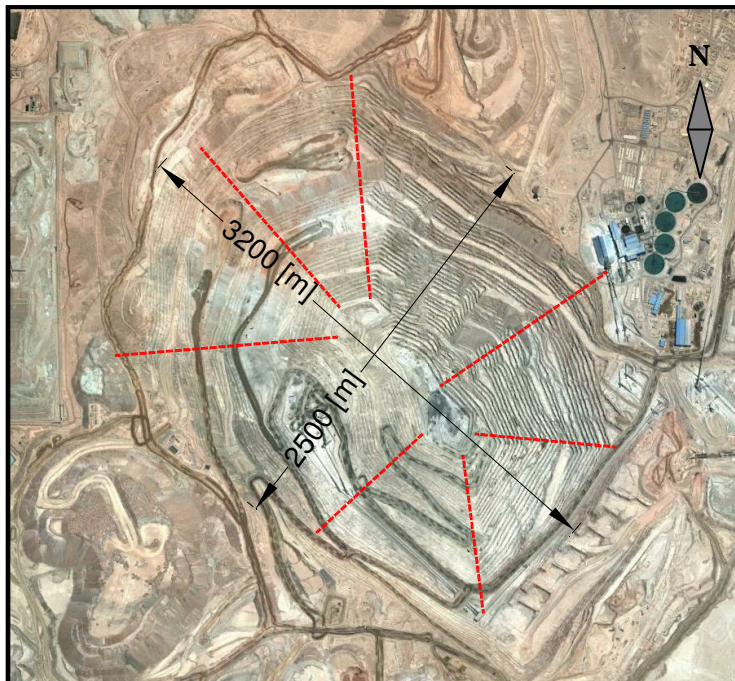
En este apartado se detallan las características geométricas generales tanto de la sección transversal como de la representación tridimensional del rajo. Es necesario resaltar que el diseño de la pendiente de un rajo de gran tamaño corresponde a un proceso que requiere de un análisis riguroso de la información local recabada, por lo que sus características pueden diferir sustancialmente entre distintas faenas mineras. A pesar de esto, existen consideraciones globales en la literatura que permitirán de forma simple poder definir nuestro rajo tipo. En particular, el capítulo 10 *Slope design methods* del libro *Open Pit Slope Design* (Lorig, Stacey, & Read, 2009) se utilizará como guía para este efecto.

En las Figuras 4 y 5 se muestra una vista aérea de dos faenas mineras importantes del norte de Chile, Chuquicamata y Escondida, donde se puede observar su forma semi elipsoidal y sus dimensiones globales de largo y ancho. En particular, sobre la figura de Minera Escondida se superpusieron líneas rojas con el fin de identificar sectores del rajo minero donde la pendiente posee un diseño uniforme en toda la sección, característica que va a ser de importancia para el diseño tridimensional del rajo ficticio tipo.

Se comenzará con determinar las características geométricas del perfil transversal bidimensional, siguiendo los diseños observados en faenas reales, y corroborando que los ángulos y dimensiones escogidas cumplan con las directrices generales de diseño.

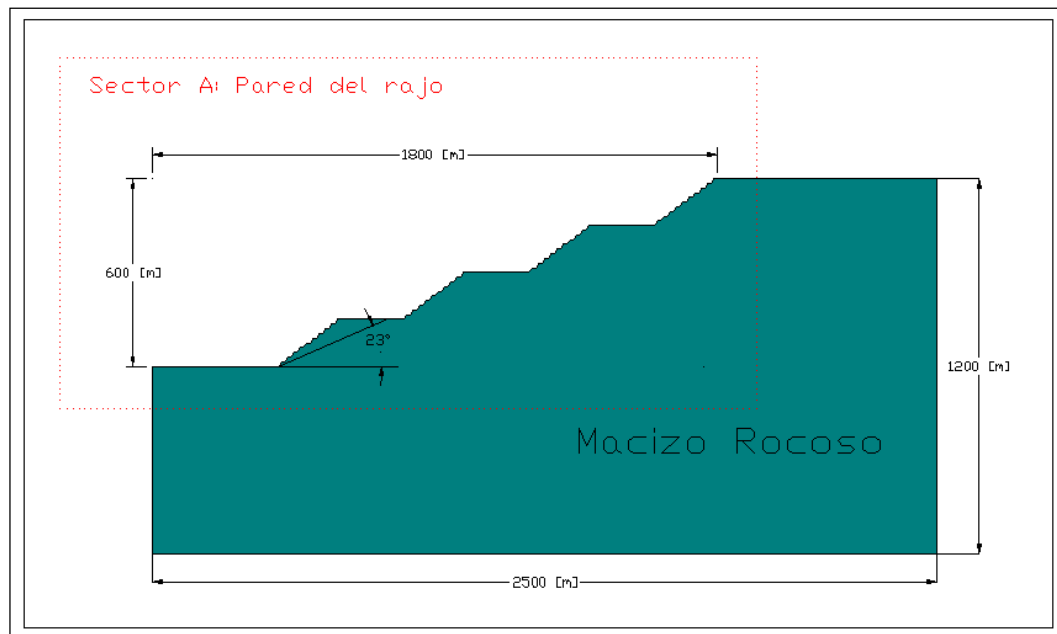


**Figura 4: Vista aérea de Chuquicamata.**  
Fuente: Google Earth (Foto Noviembre 2012).



**Figura 5: Vista aérea de Minera La Escondida.**  
Fuente: Google Earth (Foto Noviembre 2012).

La sección transversal del rajo tipo, posee las dimensiones globales de 2,500 [m] de largo y 1,200 [m] de profundidad como se muestra en la Figura 6. La profundidad de la excavación representada en el fondo del rajo es de 600 [m], dando como resultado otros 600 [m] extras de macizo rocoso en el modelo, con el fin de que se tenga suficiente profundidad para simular las presiones de poro en el fondo del rajo. El largo total de la excavación en la superficie del rajo es de 1,800 [m], por lo que el inicio de la excavación queda a 700 [m] del extremo derecho de la sección.



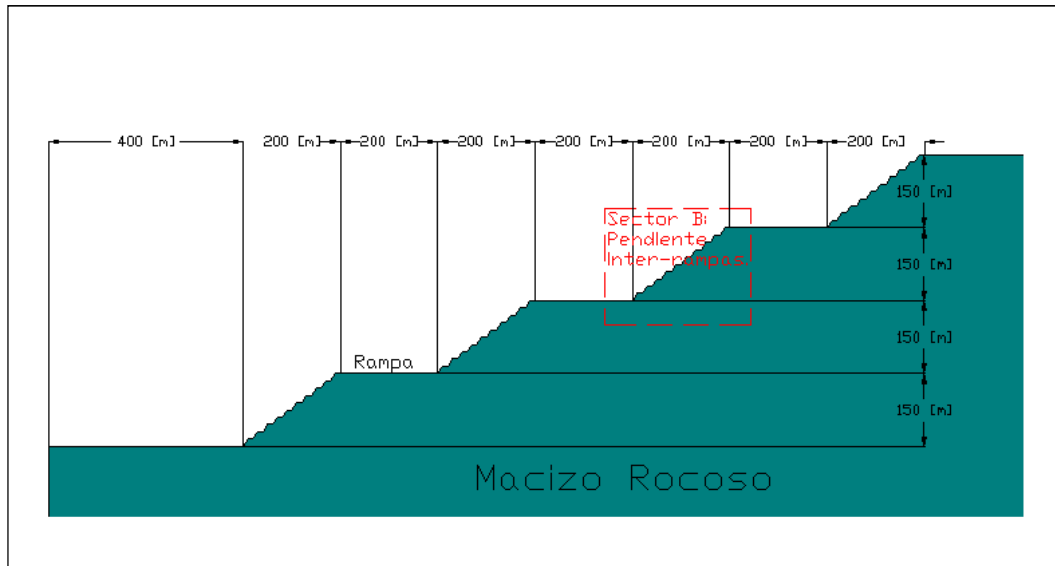
**Figura 6: Dimensiones del rajo tipo considerado en el análisis.**  
Fuente: Elaboración propia.

En la misma figura se resalta el Sector A, correspondiente a la pared del rajo que se detalla en la Figura 7, en donde el fondo del rajo se representa como 400 [m] horizontales, para luego dar paso a la pared del rajo.

Los métodos de diseño en detalle de las pendientes inter-rampas requieren de múltiples datos referentes a las estructuras presentes en el rajo<sup>4</sup>, los que permitan realizar una serie de pruebas relacionadas al análisis de estabilidad, pero al desconocer estos datos, se opta por considerar sólo la altura y ángulo de la pendiente inter-rampas en el diseño.

<sup>4</sup> Orientación, espaciamento, longitud, ubicación, resistencia al corte, etc.

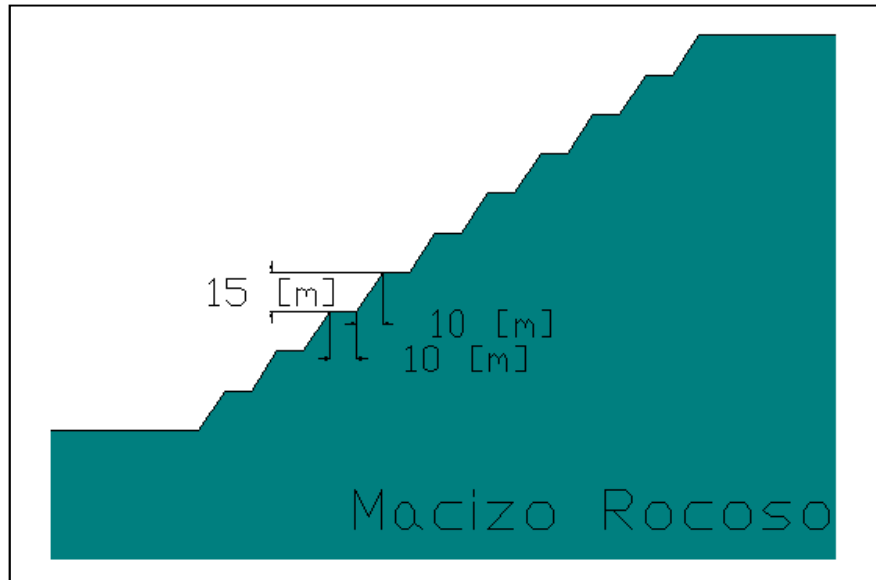
La determinación de la altura suele ser dada por la diferencia de cotas que se obtiene entre las rampas de acceso diseñadas para la circulación de maquinaria de una forma segura. En consideración a esto, es que la altura máxima observada en faenas mineras suele rondar entre 100 a 200 [m], definiéndose en esta oportunidad en 150 [m].



**Figura 7: Sector A: Pared del rajo genérico.**  
Fuente: Elaboración propia.

En relación al ángulo formado en la pendiente inter-rampas, este tiende a estar principalmente influenciado por las características de diseño de los bancos, por lo que para este caso particular será de  $36.9^\circ$  correspondiente a un talud de relación H : V de 2 : 1.5. Respecto al valor seleccionado, los ángulos de la pendiente inter-rampas suelen estar acotados a una restricción máxima de  $40^\circ$ , por lo que este caso estaría acorde a tal consideración.

En la Figura 7 se destaca el Sector B, que entrega los detalles de la zona interna de la pendiente inter-rampas, principalmente relacionado al diseño escogido en los bancos, tal como se observa en la Figura 8.



**Figura 8: Sector B: Zona de la pendiente inter-rampas.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

El diseño de los bancos suele enfocarse en entregar condiciones de trabajo seguras frente a la caída de material pequeño, y garantizar que se tenga acceso a los bancos por los operadores, asegurando el monitoreo y limpieza frecuente del material acumulado por las caídas de rocas.

La altura de los bancos suele estar acotada por la capacidad del equipamiento disponible para su excavación, por lo tanto, los rangos observados en rajes mineros son del orden de 10 a 18 [m], escogiendo para este caso, el valor más común correspondiente a 15 [m].

En relación al ancho del banco, se suele determinar según la capacidad que tendrá para detener y acumular potenciales caídas de roca. En particular, del volumen total de material que eventualmente podría caer, se adoptan criterios de retención cercanos al rango del 80%, ya que valores superiores a este implicarían anchos de bancos muy espaciosos, poco rentables y por ende impracticables. Como referencia se puede utilizar la relación empírica publicada por Ritchie (1963)<sup>5</sup> definida por la ecuación:

$$\text{Ancho Banco} = 0.2 \cdot \text{Alto Banco} + 4.5 \text{ [m]} \quad [5]$$

Según la altura de banco escogida, la ecuación entrega un ancho de banco sugerido de 7.5 metros, pero para efectos de no superar la restricción de 40° de la pendiente inter-rampas, y a

<sup>5</sup> Desarrollada por Call & Nicholas Inc.

la vez aumentar la capacidad de retención de caídas de rocas, se define un ancho de banco de 10 metros.

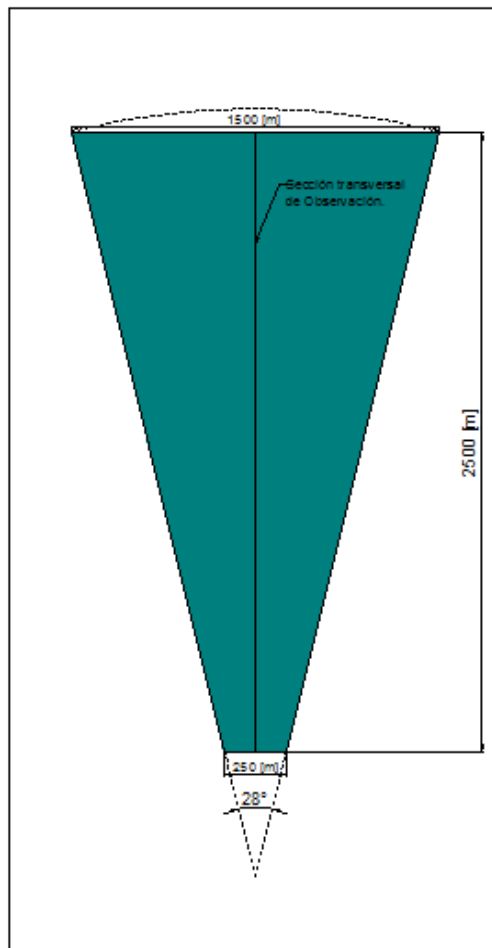
Por último queda definir el ángulo del banco, que dependen de muchos datos referentes a fracturas, daño resultante del uso de explosivos y la resistencia puntual del macizo rocoso, que en caso de ser valores conocidos permitirían determinar un factor de seguridad en función del ángulo del banco. Sin ahondar en tales detalles debido a la ausencia de estos datos, el ángulo escogido es de  $56.3^\circ$  correspondiente a un talud con la relación H : V de 1 : 1.5.

Una vez definidas las características de la sección transversal, queda detallar las características tridimensionales del rajo. En ese ámbito, se observa que las faenas reales poseen sectorizaciones de la pared del rajo, en donde las características de diseño son similares en todo el sector. Estas sectorizaciones dependen de las características geotécnicas de las distintas zonas del rajo, por lo que las dimensiones que abarcan cada una pueden ser bien amplias o bien acotadas. En particular, sobre la Figura 5 de Minera Escondida, se superpusieron líneas para identificar distintas zonas de la pared del rajo sectorizadas con el mismo diseño.

La elección de una sección tridimensional a modelar no es algo trivial, ya que debe considerar evitar el ‘efecto borde’ producido por las caras laterales del modelo; permitir que el efecto de despresurización del pozo de bombeo a introducir, se desarrolle completamente; y considerar la relación que hay entre la recarga del acuífero presente y la superficie de la pared del rajo que permite el drenaje natural del flujo subterráneo.

Teniendo en mente las consideraciones anteriores, se opta por definir el ángulo que define la tridimensionalidad en función a algunas de las secciones de la pared observadas en Minera Escondida (Figura 5), en particular las que posean dimensiones geométricas similares a las escogidas en la sección transversal definida, dando como resultado lo que se muestra en la figura a continuación.





**Figura 9: Vista en planta del volumen tridimensional.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

La Figura 9 muestra la vista en planta del volumen tridimensional, destacando que en el extremo ubicado al fondo del rajo de la sección transversal se tendrá un ancho de 250 [m] y en el otro extremo de la sección, un ancho de 1,500 [m], determinando así una apertura de  $28^\circ$  en el círculo circunscrito al volumen tridimensional visto en planta. Se observa que según este diseño, los bancos y rampas serán rectos y paralelos, tal como se observa en los sectores en la Figura 5 de Minera Escondida.

### 3.2. Características de la grilla.

En relación a la grilla de elementos en los perfiles transversales, los dos softwares utilizan método de elementos finitos, que entrega como gran beneficio, un ajuste preciso a la geometría compleja que posee el plan minero de excavaciones del rajo (De la Fuente & Espinoza, 2010).

Considerando que los resultados de una simulación pueden diferir si es que se utiliza un mismo modelo numérico con grillas de igual número de elementos, pero con distinto posicionamiento de los nodos, es de suma importancia lograr que la grilla sea idéntica entre los modelos que utilizan los distintos enfoques, a modo de evitar incertidumbre en los resultados. Además, es necesario utilizar un buen refinamiento vertical en la sección transversal, debido a que de esta forma se permite la modelación de fuertes gradientes verticales en la distribución de la presión de poro, que pueden darse en algunas zonas de la pared del rajo.

En particular, la versión 2007 de SEEP/W sólo admite, a través de un código interno, la generación automática de grillas (Geo-Slope, 2007) con algunas restricciones de refinamiento local al tamaño de los elementos; sin embargo no permite configurar individualmente la posición de la totalidad de los nodos. FEFLOW en cambio, sí permite especificar manualmente la posición de los nodos que deben pertenecer a la grilla, por medio de una interfaz independiente que posee el programa (DHI-WASY, 2011; Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2007).

En base a lo anterior, el procedimiento a seguir será utilizar la generación automática de la grilla que posee SEEP/W, y replicar la posición de los nodos en FEFLOW, a modo de obtener una grilla idéntica entre los enfoques.

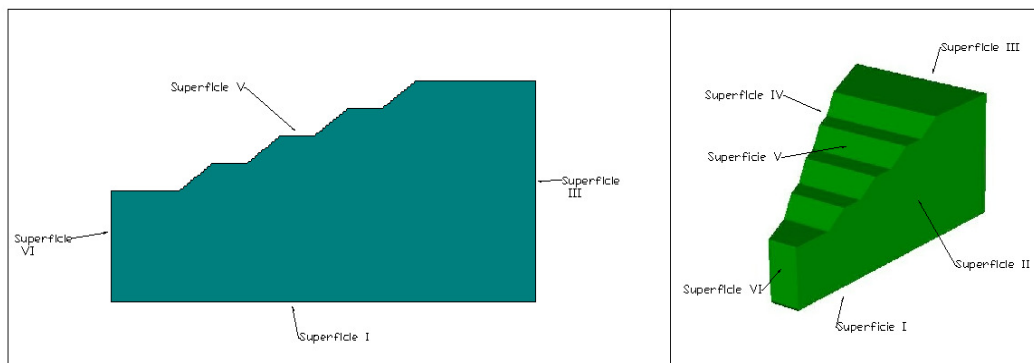
Se incluye un refinamiento local de elementos alrededor de ítems geométricos de interés, tales como líneas o puntos, que representen pozos de bombeo, drenes, condiciones de borde o puntos de observación, lo que se traduce en un beneficio importante para lograr mayor precisión de cálculo en aquellas zonas.

Considerando todo lo anterior, se detalla a continuación algunas consideraciones generales en referencia a las grillas a utilizar:

- A. La grilla estará siempre compuesta por elementos triangulares, debido a que permiten mejor ajuste a características geométricas y mayor estabilidad en los cálculos numéricos involucrados.
- B. Los elementos no tendrán lados superiores a 30 metros, definiendo un límite, a modo de que la grilla no quede demasiado gruesa. Asimismo, las capas que se generan entre cada sección transversal del volumen tridimensional tampoco superarán los 30 metros de separación.
- C. Con el objetivo de tener resultados más precisos, se realizará un refinamiento local a la zona cercana a la superficie del rajo, a los puntos de observación, a la zona de ingreso del flujo subterráneo local y al pozo de bombeo cuando este se encuentre presente.

### 3.3. Condiciones de borde.

La Figura 10 muestra las superficies exteriores del modelo numérico a utilizar, las cuales deben tener asociadas alguna condición de borde que determine su comportamiento.



**Figura 10: Identificación de las superficies con condiciones de borde.**  
Fuente: Elaboración propia.

- La Superficie I, II y IV, se les impone una condición de no flujo, considerando que la primera es el fondo del modelo, y las otras dos son las caras radiales externas, donde se asume que no existe flujo con orientación tridimensional entrante al modelo numérico.

- La Superficie III corresponde a la zona más alejada del fondo del rajo, donde según el modelo conceptual se puede o no situar alguna condición de borde. En casos reales, la faena puede tener cerca la presencia de algún río, laguna o salar, por nombrar algunos ejemplos, y que deben considerarse como condición de borde del modelo. En particular para este modelo, se asumirá que el rajo se sitúa cercano a un acuífero, lo que impone un flujo subterráneo hacia la zona de excavación, de tal modo que se colocará una carga hidráulica lateral constante de 1,100 [m], representando la recarga producida por la carga del acuífero cercano a la faena minera. Se excluyen los nodos con elevaciones superiores al valor de la carga hidráulica para evitar configurar presión negativa en la zona.
- La Superficie V corresponde a la zona de la pared del rajo. En esa zona, el material se encuentra con presión atmosférica y permite el afloramiento de agua subterránea en caso de que toque la superficie. La forma de representar esta condición es a través de nodos seepage, que liberan caudal suficiente para eliminar el exceso de la presión de poro en el punto. En esta misma superficie, se asume que no existe recarga superficial debido a precipitación u otro motivo.
- La Superficie VI correspondiente a la zona de fondo de rajo, se asume que la suma de los flujos vectoriales concéntricos en la zona es nula, lo que corresponde a una condición de no flujo para esa superficie.

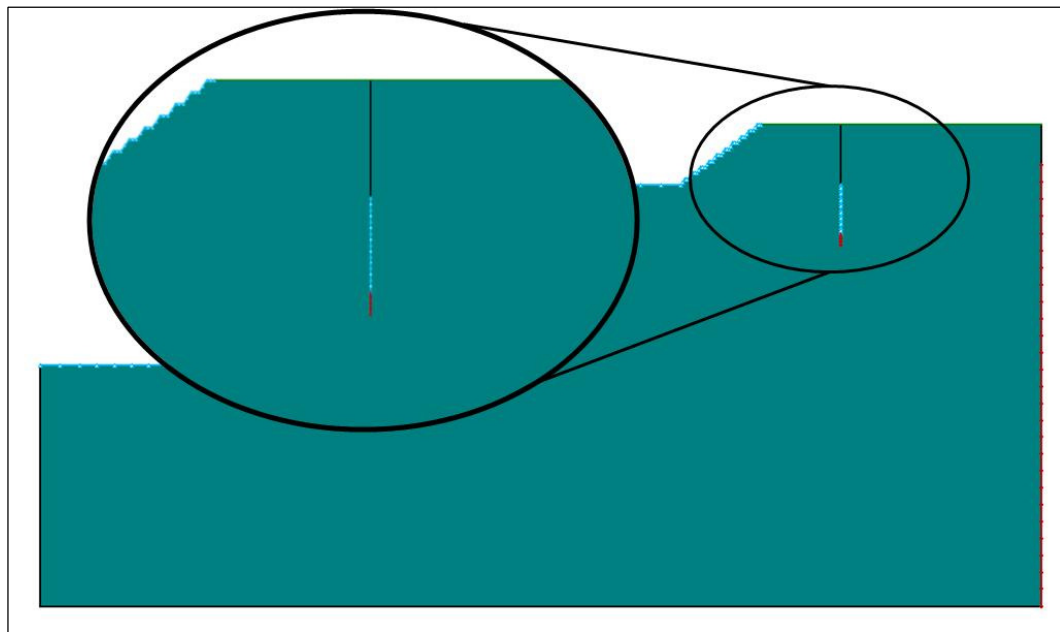
Parte del estudio realizado, incluye incorporar un pozo de bombeo dentro de los límites del rajo tipo (ver apartado 4.2). Para estos pozos, es importante mencionar que existen múltiples formas de abordar su representación a través de condiciones de borde, básicamente divididas entre cargas hidráulicas variables/constantes o tasas de bombeo variable/constante.

En particular, con el objetivo de entregar resultados adecuados de las distribuciones de la presión de poro a lo largo del tiempo, se escoge configurarlo de tal forma que la criba se represente con 11 nodos separados verticalmente cada 15 metros, es decir, un total de 150 metros desde el nodo más superficial al más profundo.

Los primeros 120 metros se les impondrá una condición seepage, debido a que corresponde a la zona de la criba que permite la incorporación de agua al pozo (puntos celestes

Figura 11). Los nodos profundos, correspondientes a los últimos 30 metros, tendrán una carga hidráulica constante que representa en promedio el nivel dinámico de operación del bombeo del pozo (puntos en rojo Figura 11).

La posición del pozo y la profundidad de la criba serán detalladas en el respectivo apartado de los casos con pozos de bombeo. Asimismo, la representación del efecto del pozo de bombeo en las distribuciones de presión de poro para el modelo bidimensional es parte del trabajo realizado durante este estudio y será abordado más adelante.



**Figura 11: Representación de un pozo de bombeo a través de condiciones de borde.  
Fuente: Elaboración propia.**

### 3.4. Condiciones iniciales.

La realización de modelos numéricos para determinar la distribución de la presión de poro, corresponde a responder los requerimientos de una variable de entrada para un estudio geotécnico detallado. En muchos casos, dentro de los primeros años de la faena no se alcanza la necesidad de tal nivel de detalle, sencillamente porque los avances de la excavación, sumado al marco hidrogeológico del lugar, no implican preocuparse intensivamente de la estabilidad del talud. Por esto, cuando se presenta la necesidad de incluir modelos numéricos para la

distribución de presión de poro, estos suelen incorporarse en etapas más avanzadas de la excavación, en donde generalmente no se poseen suficientes datos<sup>6</sup> para lograr reconstituir la totalidad del modelo numérico que comience desde la condición previa al inicio de las obras de la faena. Por lo tanto, bajo ese escenario, el inicio escogido por los modelos numéricos suele ser dentro de una condición donde ya existe un rajo excavado, y en donde a partir de ese punto, ya se posee suficientes datos para continuar con el desarrollo del modelo.

Lo anterior produce un problema, ya que se desconoce la distribución de presión de poro inicial para el modelo, la que debe ser reconstituida teniendo en mente principalmente el drenaje natural procedente de las unidades hidrogeológicas presentes en los modelos, a modo de obtener una distribución de carga hidráulica inicial acorde a las excavaciones previas del rajo, y en donde se evite una despresurización instantánea extremadamente elevada en alguna zona de modelo. La metodología escogida para determinar tal condición inicial se detalla en el Anexo I.

Tal cómo se detalla más adelante, este trabajo incluye utilizar distintas conductividades hidráulicas en el macizo rocoso, por lo tanto, se deriva del proceso anterior condiciones iniciales distintas dependiendo de cuál sea la conductividad hidráulica utilizada en el modelo.

Una vez determinada la distribución de presión de poro inicial, esta se incorpora a los modelos numéricos evitando diferencias en las interpolaciones de la condición inicial en cada uno de los softwares, ingresando los datos de carga hidráulica inicial para cada uno de los nodos individuales posicionados en la grilla idéntica en ambos enfoques.

### 3.5. Tiempos de simulación.

En este punto se van a definir tres características de un modelo numérico en relación al tiempo: la configuración de los pasos de tiempo utilizados; los tiempos específicos en que se guardarán los resultados del modelo para su posterior análisis; y el tiempo total que considera la simulación del modelo.

---

<sup>6</sup> En relación al monitoreo de la piezometría, en términos de cantidad y frecuencia de puntos de observación, cómo también a datos referentes al ritmo de avance de las excavaciones del plan minero.

Los pasos de tiempo corresponden a la discretización temporal en las que el modelo va a resolver las ecuaciones internas que realiza para determinar la distribución de carga hidráulica y flujos involucrados. La configuración de estos pasos de tiempo va acorde a los requerimientos de precisión, estabilidad y balance volumétrico del modelo numérico, que a su vez está interrelacionado con el tamaño de la grilla, condiciones de borde, cambios de los gradientes de presión de poro producidos por nuevas excavaciones o la incorporación de métodos de despresurización artificial, entre otros. Los softwares de modelación numérica entregan la posibilidad de ingresar pasos de tiempo discretos escogidos por el usuario o utilizar métodos automáticos para determinar pasos de tiempos adaptativos según lo requiera el modelo numérico. Debido a que las exigencias en términos de resolución numérica difieren bastante entre un modelo tridimensional con uno bidimensional, sólo se hará mención que para ambos casos se optó por restringir los pasos de tiempo a un máximo de 7.5 días y que la variación entre el paso de tiempo nuevo no sea mayor al doble del paso de tiempo anterior.

Si bien los softwares realizan los cálculos numéricos para todos los pasos de tiempo, no es necesario que todos los resultados sean guardados, para así evitar que el archivo de salida guarde demasiada información innecesaria. El usuario puede determinar qué pasos de tiempo en específico quiere guardar los resultados en función al análisis que quiera realizar con ellos. Para este trabajo de título se escoge que los resultados se guarden cada 30 días, a modo de obtener una comparación mensual de los resultados entre los dos enfoques utilizados, consistente con los casos en que se tenga un monitoreo de la piezometría con frecuencia mensual<sup>7</sup>.

En relación al tiempo total a simular, un plan minero de una faena opera en base a fases de expansión, que a su vez definen las excavaciones que se van a producir en las paredes de rajo. Dependiendo de ese plan minero, puede ocurrir que haya sectores del rajo que sufran excavaciones con una frecuencia mensual, semestral, anual o inclusive que pase varios años sin sufrir excavación alguna. En este punto se asume que el sector del rajo modelado no se realizan nuevas excavaciones por un total de dos años, por lo que se escoge ese valor como tiempo total a simular. En ese sentido se tiene en cuenta que por lo general las paredes de los rajos suelen excavar con una frecuencia menor a dos años.

---

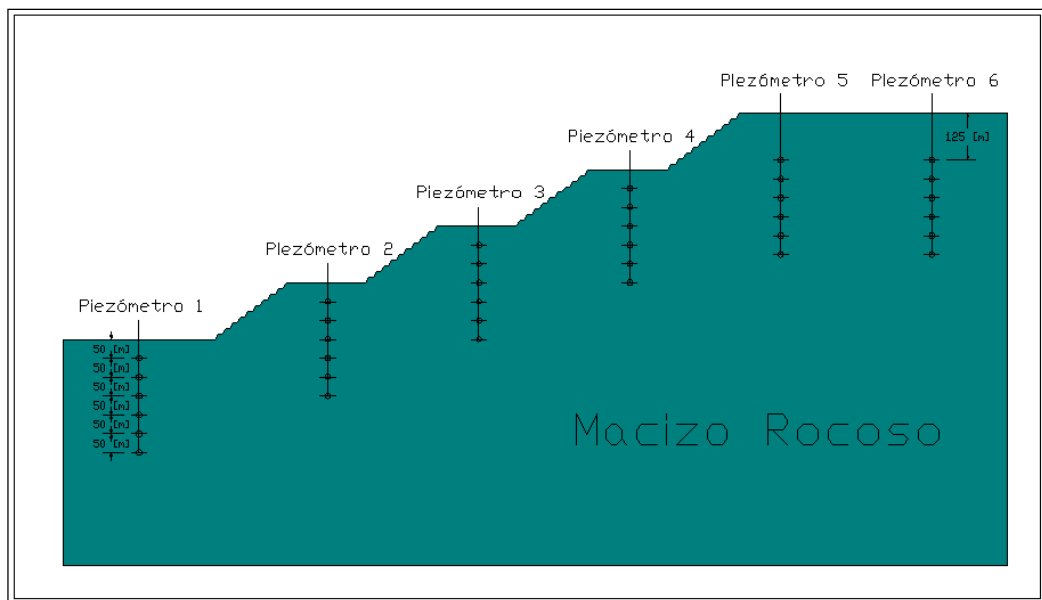
<sup>7</sup> Cada vez es más frecuente tener acoplados a un data logger, que permite un monitoreo más frecuente de los niveles de piezometría, pudiendo guardar datos a nivel diario, horario, o inclusive más frecuente.

### 3.6. Puntos de observación.

Con el objetivo de estudiar las diferencias que producen la geometría del rajo y los pozos de bombeo utilizando un enfoque tridimensional o uno bidimensional, se utiliza la comparación de los resultados de carga hidráulica de algunos puntos de observación localizados en la sección transversal, que a su vez se ubica en el centro de volumen tridimensional.

Dentro de esta sección bidimensional de observación, existen zonas que son de mayor interés geotécnico relacionado con la estabilidad del talud. En particular se tendrán en consideración las potenciales inestabilidades que se pueden producir en la superficie del rajo, ya sea con el derrumbe de algunos bancos o el colapso general de toda una pendiente inter-rampas. En otras palabras, es de suma importancia obtener de forma precisa la posición del nivel freático y la distribución de la presión de poro para profundidades de hasta 300 metros bajo la superficie.

Con las consideraciones anteriores, es que se sitúan seis piezómetros ficticios sobre la sección de observación, como se muestra en la Figura 12, cada uno con seis puntos de control de carga hidráulica a diferentes profundidades, los que corresponden a los puntos de observación del modelo.



**Figura 12: Piezómetros con los puntos de observación.**  
**Fuente: Elaboración propia.**



El primer piezómetro está situado en la mitad del fondo del rajo, luego hay tres piezómetros en el centro de cada rampa de acceso y por último dos piezómetros en la zona no excavada fuera del rajo. Los puntos de control, están equiespaciados cada 50 [m] desde la superficie, por lo que la máxima profundidad que será monitoreada corresponde a 300 [m].

Debido a que la condición de borde lateral se ubica a 1,100 [m], se hace una excepción con los dos piezómetros ubicados en la zona no excavada, los que tendrán su primer punto de monitoreo a 125 [m] de profundidad, a modo de evitar que el primer sensor esté por sobre del nivel freático; por consiguiente el último sensor de estos piezómetros estará ubicado a 375 [m] de profundidad.

Por último, parte del apartado 4.2 analiza el efecto producido por un pozo de bombeo ubicado en diferentes partes del rajo a modelar, por lo que se contempla el uso de un piezómetro ficticio extra cercano al pozo de bombeo para fines de realizar una serie de cálculos que permitan mejorar la representación del efecto del pozo sobre la distribución de la presión de poro. Su posición y mayores detalles serán mencionados en su debida oportunidad en el informe.

### 3.7. Características hidrogeológicas de macizo rocoso.

En la introducción de este capítulo, se comentó que el macizo rocoso iba a poseer dos particularidades que en la práctica no se observan en la realidad. La primera es que el macizo rocoso está compuesto únicamente por unidad hidrogeológica homogénea y la segunda es que se asumirá la ausencia de estructuras geológicas, es decir, que no existirán conductos preferenciales de flujo subterráneo. Estas particularidades tienen la intención de simplificar el modelo de tal forma de que sea posible identificar claramente el efecto producido tanto por la geometría del rajo como por el sistema de despresurización artificial sobre una conductividad hidráulica global, sin estructuras que interfieran en los cálculos numéricos del modelo. Esto logra gran importancia en los objetivos propuestos, lo que será tratado en las conclusiones respectivas.

Por otro lado, los parámetros que determinan las características hidrogeológicas del macizo rocoso buscan ser representativos dentro de los rangos observados en faenas mineras

reales, utilizando como base la experiencia y documentación de respaldo. Resulta evidente que los resultados obtenidos de los modelos numéricos dependerán de las características hidráulicas que posea el macizo rocoso (Espinoza, 2010), de ahí la importancia de su correcta determinación y equivalencia en cada uno de los software<sup>8</sup>.

Para facilitar su lectura, los valores de los parámetros se presentan separados en condiciones saturadas y no saturadas.

### 3.7.1. Parámetros en condición saturada.

- Conductividad Hidráulica: En faenas mineras ubicadas en el norte de Chile, se tienen diversas unidades hidrogeológicas de roca fracturada que suelen tener conductividades hidráulicas saturadas menores a  $1 \times 10^{-7}$  [m/s] (Schlumberger Water Services, 2011). Para efectos de este trabajo de título se descartarán macizos con conductividad menor a  $1 \times 10^{-10}$  [m/s] debido a que son influenciadas fuertemente el efecto de descarga litoestática<sup>9</sup> que hace necesario incorporar cálculos adicionales no contemplados en los modelos. En particular para estudiar el efecto de la geometría del rajo se utilizarán cuatro conductividades hidráulicas en el rango de  $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-10}$  [m/s] variando en un orden de magnitud en cada caso. Para el estudio del efecto que ejerce el pozo de bombeo se analizarán sólo dos conductividades hidráulicas saturadas de  $K_1 = 1 \times 10^{-8}$  [m/s] y  $K_2 = 1 \times 10^{-9}$  [m/s], debido a que corresponden a valores más comunes de unidades hidrogeológicas correspondiente a roca fracturada, sumado a los resultados obtenidos previamente del efecto que genera la geometría (ver apartado 4.1).
- Homogeneidad y Anisotropía: Se asumirán características hidrogeológicas homogéneas espacialmente. En relación a la anisotropía, en macizos rocosos se suele tener flujo orientado principalmente a través de fracturas principales, pero tal como se mencionó antes, se asume ausencia de estas fracturas en el macizo.

---

<sup>8</sup> Cada software utiliza distintos parámetros hidrogeológicos para la resolución de las ecuaciones, que son equivalentes entre sí, por lo que basta asegurarse que los parámetros sean consistentes entre ellos.

<sup>9</sup> Incremento de la porosidad total causado por la deformación y expansión del esqueleto rocoso como resultado de la remoción de material suprayacente.

Independiente de esto, normalmente se suele observar un flujo preferencial en el plano horizontal, y para efectos de modelación se asumirá un factor de anisotropía igual a 10 para la relación  $K_h/K_v$ , privilegiando la conductividad hidráulica en el plano horizontal por sobre el vertical.

- Porosidad: Se considerará una porosidad efectiva de un 4% que son valores típicos a los materiales en los cuales efectivamente conviene implementar un plan de drenaje.
- Coefficiente de almacenamiento específico: Este coeficiente tiene relación a las características de compresibilidad tanto del agua como del esqueleto del macizo rocoso. Para la modelación en este trabajo se considera una compresibilidad general del orden de  $1 \times 10^{-7}$  [1/kPa], por lo que el coeficiente de almacenamiento específico se logra con el producto de ese valor y el peso específico del agua, dando como resultado un valor de  $9.8 \times 10^{-7}$  [1/m].

### **3.7.2. Parámetros en condición no saturada.**

Para la modelación del flujo en la zona no saturada se utilizarán las relaciones propuestas por Van Genuchten (1980) que se encuentran implementadas en ambos softwares (Geo-Slope, 2007; DHI-WASY, 2009). Estas relaciones determinan la curva de contenido de agua y la conductividad hidráulica relativa en función de la matriz de succión que genera el fluido.

La curva de contenido de agua se encuentra acotada entre los valores de la humedad saturada y la humedad residual. Asumiendo que todos los poros están conectados entre sí, la humedad saturada será idéntica a la porosidad máxima efectiva detallada en el apartado anterior, definida en un 4%. En relación a la humedad residual, se utilizará un valor de un 2% correspondiente a la mitad de la humedad saturada, de modo de obtener una humedad drenable de 2%, valor promedio observado en muchos rajes en donde se ha implementado programas de desagüe.

La relación de propuesta por Van Genuchten para el contenido de agua se presenta en la Ecuación 6.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a \cdot \Psi)^n]^m} \quad [6]$$

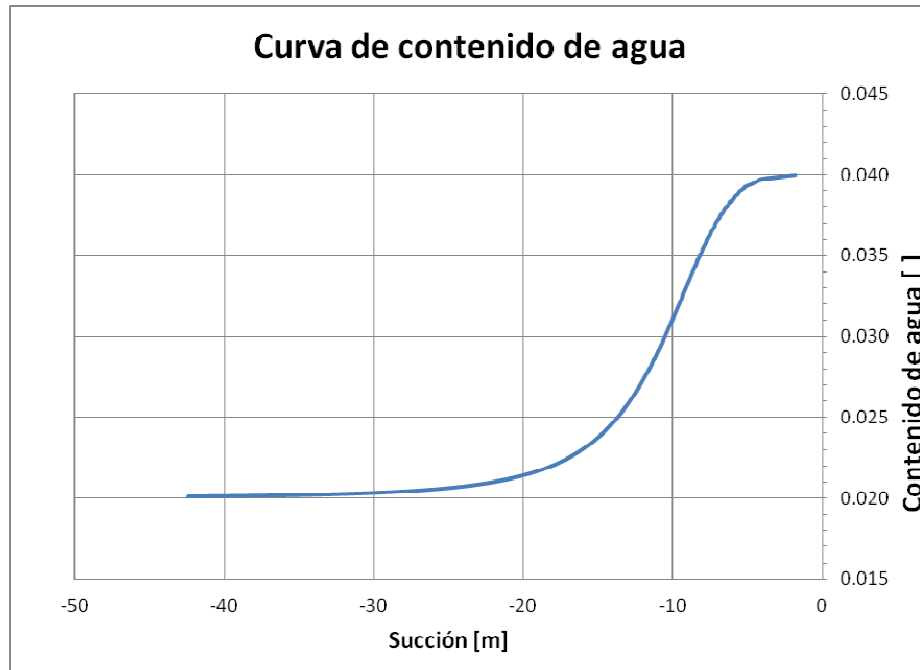
dónde:

- $\theta_w$  [ ]: Contenido de agua.  
 $\theta_r$  [ ]: Contenido de agua residual.  
 $\theta_s$  [ ]: Contenido de agua saturada.  
 $\Psi$  [m]: Presión negativa de poros; Succión.  
 $a$  [1/m],  $n$  [ ],  $m$  [ ]: Parámetros de ajuste de las curvas.

Los valores de  $a$  y  $n$  son parámetros difíciles de estimar para el caso de rocas fracturadas (Seaman, Singer, & Aburime, 2009) debido a la diferenciación entre utilizar un enfoque global del material fracturado o un enfoque local de la matriz de fracturas (Illman & Hughson, 2002).

En relación al párrafo anterior, la experiencia sugiere que mientras las fracturas no se encuentren llenas de materiales porosos -tales como arcillas, limos o arena- se produce un drenaje natural veloz dentro de la fractura misma, pasando rápidamente desde la humedad saturada a la humedad residual frente a valores bajos de succión. Teniendo esto en consideración, es que los parámetros utilizados son los que generan una curva de gran pendiente, pero que no produzca problemas de estabilidad en función de las grillas utilizadas (DHI Forum - FEFLOW, 2010), optando por seleccionar los valores de  $a = 0.01 \left[ \frac{1}{m} \right]$  y  $n = 5$  [ ]. El parámetro  $m$  se determina según la relación propuesta por Mualem (1976), donde  $m = 1 - 1/n = 0.8$  [ ].

Como resultado se puede obtener un gráfico que muestre la curva de contenido de agua en la roca en función de su succión (Figura 13).



**Figura 13: Curva de contenido de agua.**  
Fuente: Elaboración propia.

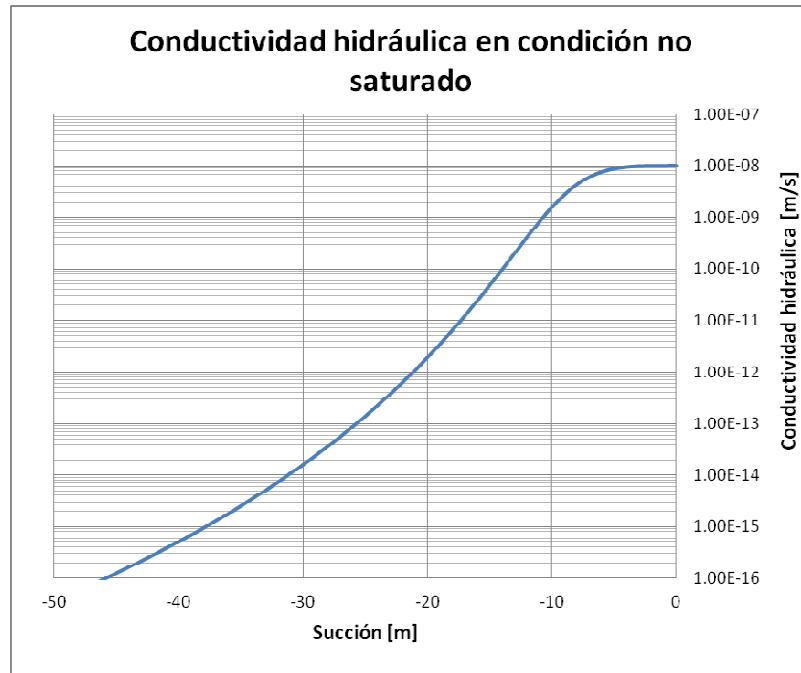
En el caso de la conductividad hidráulica efectiva en condiciones no saturadas aplicada a la resolución de la Ecuación de Richards (1931), la ecuación propuesta por Van Genuchten es la siguiente:

$$K_w = K_s \cdot \frac{[1 - (a\Psi^{n-1})(1 + (a\Psi^n)^{-m})]^2}{((1 + a\Psi^n)^{\frac{m}{2}})} \quad [7]$$

dónde:

- $K_w$  [ ] Conductividad hidráulica.
- $K_s$  [ ] Conductividad hidráulica saturada
- $\Psi$  [m] Presión negativa de poros; Succión.
- $a$  [1/m],  $n$  [ ],  $m$  [ ] Parámetros de ajuste de las curvas.

Todos los valores de la ecuación ya fueron definidos previamente, por lo que es posible determinar la conductividad hidráulica en función del grado de saturación del suelo. A continuación se muestra un ejemplo para el caso de  $K_{sat} = 1 \times 10^{-8}$  [m/s].



**Figura 14: Conductividad hidráulica en condición no saturada para  $K_{sat}=1E-8$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**

## 4. Resultados y análisis

Durante la extensión de este capítulo, se darán a conocer los resultados de los modelos numéricos realizados en el estudio, con la finalidad de dar respuesta a los objetivos propuestos y generar conclusiones en base del análisis de los resultados obtenidos.

La línea de desarrollo con que se presentarán las comparaciones está dividida en dos etapas, comenzando con el análisis del efecto producido sobre las presiones de poro simuladas en 2D y 3D, por la geometría tridimensional del rajo tipo, para luego pasar a la segunda etapa compuesta por analizar el efecto que produce un pozo de bombeo en los resultados. La razón principal de seguir ese orden, es debido a que se precisa identificar el efecto de la geometría previo a añadir el efecto producido por el pozo de bombeo.

Dentro de cada etapa, se inicia con comparar los resultados obtenidos en modelos bidimensionales idénticos, resueltos por los dos softwares de manera independiente. De esta forma se puede comprobar si los resultados conseguidos a través del mismo enfoque bidimensional son independientes del software escogido.

Luego, previo a incorporar la tridimensionalidad con un formato radial que se detalló en el Capítulo 3, se incorpora en el modelo numérico desarrollado en FEFLOW un caso que se denominará pseudo-tridimensional, en donde las características de la sección transversal se replican en capas tridimensionales completamente paralelas, de tal forma que se pueda identificar el efecto de agregar únicamente la tercera dimensión sin considerar aún la forma radial del rajo tipo.

A continuación, el modelo numérico desarrollado en FEFLOW, tendrá las características geométricas radiales ya definidas, las que permitirán desarrollar los modelos numéricos finales que permitan responder los objetivos propuestos por este trabajo. Además, para cada etapa se realizarán nuevas comparaciones de resultados según sea necesario en función de los resultados obtenidos previamente, algo que será detallado en las respectivas secciones de este capítulo.

En resumen, la idea general que impera durante este capítulo corresponde a ir incorporando complejidad a los modelos a modo de identificar esquemáticamente los efectos en

los resultados producidos por la geometría del rajo y por la incorporación de un pozo de bombeo.

Por último, la forma general de realizar el análisis de resultados obtenidos entre los distintos enfoques será graficando los ECMS para los distintos piezómetros en el tiempo.

## **4.1. Casos sin pozos de bombeo.**

La finalidad de realizar estos casos es dilucidar si es que la geometría real 3D de la pared del rajo tipo, por sí sola, influye en los resultados de la modelación numérica cuando se compara con los valores obtenidos a través de la modelación bidimensional cartesiana.

### **4.1.1. Comparación de casos bidimensionales.**

En primer lugar, las primeras comparaciones de resultados de distribuciones de poro deben realizarse comparando el mismo enfoque bidimensional para ambos softwares, ya que puede ocurrir que la resolución del mismo modelo numérico tenga detalles que puedan llegar a resultar diferencias significativas de las cargas hidráulicas simuladas, incluso utilizando el mismo enfoque.

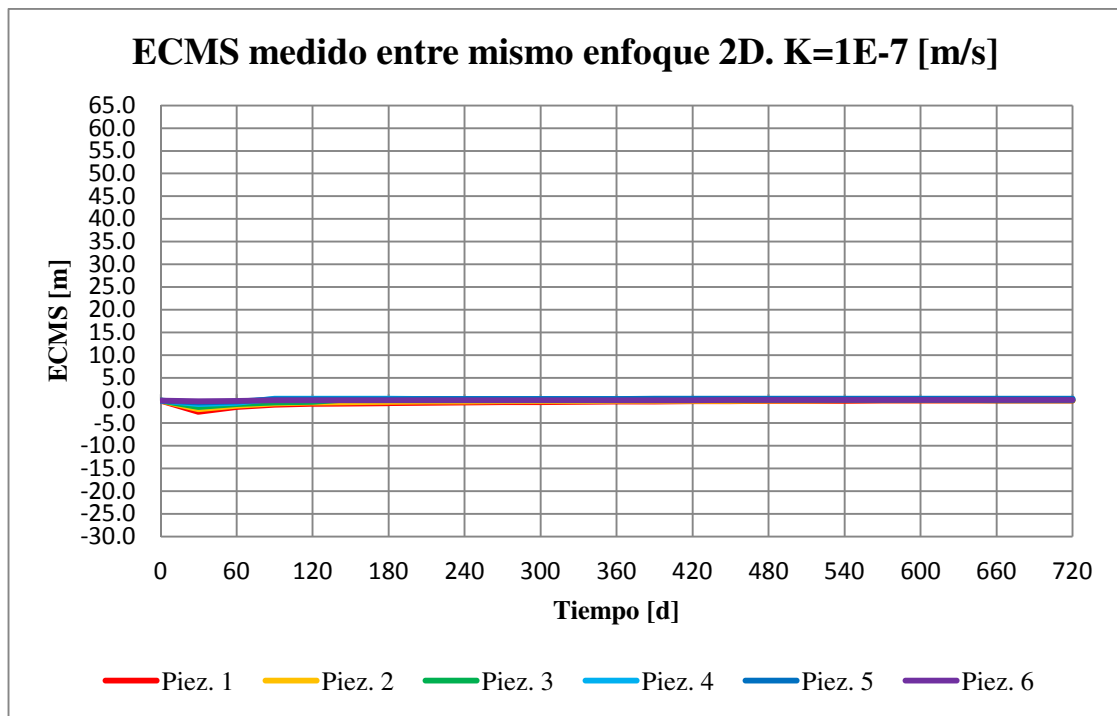
Se harán comparaciones para cuatro diferentes conductividades hidráulicas saturadas, las que corresponden a  $1 \times 10^{-7}$ ,  $1 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-9}$  y  $1 \times 10^{-10}$  [m/s]. La Tabla 4 muestra las características generales de los modelos a comparar.

Las Figuras 15, 16, 17 y 18 dan a entender que utilizando el mismo enfoque bidimensional, no existen diferencias significativas en ninguna de las cuatro conductividades utilizadas, lo que permite aseverar la independencia de los resultados de carga hidráulica con el software utilizado para obtenerlas.

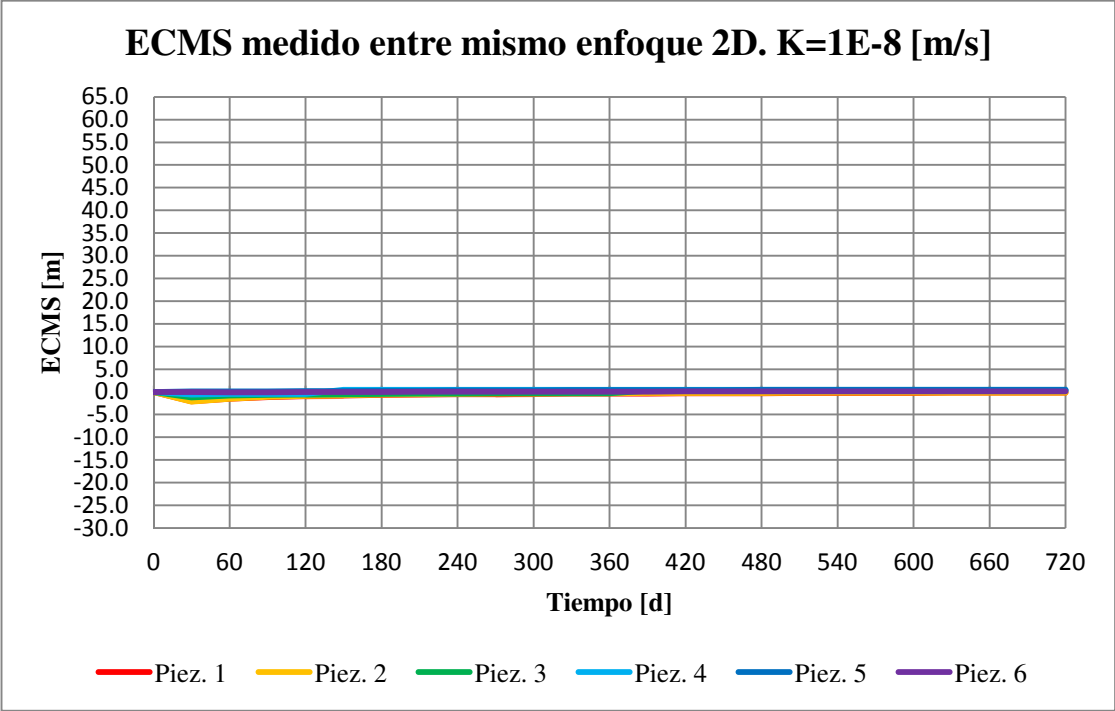


<i>Casos 4.1.1.</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	2D
<b>Nodos</b>	7,244	7,244
<b>Elementos</b>	14,136	14,136
<b>Capas</b>	0	0
<b>Secciones</b>	1	1
<b>Pozo</b>	No	No

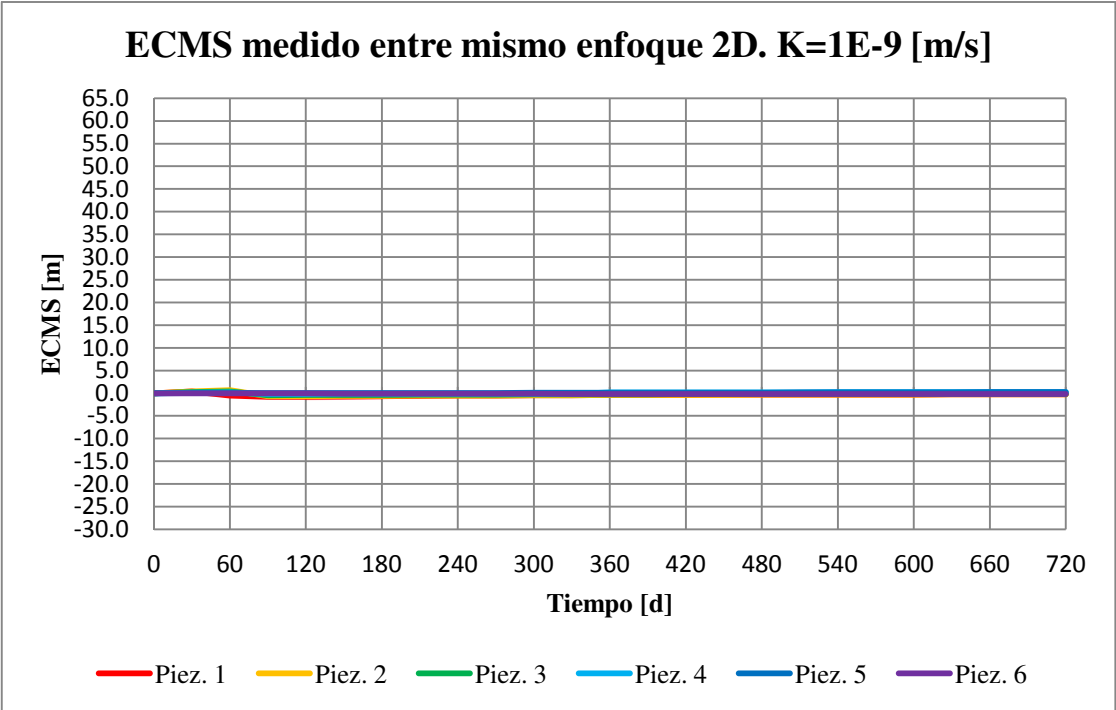
**Tabla 4: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow.  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 15: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para  $K=1E-7$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 16: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para  $K=1E-8$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 17: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para  $K=1E-9$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**

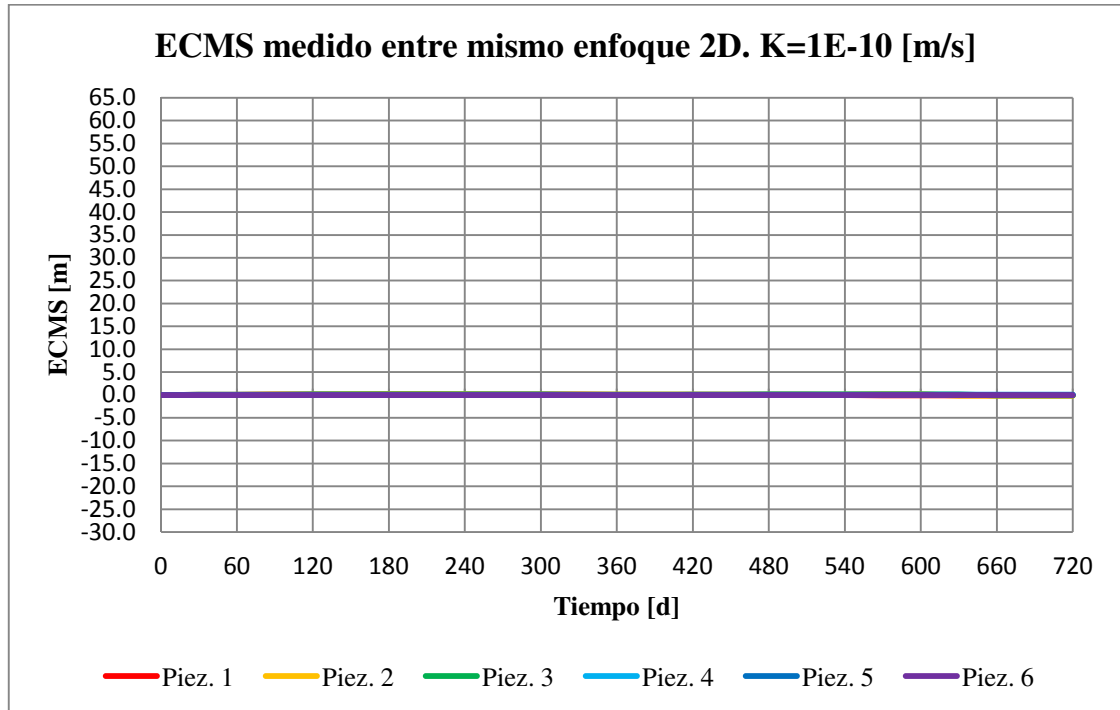


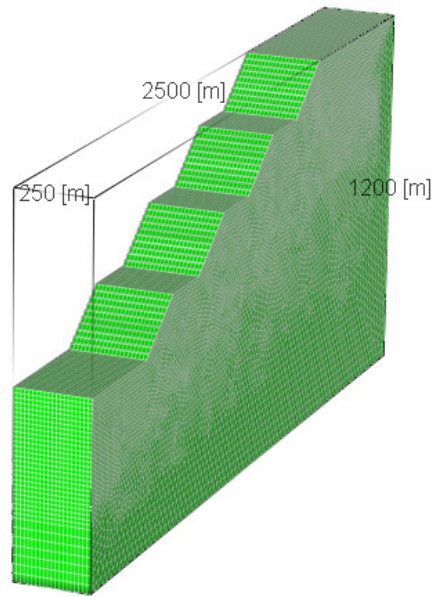
Figura 18: ECMS medido entre enfoque 2D y 2D sin pozos para  $K=1E-10$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Comparación de caso pseudo-tridimensional con modelo bidimensional.

Un modelo pseudo-3D consiste en replicar paralelamente una cierta cantidad de veces la sección transversal, dando como resultado un modelo tridimensional con capas idénticas de elementos volumétricos (ver Figura 19).

Las ecuaciones que se resuelven en este modelo numérico son aplicadas a los elementos tridimensionales que lo componen, dando cabida a un posible flujo tridimensional dentro de los límites del modelo.

De todas formas, para este modelo numérico particular, las únicas condiciones de borde presentes imponen un flujo netamente bidimensional, por lo que la finalidad de estas pruebas es determinar si al incorporar elementos volumétricos los resultados pudiesen variar debido al desarrollo de las ecuaciones.



**Figura 19: Modelo pseudo-tridimensional en FEFLOW 6.0.**  
**Fuente: FEFLOW, DHI WASY.**

Las características de los modelos son:

<i>Casos 4.1.2.</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D (pseudo)
<b>Nodos</b>	7,244	152,124
<b>Elementos</b>	14,136	282,720
<b>Capas</b>	0	20
<b>Secciones</b>	1	21
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250
<b>Pozo</b>	No	No

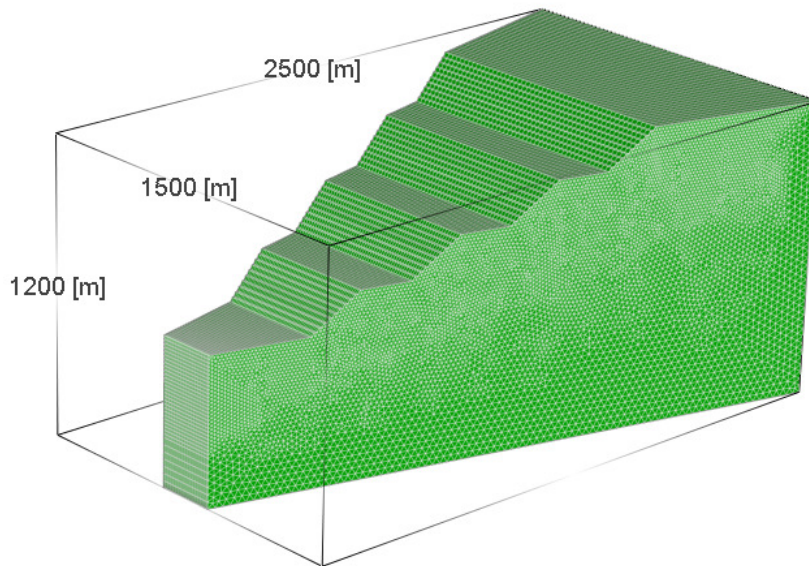
**Tabla 5: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados de estas pruebas resultaron ser idénticos a las Figuras 15, 16, 17 y 18. Esto se debe a que los valores de carga hidráulica obtenidas por los modelos FEFLOW bidimensional y pseudo-tridimensional difieren recién al tercer decimal, por lo que el ECMS medido entre estos enfoques no se ve afectado.

De esto se puede concluir que si las condiciones de borde imponen un flujo bidimensional estricto en el modelo numérico pseudo-3D, no existe diferencia respecto a utilizar un enfoque bidimensional, independiente a que se utilicen elementos volumétricos.

#### 4.1.3. Comparación de caso tridimensional con modelo bidimensional

El objetivo de estas comparaciones es determinar si la geometría radial del rajo influye en las distribuciones de poro modeladas, causando diferencias con el enfoque bidimensional cartesiano. La configuración de la geometría anteriormente descrita en el Capítulo 3 da como resultado visual lo presentado en la Figura 20.



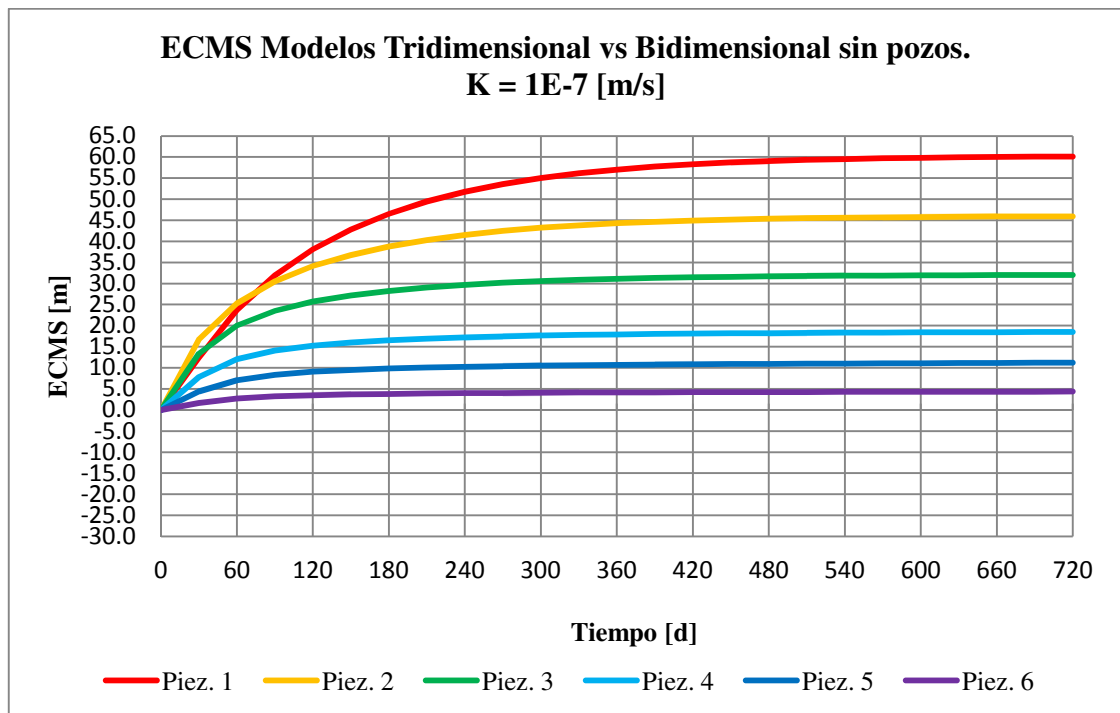
**Figura 20: Modelo tridimensional visto en FEFLOW 6.0.**  
Fuente: FEFLOW, DHI WASY.

Las características de los modelos son:

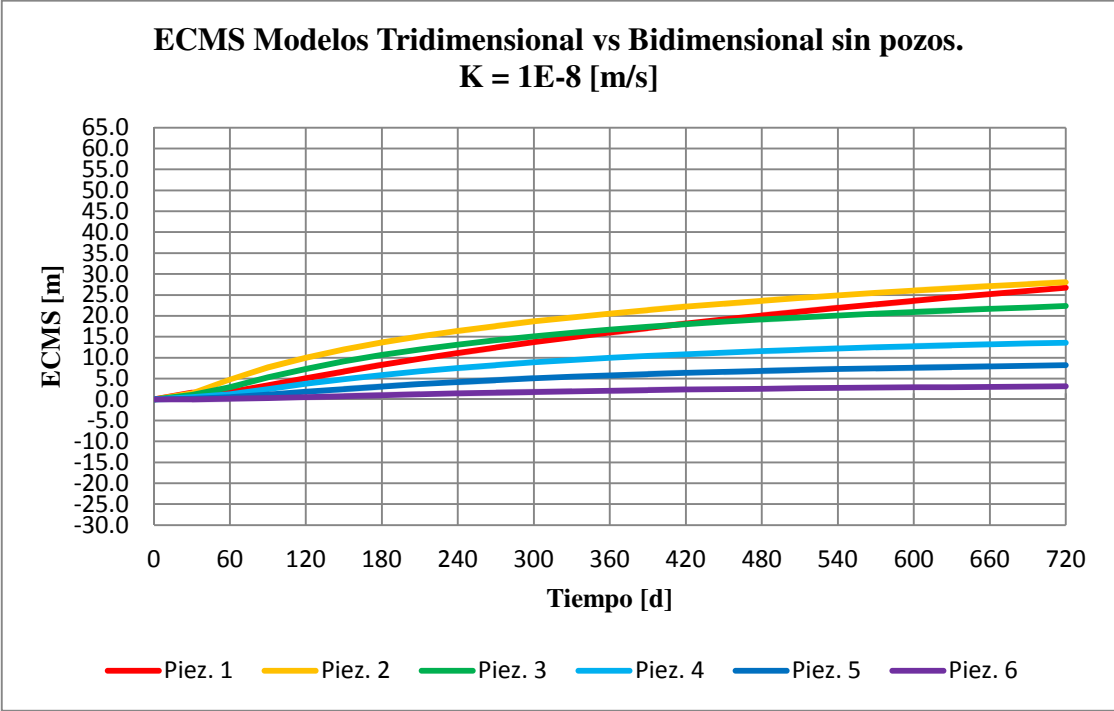
<i>Casos 4.1.3.</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D
<b>Nodos</b>	7,244	369,444
<b>Elementos</b>	14,136	706,800
<b>Capas</b>	0	50
<b>Secciones</b>	1	51
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250 a 1,500
<b>Pozo</b>	No	No

**Tabla 6: Resumen de la comparación caso 3D vs 2D.**  
Fuente: Elaboración propia.

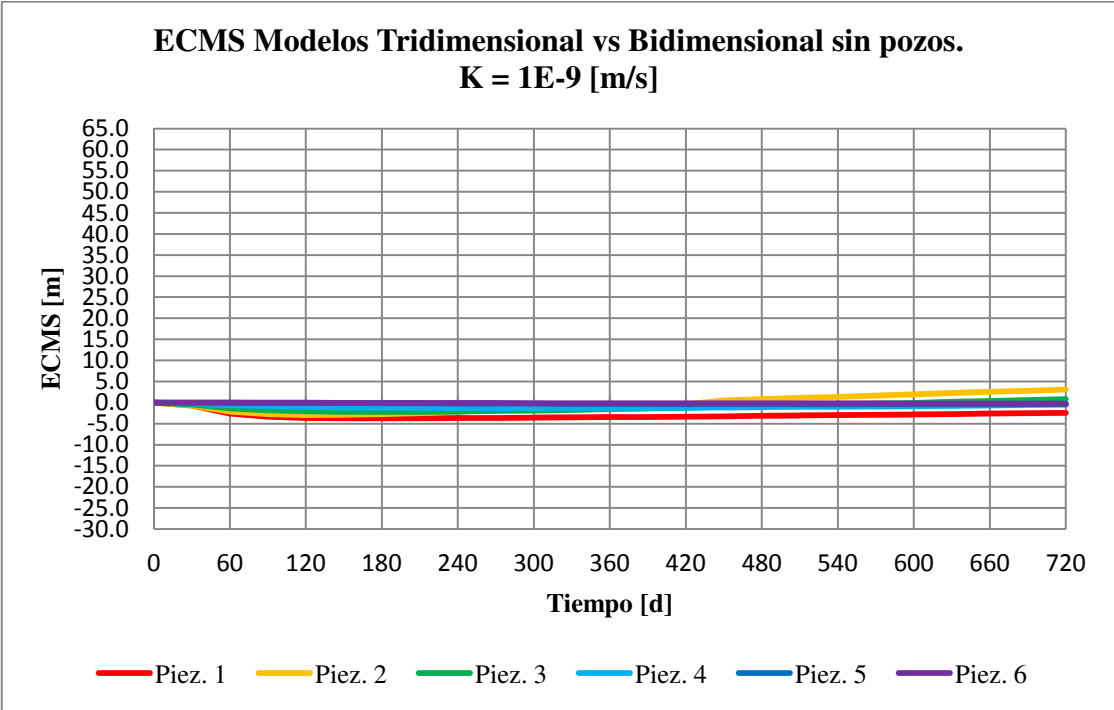
Los resultados se presentan en las Figuras 21, 22, 23 y 24.



**Figura 21: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para K=1E-7 [m/s].**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 22: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para K=1E-8 [m/s].**  
**Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 23: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para K=1E-9 [m/s].**  
**Fuente: Elaboración propia.**

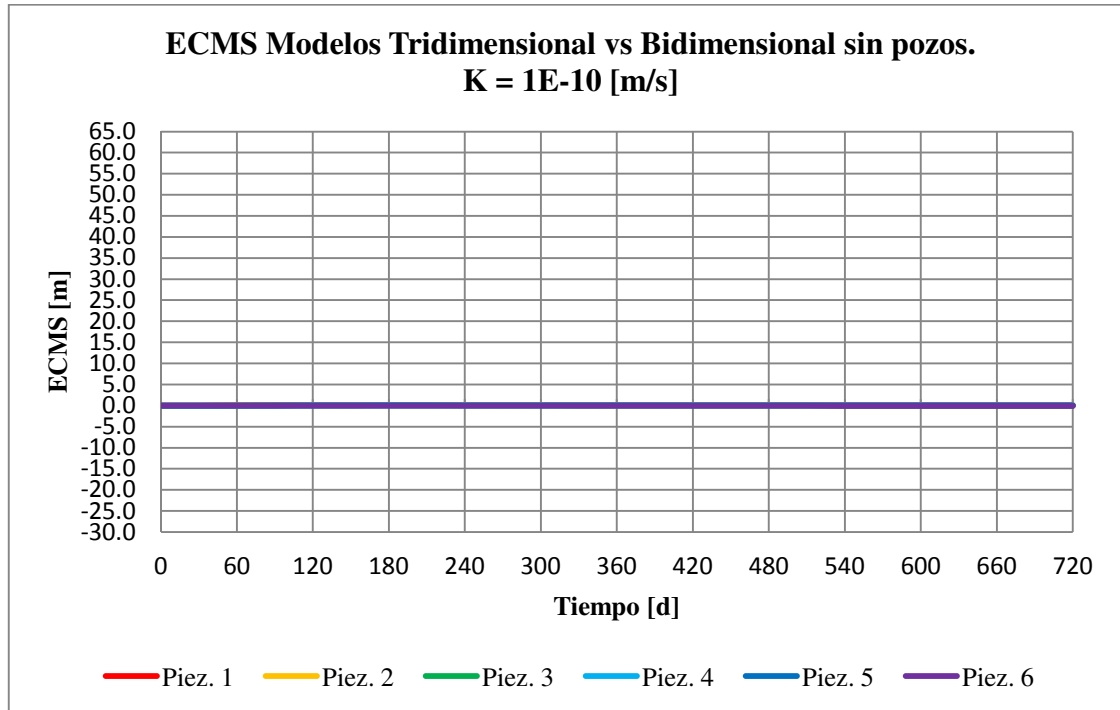


Figura 24: ECMS medido entre enfoque 3D y 2D sin pozos para K=1E-10 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

De las tablas se puede observar que la geometría radial del rajo sí influye en los resultados, en donde el enfoque bidimensional no representa de manera adecuada el patrón de presiones de poro obtenido a través del enfoque tridimensional del rajo tipo, algo que no se observaba en las comparaciones entre modelos bidimensionales o con el pseudo-tridimensional.

Se observa también cómo la influencia que genera la geometría sobre los resultados, adquiere mayor relevancia en la medida que se aumenta la conductividad hidráulica del macizo rocoso, posiblemente debido a las diferencias en la rapidez con que se produce el drenaje natural para cada enfoque.

De las Figuras 23 y 24, correspondientes a las conductividades hidráulicas de  $1 \times 10^{-9}$  y  $1 \times 10^{-10}$  [m/s] respectivamente, es posible ver que todos los ECMS calculados tienen una magnitud menor a 5 metros, resultados que se consideran suficientemente similares entre ambos enfoques, es decir, la representación del drenaje natural es semejante. Esto no sucede para las conductividades hidráulicas mayores,  $1 \times 10^{-7}$  y  $1 \times 10^{-8}$  [m/s], donde hay diferencias de magnitud del ECMS sobre 15 metros, requiriendo de un mayor análisis para lo desarrollado por el enfoque



bidimensional. Las Figuras 21 y 22 muestran el comportamiento del ECMS para estas conductividades hidráulicas ( $1 \times 10^{-7}$  y  $1 \times 10^{-8}$  [m/s]), y donde es posible observar que:

- El ECMS aumenta en función del tiempo para todos los piezómetros en ambas conductividades hidráulicas modeladas.
- El ECMS tiende a estabilizarse en el tiempo, efecto fácil de apreciar en el Gráfico 21, y en menor medida en el Gráfico 22.
- Los piezómetros que se encuentran localizados en la zona baja de la pared del rajo (Piezómetros 1 y 2) son los que presentan mayores ECMS.
- Los piezómetros que se encuentran ubicados en la zona alta de la pared del rajo (Piezómetros 5 y 6) son los que presentan menores ECMS para todos los instantes de tiempo.

Las posibles razones de por qué ocurre esto, forman parte de las conclusiones en el Capítulo 5.

#### **4.1.4. Conductividad hidráulica equivalente entre enfoques.**

En el Capítulo 2 se hizo referencia al proceso de calibración que se someten los modelos numéricos con los datos reales de piezometría medidos en sectores aledaños a las secciones de modelación. En particular, se mencionó que el fácil manejo de los modelos bidimensionales hace posible obtener un buen ajuste de la calibración a los datos piezométricos para la mayoría de los casos, utilizando como principales variables las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas presentes. Esto último daba pie a que las conductividades hidráulicas obtenidas de la calibración compensen en modelos bidimensionales cartesianos, efectos sobre la distribución de la presión de poros, tales como los inducidos por la geometría radial del rajo.

Tal como mostraron los resultados anteriores, la geometría radial por si sola presenta diferencias entre los enfoques tridimensional y bidimensional, por lo que resulta interesante observar cuánto se puede compensar este efecto modificando solamente la conductividad hidráulica del modelo bidimensional, teniendo como objetivo disminuir el ECMS general de los

distintos casos. La conductividad hidráulica del modelo numérico bidimensional que optimice el ECMS general entre los dos enfoques se denominará Conductividad Hidráulica Equivalente.

El primer paso realizado fue observar que, mayoritariamente, los valores de carga hidráulica simulada en los modelos bidimensionales subestiman la presión de poro, obteniendo menores cargas hidráulicas a las observadas en el modelo tridimensional, lo que en otras palabras significa que la despresurización natural ocurre más rápido en los modelos bidimensionales que en los tridimensionales (ver Figura 21 y 22). Por lo tanto, se opta por disminuir la conductividad hidráulica del modelo bidimensional, a modo de aumentar los niveles en la pared del rajo.

La metodología utilizada para obtener la conductividad hidráulica equivalente, consiste en realizar una serie de modelos disminuyendo progresivamente un 5% la conductividad hidráulica original, hasta encontrar la que optimice el promedio de las magnitudes de los ECMS calculados.

Las conductividades hidráulicas equivalentes determinadas son las que se presentan en la siguiente tabla:

Modelo Tridimensional	Modelo Bidimensional
Conductividad Hidráulica [m/s]	Conductividad Hidráulica Equivalente [m/s]
$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-8}$
$1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-9}$
$1 \times 10^{-9}$	$9 \times 10^{-10}$
$1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-10}$

**Tabla 7: Conductividad hidráulica equivalente para modelos bidimensionales.**

**Fuente: Elaboración propia.**

De la Tabla 7 se puede apreciar que las diferencias entre el valor original y su equivalente son mayores para los casos con conductividades hidráulicas más permeables, acorde con la necesidad de compensar diferencias más grandes entre los valores simulados para tales conductividades. Por ejemplo, existe un orden de magnitud de diferencia con su equivalente para el caso de conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-7}$  [m/s] y medio orden de magnitud para el caso de  $1 \times 10^{-8}$  [m/s]. Por contraparte, las conductividades menos permeables no requieren de mucha diferencia con su conductividad equivalente, debido a que se produce casi nula despresurización

natural, llegando al punto en que para la conductividad menor ( $1 \times 10^{-10}$  [m/s]) su conductividad equivalente es la misma.

Basado en la experiencia en este tipo de proyectos, se observa que en el modelo hidrogeológico conceptual, cada unidad hidrogeológica posee asociado un rango de valores de la conductividad hidráulica medida in situ, el cual suele ser más extenso a un orden de magnitud, incluso sobre dos órdenes de magnitud. De esta forma se puede comparar la dimensión que representa la diferencia que se tiene entre la conductividad hidráulica original y su equivalente.

A modo de ilustrar el efecto de utilizar una conductividad hidráulica equivalente en los modelos bidimensionales, se presentan las Figuras 25 y 26, que contrastan a los valores originales de ECMS de las Figuras 21 y 22 respectivamente.

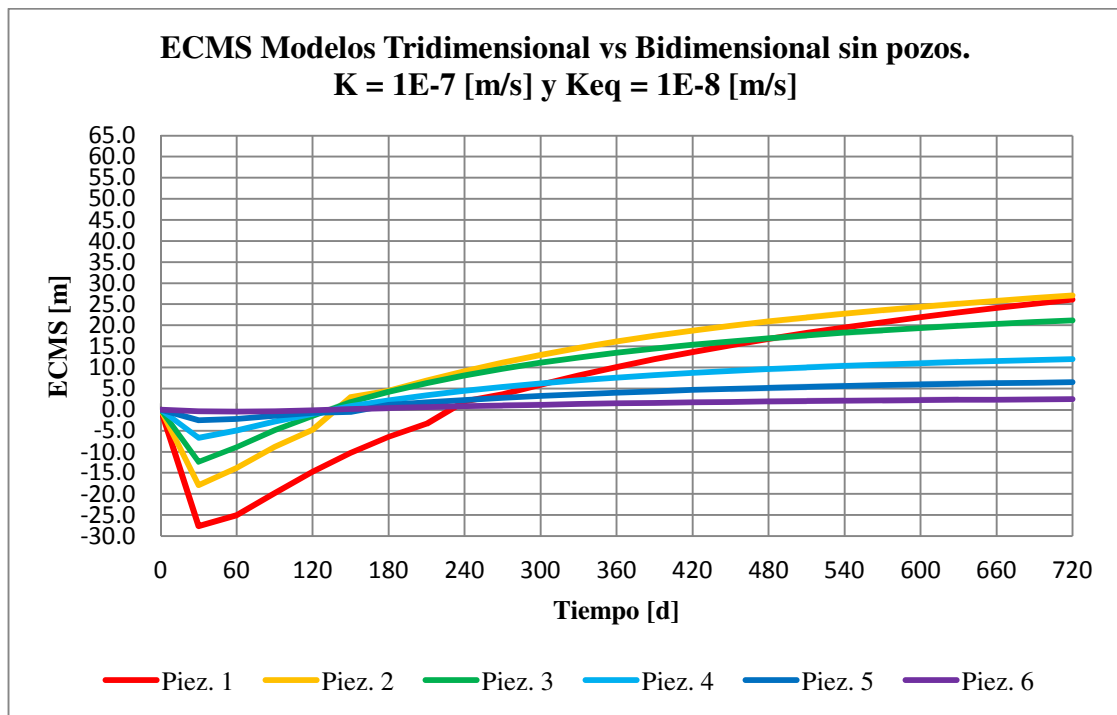
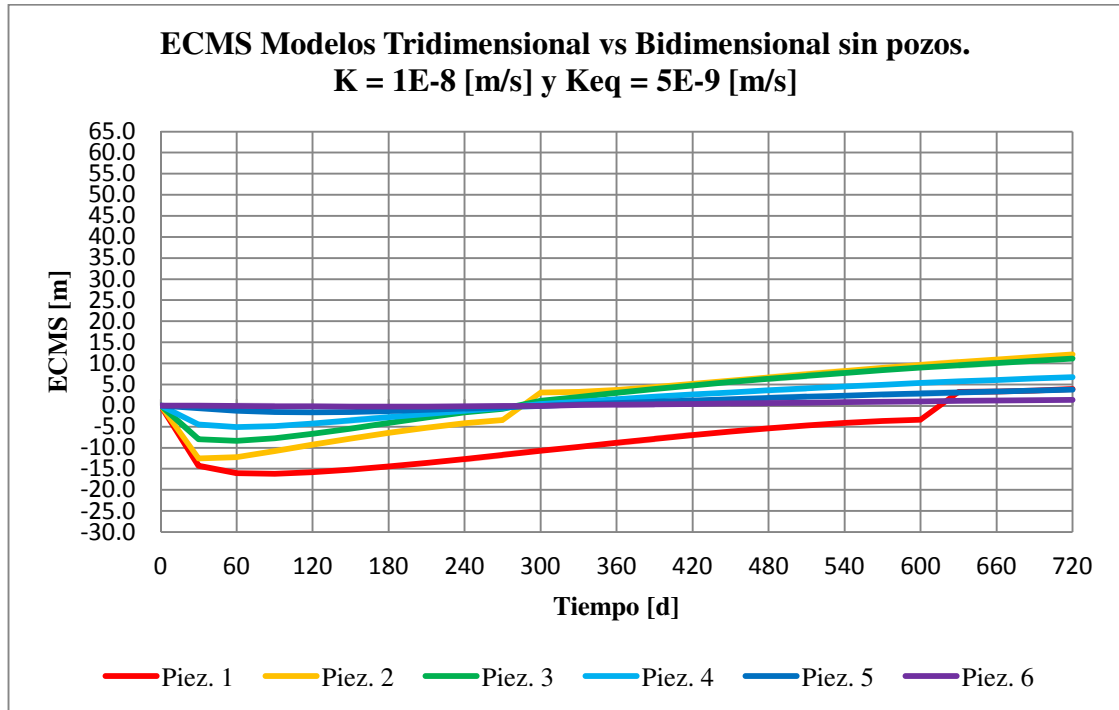


Figura 25: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-7$  [m/s] y  $Keq = 1E-8$  [m/s] respectivamente. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 26: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-8$  [m/s] y  $Keq = 5E-9$  [m/s] respectivamente. Fuente: Elaboración propia.**

Si se compara la Figura 21 con la Figura 25, correspondientes al caso con conductividad original de  $1 \times 10^{-7}$  [m/s] y conductividad equivalente de  $1 \times 10^{-8}$  [m/s], se observa que la máxima magnitud de ECMS calculada disminuye considerablemente, pasando de 60 metros con la conductividad hidráulica original a 27 metros utilizando la conductividad hidráulica equivalente. Mismo caso comparando la Figura 22 con la Figura 26, correspondiente al caso de conductividad hidráulica original de  $1 \times 10^{-8}$  [m/s] y conductividad equivalente de  $5 \times 10^{-9}$  [m/s], donde la magnitud máxima de ECMS calculada es de 28 metros con la conductividad hidráulica original y 16 metros utilizando la conductividad hidráulica equivalente. Además es posible apreciar una mejora general del ECMS calculado en todos los piezómetros para los distintos pasos temporales comparados.

Se observa en las Figuras 25 y 26 un comportamiento singular en los ECMS calculados para todos los piezómetros, donde el modelo numérico bidimensional inicialmente sobrestima las cargas hidráulicas en comparación al modelo tridimensional del rajo tipo, para luego en los tiempos finales subestimar la carga hidráulica, cruzando el eje de ECMS nulo en algún instante determinado de tiempo dentro de los dos años simulados.

Es importante destacar que el enfoque de la optimización fue mejorar en general la magnitud del ECMS calculado en los piezómetros para los distintos pasos de tiempos comparados, pero también es posible repetir el ejercicio priorizando obtener mejor ajuste en los primeros pasos de tiempo, empeorando el ajuste de los tiempos finales, o viceversa optimizando el ajuste para los tiempos finales, empeorando el ajuste para los primeros pasos de tiempo. Esto daría como resultado, diferentes conductividades hidráulicas equivalentes a las reflejadas en la Tabla 7. En otras palabras, no existe una única conductividad equivalente que optimice indistintamente todos los piezómetros bajo una magnitud adecuada, tal como se expresó en la Tabla 1, tanto desde un punto de vista temporal como de la posición cada piezómetro en relación a la pared del rajo.

## **4.2. Casos con pozos de bombeo.**

Teniendo identificado de forma general el efecto que produce la geometría tridimensional del rajo estudiado, se procede a estudiar la incorporación de sistemas artificiales de drenaje.

Para este trabajo de título se abordará el uso de pozos de bombeo como método de drenaje artificial, debido a que es una forma de despresurización y de reducción del nivel freático ampliamente utilizado en minería.

En particular se estudiarán dos casos, un pozo ubicado fuera de la excavación al que se denominará out-pit, y otro ubicado cercano a la zona baja del rajo al que se le denominará in-pit, a modo de estudiar sus efectos sobre el modelamiento bidimensional.

El pozo out-pit se diseña con el objetivo de interceptar el agua procedente del flujo regional (Beale, 2007), disminuyendo la recarga que entra a la zona de la mina. Este tipo de pozos tienen como principal beneficio que son de larga duración, ya que no son destruidos por las expansiones programadas del plan minero. La desventaja es que debe excavarse a grandes profundidades, de modo que quede habilitado suficientemente por debajo del nivel freático, el cual no necesariamente es somero, para que su efecto sea beneficioso.

El pozo in-pit tiene la ventaja logra una despresurización eficiente de una zona localizada, obteniendo generalmente un gran efecto con poca profundidad de habilitación, pero con las desventajas de que el pozo puede ser destruido al poco tiempo debido a las excavaciones proyectadas en el plan minero y que el agua debe transportarse fuera del rajo, por lo que tiene que existir un sistema de bombeo hacia fuera de la excavación.

Esta sección tiene como objetivo determinar mejoras en la representación de los efectos que produce el pozo de bombeo en la sección bidimensional de observación, y tal como fue mencionado en el Capítulo 3, se realizarán comparaciones utilizando sólo dos conductividades hidráulicas,  $1 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{-9}$  [m/s], que corresponden a las más observadas en faenas ubicadas en el norte de Chile; dando pie para que a futuro el estudio se extienda a otros rangos de conductividades hidráulicas. A modo de observación, no siempre se utilizan pozos de bombeo para conductividades del orden de  $1 \times 10^{-9}$  [m/s], debido a que su efecto es bajo en la despresurización efectiva, salvo cuando hay presencia de fallas geológicas estructurales que hagan que el efecto del pozo sea lo suficientemente importante para que sea económicamente rentable. Si bien para este trabajo de título no se consideran las fallas geológicas en los modelos numéricos, sí se estudia esa conductividad con el objetivo de apoyar una futura investigación en el tema con modelos numéricos que las incorporen.

#### **4.2.1. Comparación de casos bidimensionales con pozo de bombeo en la sección de observación.**

Al igual que para el caso sin pozos, las primeras comparaciones corresponderán entre modelos que utilizan un mismo enfoque bidimensional, a modo de determinar si existen diferencias significativas entre las aproximaciones de ambos softwares.

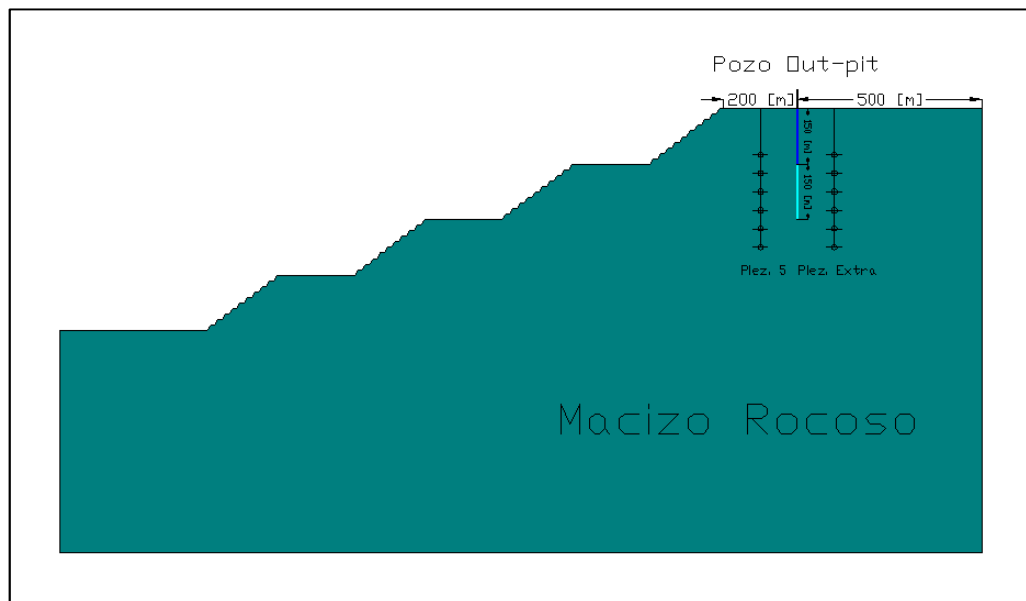
Como la idea es comparar el comportamiento de las nuevas condiciones de borde que representan al pozo incorporadas al modelo, los únicos casos posibles de comparar en el enfoque bidimensional son cuando el pozo se encuentra sobre la sección bidimensional de modelación, de tal forma de representar el pozo en ambos modelos numéricos de igual forma como se detalló en la sección 3.3.

#### 4.2.1.1. Pozo de bombeo out-pit.

La sección bidimensional tiene un largo de 2,500 metros, y el pozo out-pit se encuentra localizado a 2,000 metros de la horizontal, es decir, a 500 metros de la condición de borde lateral y a 200 metros del inicio de la excavación.

La elevación de la superficie en ese punto se encuentra a 1,200 metros y la recarga hidráulica lateral corresponde a aquella que induce la condición de borde de nivel conocido e igual a 1,100 metros, por lo que la criba del pozo debe estar bajo ese nivel. En base a eso, es que la profundidad de diseño va a ser de 300 metros, de los cuales 150 metros será de encamisado y 150 metros de criba (Figura 27).

Además, tal como fue mencionado en el Capítulo 3, se agregará un piezómetro extra de medición de datos cercano al pozo de bombeo, que permita mejorar el análisis de los resultados obtenidos de carga hidráulica. Para esta ubicación del pozo de bombeo out-pit, el piezómetro 5 corresponde al más cercano, el cual se encuentra localizado a 100 metros horizontales hacia la pared del rajo, por lo que se agrega un piezómetro extra de las mismas características 100 metros horizontales hacia el borde exterior del modelo numérico, tal como se muestra en la Figura 27.



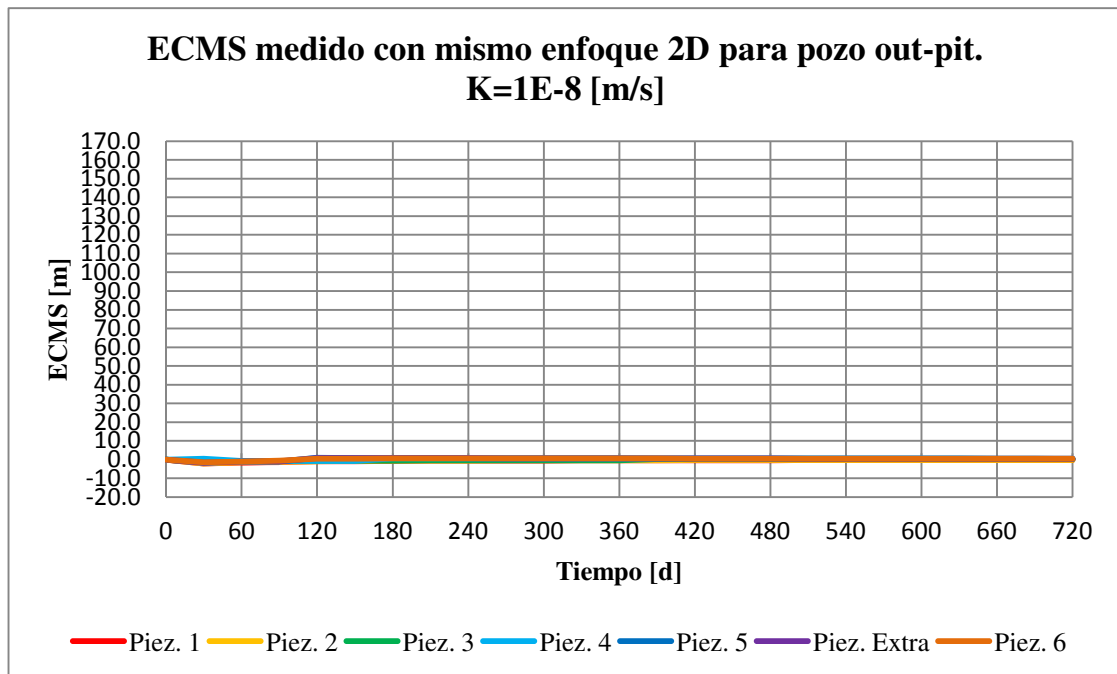
**Figura 27: Posición pozo out-pit en la sección de observación bidimensional.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las características de los modelos comparados se presentan en la siguiente tabla:

<i>Casos 4.2.1.1.</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	2D
<b>Nodos</b>	7,467	7,467
<b>Elementos</b>	14,568	14,568
<b>Capas</b>	0	0
<b>Secciones</b>	1	1
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 8: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow con pozo out-pit.**  
Fuente: Elaboración propia.

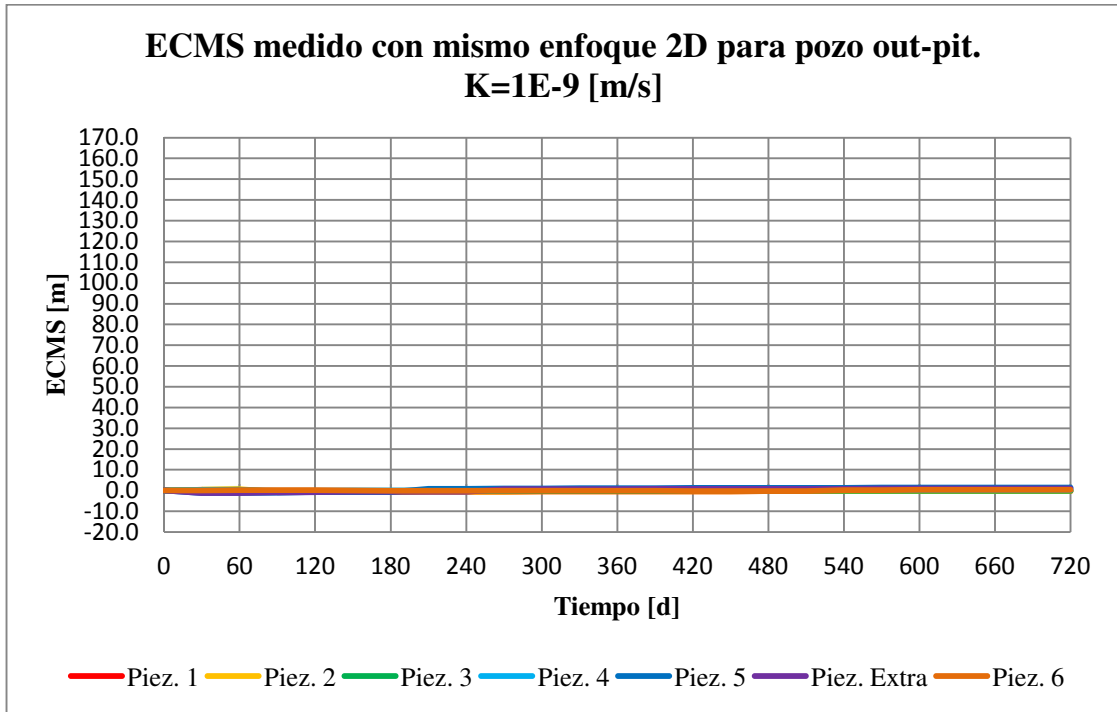
Los resultados de las comparaciones entre enfoque bidimensional para las dos conductividades se presentan en las Figuras 28 y 29<sup>10</sup>, donde al igual que el caso sin pozos, no existe mayor diferencia en los resultados obtenidos para los dos softwares utilizados.



**Figura 28: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo out-pit para K=1E-08 [m/s].**  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>10</sup> Notar que de ahora en adelante las figuras que presentan resultados en gráficos tienen distinto rango del eje vertical al mostrado en la sección 4.1 Casos sin pozos de bombeo.





**Figura 29: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo out-pit para K=1E-09 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**

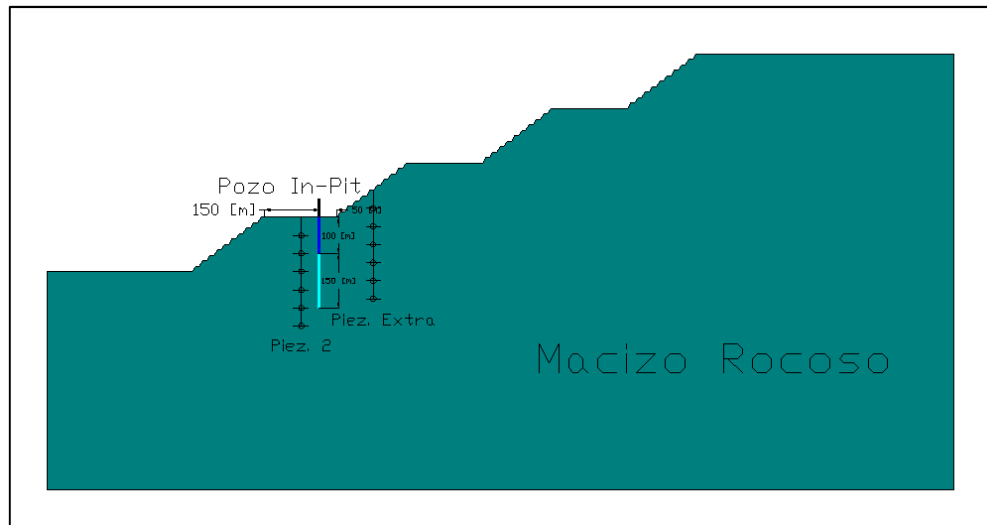
#### 4.2.1.2. Pozo de bombeo in-pit.

Para este caso, el pozo de bombeo se encuentra ubicado dentro de la primera rampa de acceso, a 750 metros del borde izquierdo del modelo. Se sitúa hacia un costado de la rampa, a modo de que no interfiera la circulación de maquinaria, quedando ubicado específicamente a 150 metros del final de la pendiente inter-rampas izquierda y 50 metros del inicio de la pendiente inter-rampas a la derecha.

La elevación de la superficie en ese punto se encuentra a 750 metros, y considerando que el nivel freático está muy cercano a la superficie es que la criba del pozo puede ubicarse a poca profundidad. En base a eso, es que la profundidad de diseño va a ser de 250 metros, de los cuales 100 metros será de encamisado y 150 metros de criba (Ver Figura 30).

Para este caso, el piezómetro 2 es el más cercano al pozo de bombeo, ubicado a sólo 50 metros horizontales hacia el centro del rajo. El piezómetro extra a utilizar se localiza en la mitad de la pendiente inter-rampas siguiente al pozo in-pit (ver Figura 30), por tanto queda a 150

metros horizontales de distancia. En este caso, la elevación de la superficie de ese punto es distinta a la de la rampa donde se encuentra el pozo, por lo que el piezómetro parte desde una elevación de 875 metros, y posee una longitud de 300 metros de profundidad.



**Figura 30: Posición pozo in-pit en la sección de observación bidimensional.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las características de los modelos comparados se presentan en la siguiente tabla:

<i>Casos 4.2.1.2.</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	2D
<b>Nodos</b>	7,471	7,471
<b>Elementos</b>	14,576	14,576
<b>Capas</b>	0	0
<b>Secciones</b>	1	1
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 9: Resumen de la comparación caso 2D Seep vs 2D Feflow con pozo in-pit.**  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las comparaciones entre enfoque bidimensional para las dos conductividades se presentan en las Figuras 31 y 32, donde nuevamente no se aprecian diferencias significativas para los resultados obtenidos utilizando el mismo enfoque bidimensional.

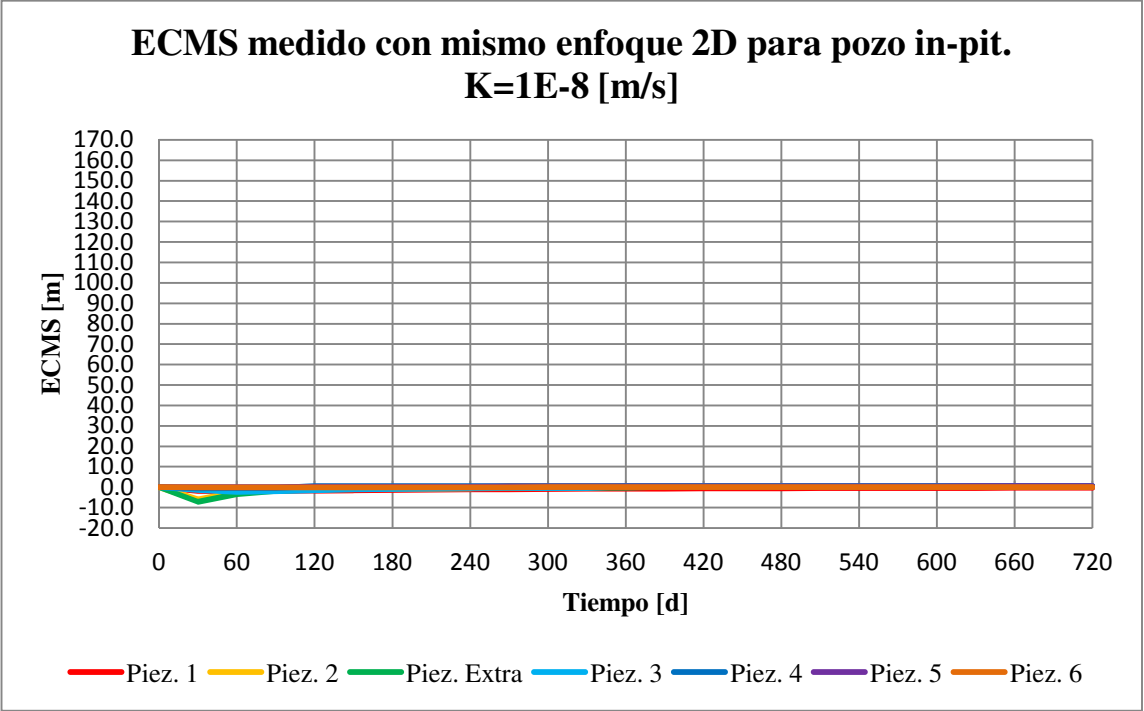


Figura 31: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo in-pit para  $K=1E-08$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

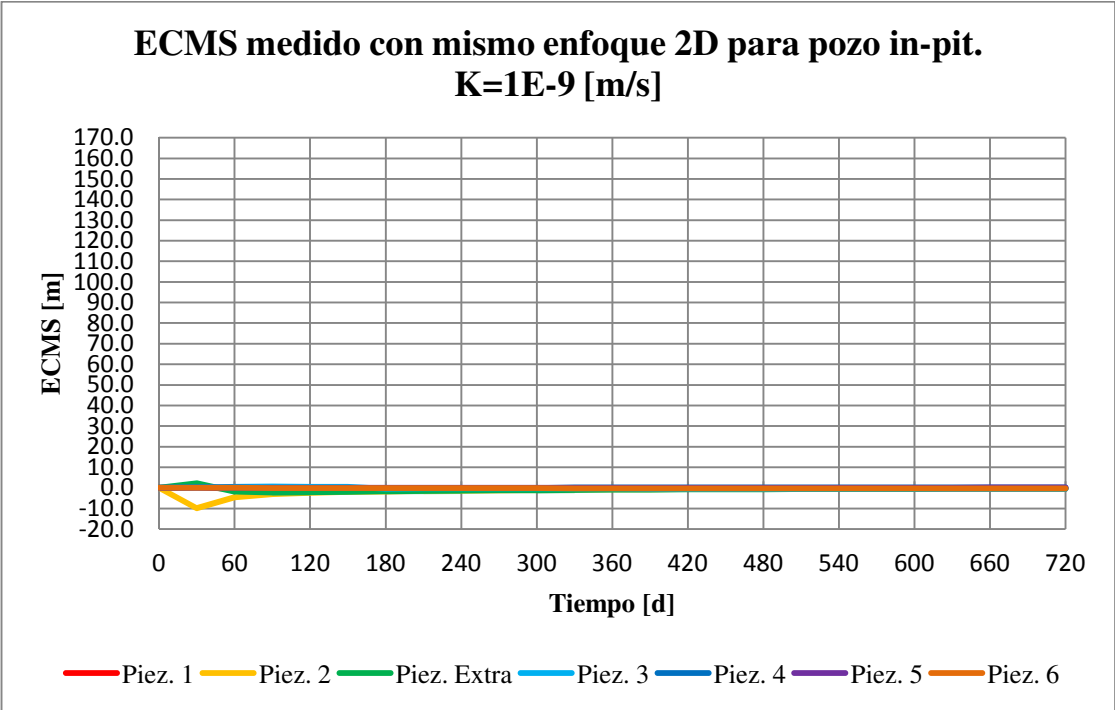


Figura 32: ECMS medido entre enfoques 2D Seep y 2D Feflow con pozo in-pit para  $K=1E-09$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

**4.2.2. Comparación de caso pseudo-tridimensional con modelo bidimensional con pozo de bombeo en la sección de observación.**

Al igual que en los casos sin pozos, es de interés observar el comportamiento de los modelos numéricos utilizando un enfoque pseudo-tridimensional, en especial porque la representación del pozo de bombeo sí impone flujo tridimensional dentro del volumen modelado, algo que no ocurría para el caso sin pozos.

Es preciso recordar que cuando no había presencia de pozos de bombeo, no existía diferencia entre el enfoque bidimensional con el pseudo-tridimensional, obteniéndose resultados muy similares de carga hidráulica. Incluso, cuando se utilizaba el mismo software, FEFLOW, los resultados entre los dos enfoques diferían sólo al tercer decimal de la carga hidráulica, por lo que se podrían considerar prácticamente idénticos.

Las características de los modelos numéricos para el caso con el pozo de bombeo out-pit e in-pit se presentan en las Tablas 10 y 11 respectivamente.

<i>Casos 4.2.2.a</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D (pseudo)
<b>Nodos</b>	7,467	156,807
<b>Elementos</b>	14,568	291,360
<b>Capas</b>	0	20
<b>Secciones</b>	1	21
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 10: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D con pozo out-pit. Fuente: Elaboración propia.**

<i>Casos 4.2.2.b</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D (pseudo)
<b>Nodos</b>	7,471	156,891
<b>Elementos</b>	14,576	291,520
<b>Capas</b>	0	20
<b>Secciones</b>	1	21
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 11: Resumen de la comparación caso pseudo-3D vs 2D con pozo in-pit.**  
**Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados para ambos casos con el pozo de bombeo out-pit e in-pit se presentan en las Figuras 33, 34, 35 y 36, en se puede observar que en general casi todos los piezómetros no cercanos al pozo de bombeo, entregan resultados similares con un bajo ECM, acordes incluso con las comparaciones utilizando en ambos un enfoque bidimensional. No obstante, en los piezómetros más cercanos a la ubicación de los pozos de bombeo existen diferencias por sobre los 25 metros y de hasta 150 metros de magnitud del ECMS.

Esto quiere decir que la representación de los pozos a través de las condiciones de borde difiere según el enfoque utilizado, principalmente porque en el pseudo-3D se impone un flujo tridimensional interno dentro de los límites del volumen representado, algo que no puede desarrollarse en el enfoque bidimensional, por lo que este enfoque no representa el efecto real del pozo de bombeo que es intrínsecamente tridimensional.

Otro aspecto que destaca de los resultados presentados en las tablas es que, al contrario de lo que sucedía con el efecto de la geometría, la menor conductividad hidráulica produce mayor diferencia de ECMS en los piezómetros más cercanos al pozo de bombeo para los enfoques comparados.

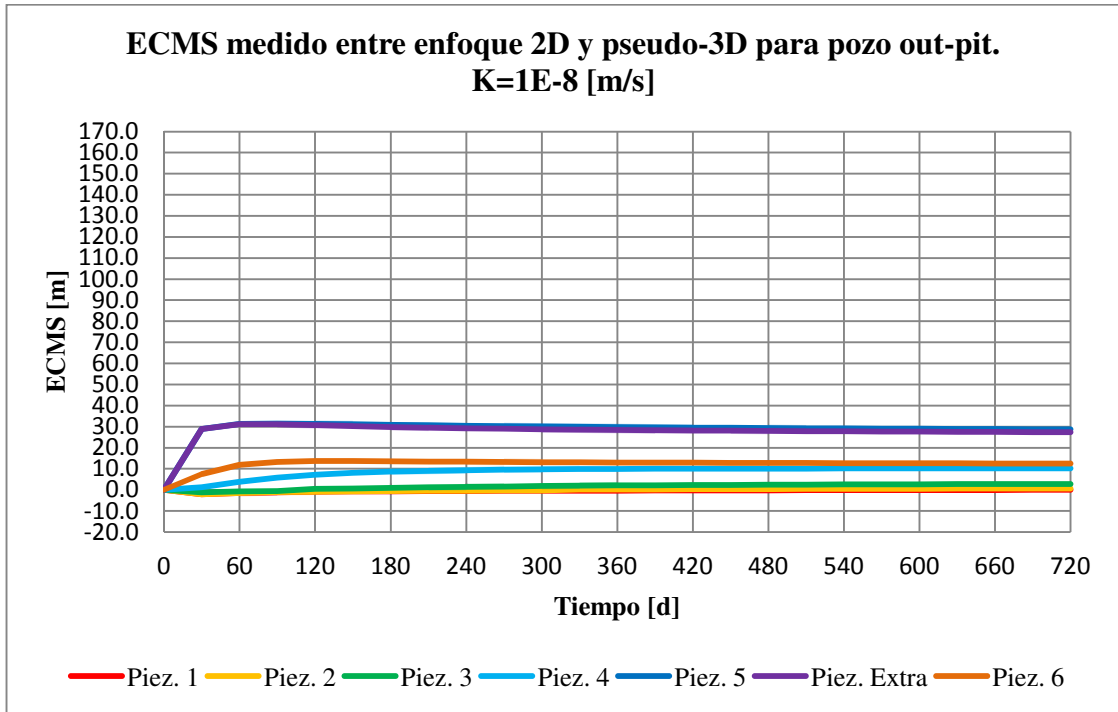


Figura 33: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo out-pit para K=1E-08 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

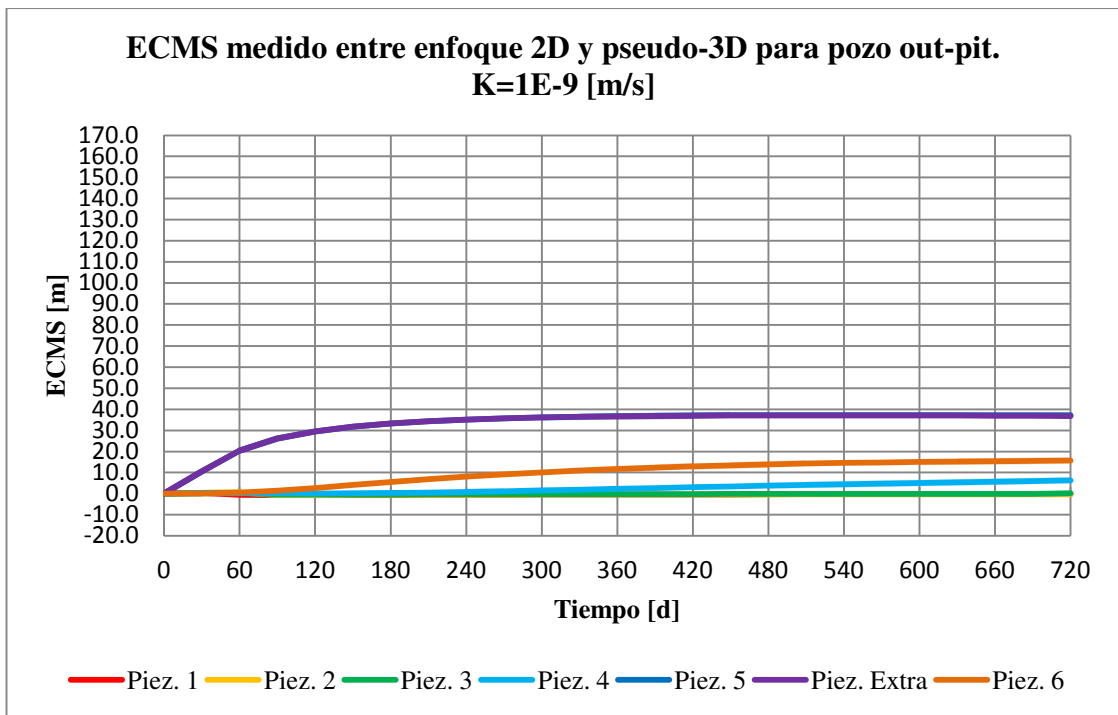
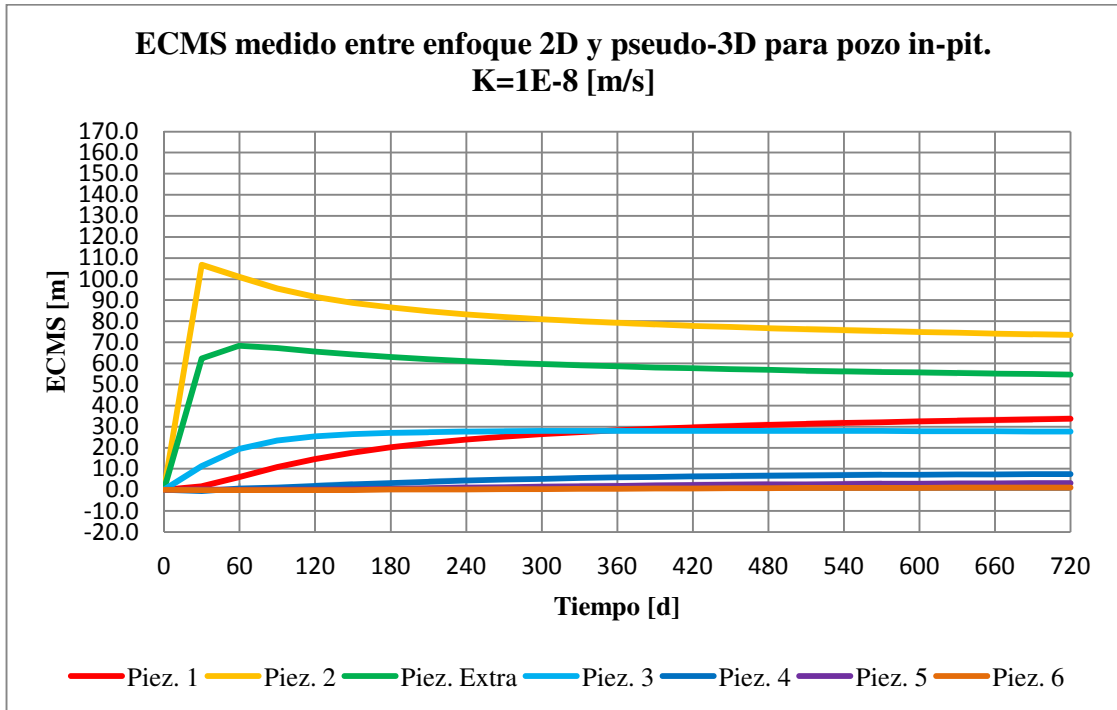
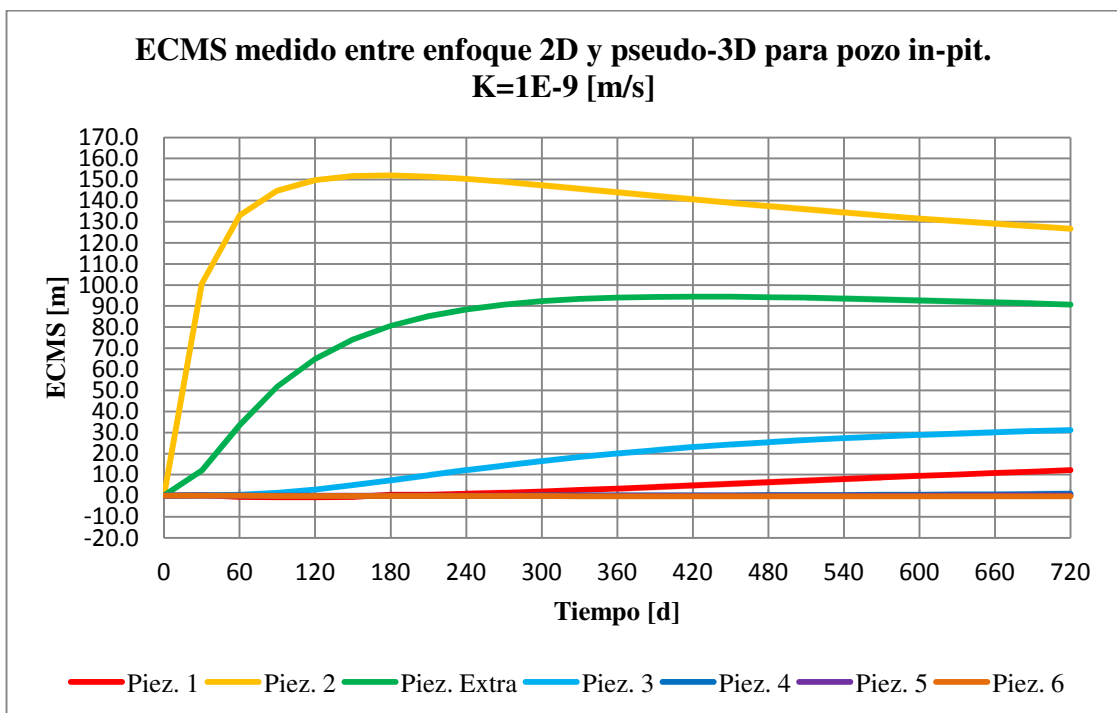


Figura 34: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo out-pit para K=1E-09 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 35: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo in-pit para K=1E-08 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 36: ECMS medido entre enfoques pseudo-3D y 2D con pozo in-pit para K=1E-09 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.**

#### **4.2.3. Comparación de caso tridimensional con modelo bidimensional con pozo de bombeo en la sección de observación.**

Ha quedado claro que cuando las condiciones de borde imponen flujo tridimensional dentro de los límites del modelo, da como resultado que las cargas hidráulicas obtenidas difieran entre los enfoques bidimensional y pseudo-3D. El siguiente paso es comparar los resultados con la geometría radial aplicada al rajo modelado.

En este punto se ha tomado la decisión de utilizar la conductividad hidráulica equivalente en los modelos bidimensionales, siguiendo la línea de pensamiento aplicado a la calibración de los modelos con las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas presentes, y de esta forma disminuir las diferencias combinadas de geometría y pozos de bombeo frente al enfoque bidimensional. Esta decisión es de suma importancia en la siguiente etapa, donde se evalúan las mejoras en la representación del efecto del pozo de bombeo en los modelos bidimensionales, por lo que el objetivo es evitar que la nueva metodología propuesta de representación del pozo compense tanto las diferencias producidas por el pozo, como las inducidas por la geometría al mismo tiempo.

En resumen, al utilizar la conductividad hidráulica equivalente se asume que las diferencias producidas únicamente por la geometría fueron minimizadas a través de un proceso de calibración previo utilizando como variable la conductividad hidráulica del macizo rocoso, donde destacan casos con diferencias remanentes sobre los 10 metros de ECMS (Figura 26).

##### **4.2.3.1. Pozo de bombeo out-pit.**

El caso tridimensional se diferencia con el pseudo-3D en el ancho representativo relativo al punto donde se encuentra ubicado el pozo dentro de la sección de observación. En particular, para el modelo pseudo-tridimensional se utiliza un ancho constante de 250 metros que equivale al ancho de la sección tridimensional en el fondo del rajo, es decir, la sección de observación se encuentra a 125 metros de cada pared lateral del modelo. Al aplicar la geometría radial, en la



misma ubicación se tiene un ancho de 1,250 metros, por lo que el pozo está a 625 metros de distancia a los bordes laterales del modelo.

Las características de los modelos con el pozo de bombeo out-pit corresponden a los exhibidos en la Tabla 12.

<i>Casos 4.2.3.1</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D
<b>Nodos</b>	7,467	380,817
<b>Elementos</b>	14,568	728,400
<b>Capas</b>	0	50
<b>Secciones</b>	1	51
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250 a 1,500
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 12: Resumen de la comparación casos 3D vs 2D con pozo out-pit.**  
Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 37 y 38 muestran los resultados para las dos conductividades estudiadas, en donde se puede inferir que nuevamente los piezómetros cercanos al pozo de bombeo son los que presentan mayores ECMS entre enfoques utilizados, al igual como sucedía utilizando modelos pseudo-3D.

Si se resta la magnitud de los ECMS remanente que se producía por el efecto de la geometría utilizando la conductividad hidráulica equivalente (Figura 26), se tiene que el efecto de los pozos de bombeo sigue siendo más significativo para la conductividad menor ( $1 \times 10^{-9}$  [m/s]), acorde a lo que se observaba con el uso del modelo pseudo-tridimensional.

No se hará un análisis entre los resultados obtenidos de las comparaciones de enfoques bidimensional/pseudo-tridimensional con enfoques bidimensional/tridimensional, debido a que la primera comparación se utilizó la misma conductividad hidráulica en ambos enfoques, no así en para la segunda comparación donde se utiliza conductividad equivalente en el enfoque bidimensional.

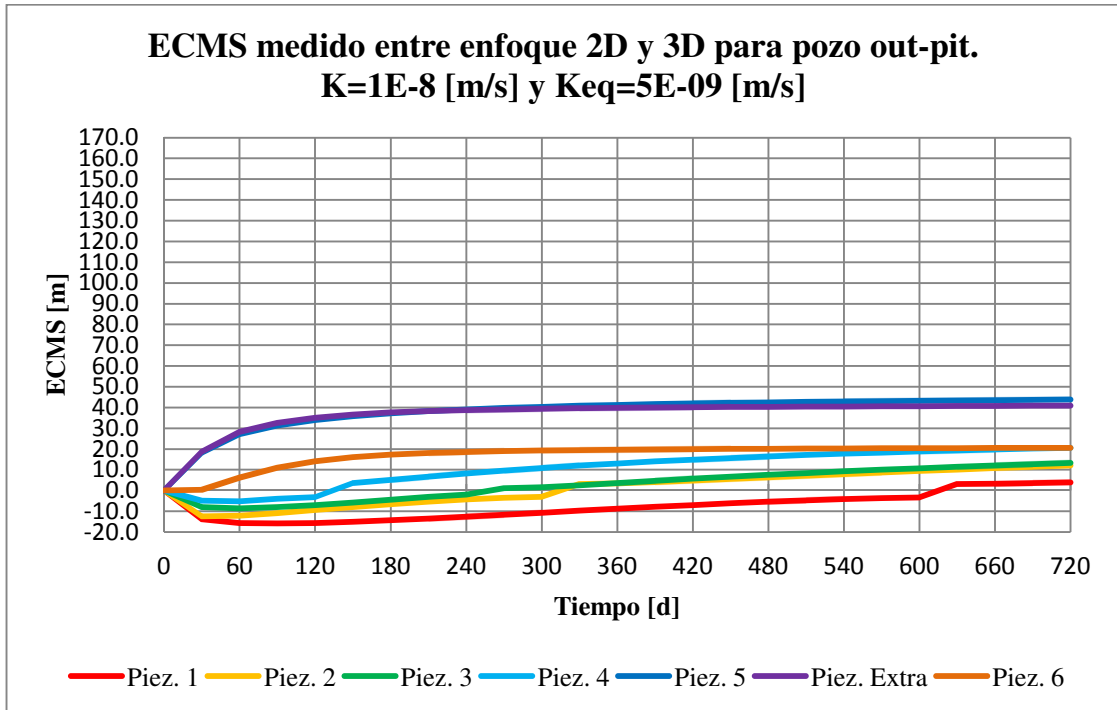


Figura 37: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo out-pit para K=1E-08 [m/s] y Keq=5E-09 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

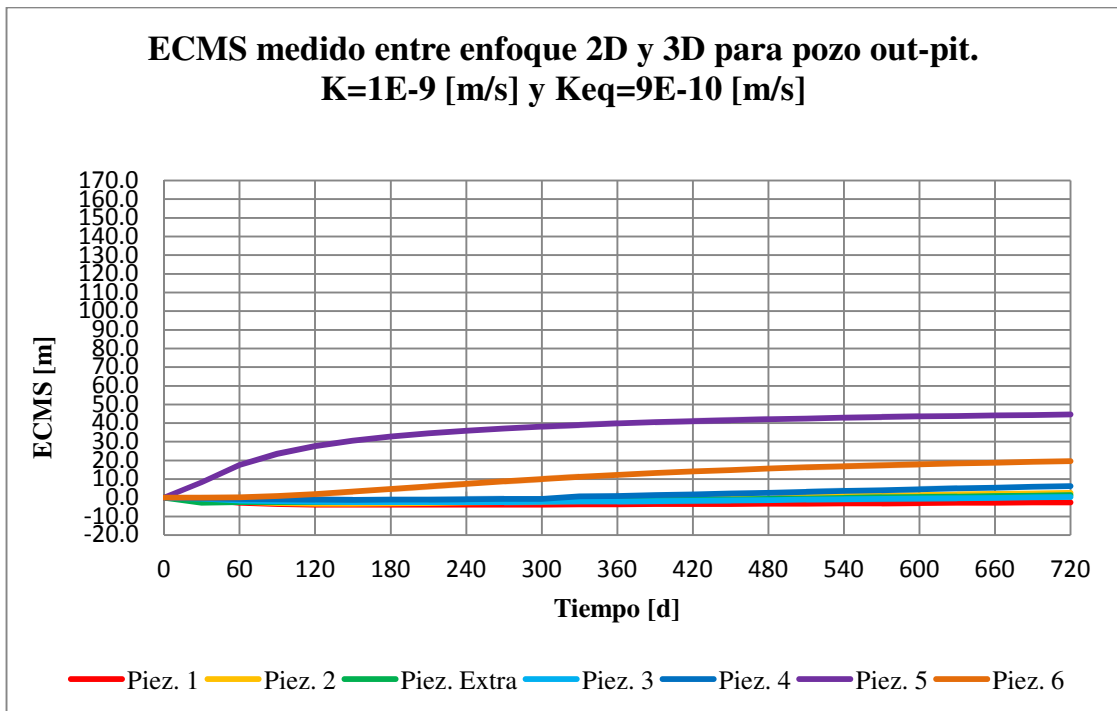


Figura 38: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo out-pit para K=1E-09 [m/s] y Keq=9E-10 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.3.2. Pozo de bombeo in-pit.

Para estos casos, al aplicar la geometría radial en el punto donde está ubicado el pozo de bombeo se tiene un ancho de 625 metros, por lo que el pozo está a 312.5 metros de distancia de los bordes laterales del modelo. Las características de los modelos con el pozo de bombeo in-pit corresponden a los de la Tabla 13.

<i>Casos 4.2.3.2</i>	<b>Modelo A</b>	<b>Modelo B</b>
<b>Software</b>	SEEP/W	FEFLOW
<b>Enfoque</b>	2D	3D
<b>Nodos</b>	7,471	381,021
<b>Elementos</b>	14,576	728,800
<b>Capas</b>	0	50
<b>Secciones</b>	1	51
<b>Ancho representativo [m]</b>	1	250 a 1,500
<b>Pozo</b>	Sí	Sí

**Tabla 13: Resumen de la comparación casos 3D vs 2D con pozo in-pit.**  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para las dos conductividades hidráulicas y sus respectivas conductividades equivalentes en los modelos bidimensionales se presentan en las Figuras 39 y 40.

De este análisis se desprenden las mismas conclusiones que para el pozo out-pit, en donde los piezómetros más afectados son los cercanos al pozo de bombeo, y nuevamente la conductividad hidráulica menor es la que presenta mayores diferencias entre los enfoques.

Se observa que las magnitudes máximas de ECMS son similares a las comparaciones con los modelos pseudo-3D, pero hay que notar que en este caso se utiliza la conductividad hidráulica equivalente para los modelos numéricos bidimensionales.

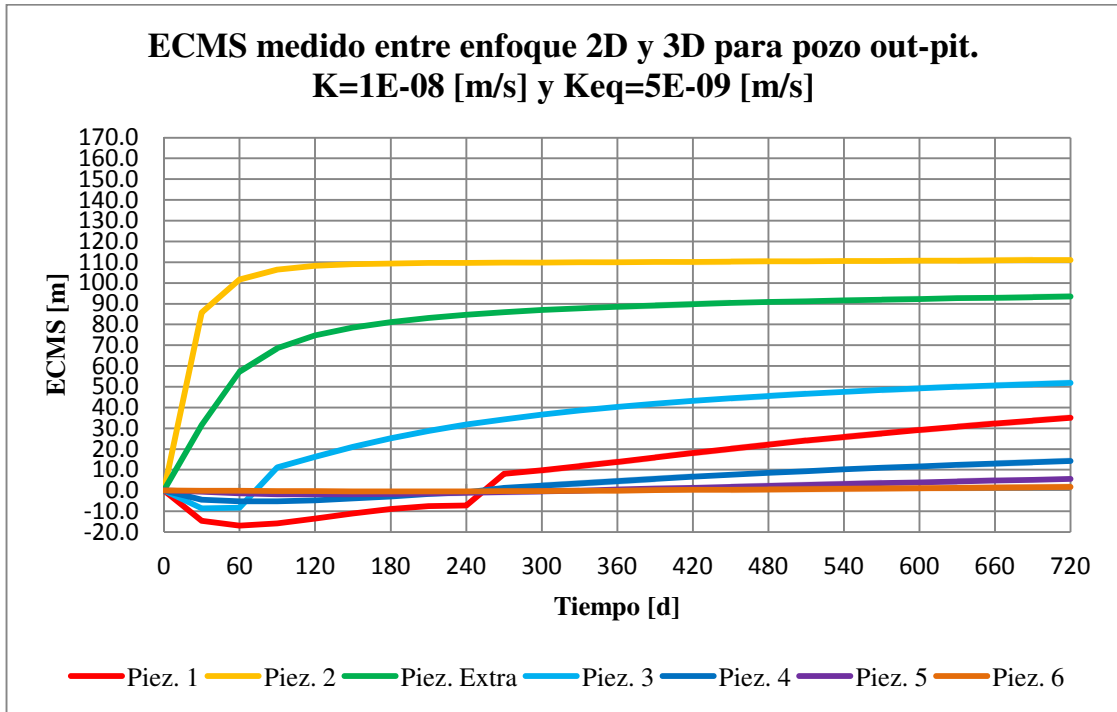


Figura 39: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo in-pit para K=1E-08 [m/s] y Keq=5E-09 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

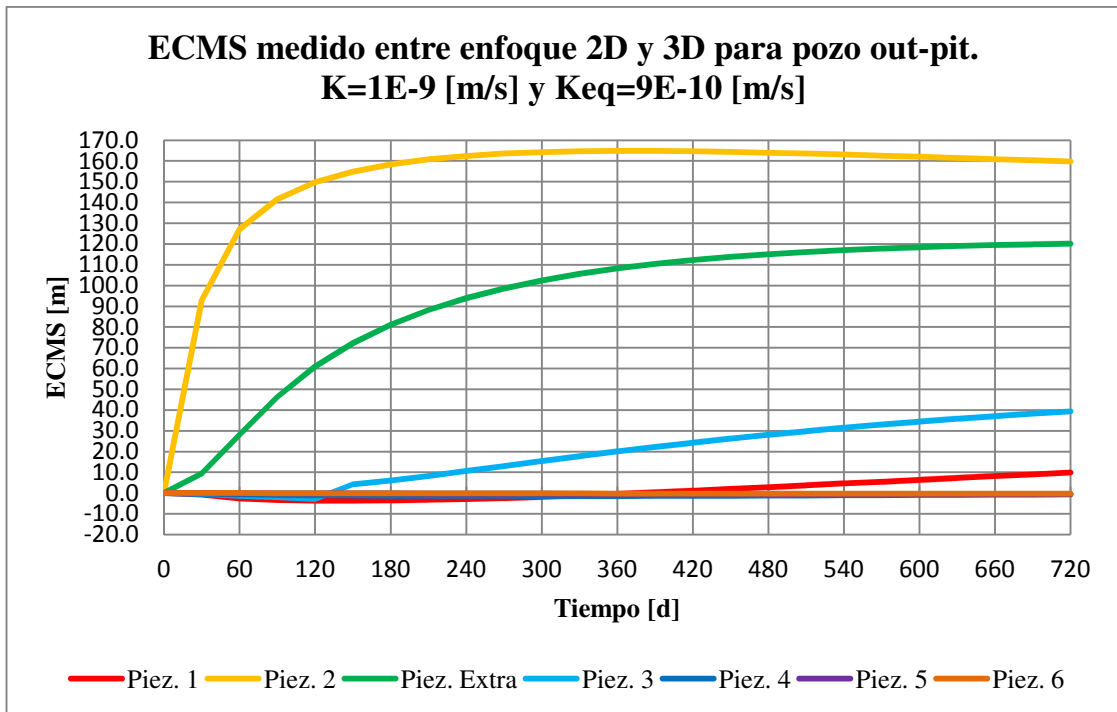


Figura 40: ECMS medido entre enfoques 3D y 2D con pozo in-pit para K=1E-09 [m/s] y Keq=9E-10 [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

#### **4.2.3.3. Evaluación de representación del efecto de un pozo de bombeo en el modelo bidimensional.**

En las faenas mineras que involucran modelación bidimensional resulta muy poco probable que los pozos de bombeo se encuentren exactamente sobre la sección bidimensional, por lo que el efecto que produce el pozo debe ser proyectado adecuadamente a la sección modelada. Esto se traduce en un problema, ya que no es posible saber previo al proceso de calibración cuál es el efecto proyectado que produce un pozo de bombeo cercano sobre la sección bidimensional.

Es por esto, que se utilizara los resultados obtenidos de los casos con el pozo en la sección, a modo de generar un proceso que permita determinar de forma indirecta el efecto aproximado que genera el pozo de bombeo, donde se deben incorporar dos etapas muy importantes. Primeramente se debe considerar que el efecto del pozo depende de la carga hidráulica potencial que se encuentra sobre él, la cual varía debido al drenaje natural inducido por las excavaciones que determinan la geometría del rajo modelado. Como segunda etapa, está el antecedente que existe una diferencia sustancial al utilizar condiciones de borde que representen al pozo en un enfoque bidimensional a uno tridimensional, donde el primer enfoque produce una despresurización excesiva en la zona aledaña al pozo en comparación al enfoque tridimensional, tal cual fue analizado en las secciones anteriores. Por tal motivo, es necesario agregar un factor de corrección en el proceso que permita compensar esta diferencia internamente en el enfoque bidimensional.

Actualmente, una aproximación utilizada para determinar el efecto del pozo sobre la sección bidimensional es la que se describe de forma sencilla a continuación:

- Paso 1: A través de la piezometría real identificar cuál o cuáles pozos aledaños a la sección bidimensional tendrían un efecto de despresurización artificial sobre el modelo.
- Paso 2: Proyectar el o los pozos de bombeo sobre la sección bidimensional, siguiendo algún criterio propuesto por el modelador, el cual suele seguir la misma cota de terreno o la orientación de las fallas mayores, en caso de que haya gran presencia de fallas en la zona.

- Paso 3: En la proyección del pozo, se sitúan sólo tres nodos seepage a lo largo de la criba. Por lo general, uno de ellos se encuentra a la misma profundidad del fondo de la criba del pozo, otro cercano a la zona media de la criba y otro en la zona alta de la criba<sup>11</sup>.
- Paso 4: Se corre el escenario utilizando la condición seepage en los nodos.
- Paso 5: De los resultados del escenario, se obtiene el caudal extraído mes a mes en cada uno de los tres nodos seepage y luego se promedian estos valores para cada nodo que representa la criba.
- Paso 6: Se aplica un factor de corrección, con un valor entre 0 y 1, sobre cada promedio de caudal extraído, a modo de compensar la despresurización excesiva que produce el enfoque bidimensional y en función de la distancia del pozo a la sección proyectada.
- Paso 7: Se itera el mismo escenario, pero ahora utilizando una condición de caudal de extracción constante en cada nodo que fue determinado previamente en los pasos anteriores.

Es importante mencionar que a modo de generar una mejor representación del efecto transiente del pozo debido al drenaje natural, es que se suele limitar la duración del escenario a un máximo de 6 meses, pudiendo en algunos casos llegar a 12 meses a lo sumo. En caso de que el escenario a modelar supere el límite de tiempo establecido por criterio del consultor a cargo, se debe dividir el escenario en varios escenarios idénticos y consecutivos que den como resultado la totalidad de la duración del escenario original.

Un ejemplo que entrega una idea de cómo se realizan los pasos 5 y 6 correspondientes al proceso numérico se presenta en la Tabla 14.

---

<sup>11</sup> Cabe destacar que no necesariamente los puntos deben estar situados exactamente en la proyección del punto de inicio, medio y final de la criba, y su posición real va a depender también del criterio del modelador, quien buscará simular de forma adecuada el posible efecto del pozo en la sección según sea el caso.

Tiempo	Nodo Superior	Nodo Centro	Nodo Inferior
	Caudal Extraído Simulado (Nodos seepage)		
[d]	[m <sup>3</sup> /s]		
30	-1.2E-7	-2.4E-7	-4.3E-7
60	-9.9E-8	-2.0E-7	-3.8E-7
90	-8.7E-8	-1.8E-7	-3.6E-7
120	-8.0E-8	-1.7E-7	-3.5E-7
150	-7.5E-8	-1.6E-7	-3.4E-7
180	-7.2E-8	-1.5E-7	-3.3E-7
<b>Promedio</b>	<b>-8.3E-8</b>	<b>-1.7E-7</b>	<b>-3.5E-7</b>
<b>Factor de Corrección</b>	<b>0.30</b>	<b>0.30</b>	<b>0.30</b>
<b>Valor Final para Paso 7</b>	<b>-2.5E-8</b>	<b>-5.1E-8</b>	<b>-1.1E-7</b>

Tabla 14: Ejemplo de procedimiento matemático generalmente usado para representar el efecto sobre la presión de poros de un pozo de bombeo.  
Fuente: Elaboración propia.

El ejemplo mostrado en la Tabla 14, corresponde a un caso utilizado en este trabajo de título de un pozo out-pit, donde el comportamiento observado se repite para todos los casos estudiados en este trabajo debido a la configuración particular de los modelos, por lo que se puede inferir que el comportamiento del caudal que extraen los nodos es siempre decreciente en el tiempo y que el caudal extraído va en aumento en función de la profundidad del nodo.

El proceso mencionado ha entregado experiencias satisfactorias para modelos bidimensionales regulares; no así para modelos complejos que han requerido de mayor análisis e intervención. Son estos casos de mayor complejidad los que han dado la orientación hacia dónde deben apuntar las mejoras en la representación de los pozos de bombeo en secciones bidimensionales, por lo que el objetivo de esta sección es mejorar el proceso descrito en orden de responder en parte a las siguientes interrogantes:

- ¿Son suficientes los tres nodos seepage proyectados o deben ser más?

- ¿Es correcta la posición respecto a la criba de los nodos o en general resulta conveniente ubicarlos en otras posiciones?
- ¿El factor de corrección es idéntico en todos los nodos o se puede lograr una mejor representación si es que se diferencia según el nodo?
- ¿Es un valor constante el factor de corrección o existe una mejora sustancial si se hace variable en el tiempo?
- ¿Es posible conocer a priori al proceso de calibración cuál es el factor de corrección del pozo?

Dar respuesta contundente a cada una de las interrogantes mencionadas, incluso utilizando casos simplificados y generales, requeriría de mucho tiempo y escapa de los alcances generales de este trabajo de título; por lo tanto se ha escogido responder sólo a las últimas dos inquietudes en virtud de los beneficios potenciales que pueden entregar.

En referencia a si el factor de corrección es constante o variable, se debe a que el proceso descrito asume que es constante en el tiempo, no obstante se sabe que los efectos que produce un pozo de bombeo corresponden a un fenómeno transiente, por lo tanto la influencia de un pozo de bombeo en la sección de modelación puede variar a lo largo del tiempo, lo que puede ser reflejado en un comportamiento variable del factor de corrección.

Por otro lado, la última pregunta va orientada a que actualmente el proceso de calibración considera este factor de corrección como una variable de modelación, la que puede ser calibrada en función del efecto observado en la piezometría cercana a la sección bidimensional y el criterio del modelador. Conocer a priori cual es el factor de corrección óptimo para cada caso de modelación resultaría ideal, no sólo porque se evitaría destinar tiempo calibrando este factor, sino principalmente debido a que se disminuye el número de variables en la calibración, y por ende se evita que estas variables interfieran en la calibración de los parámetros hidráulicos de las unidades, compensando erróneamente los efectos que debiesen ser atribuidos a tales parámetros.

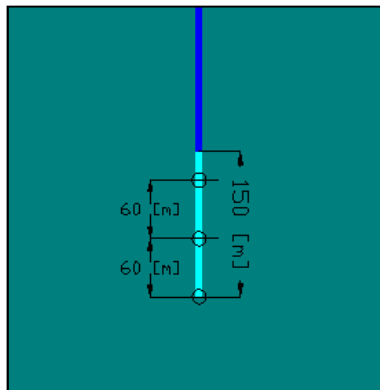
Además, una vez que se obtiene respuesta de ambas interrogantes, se puede proceder a determinar los factores de corrección dependiendo de la distancia a la cual se encuentre el pozo



de bombeo con la sección bidimensional de observación, algo que será tratado en la Sección 4.2.4.

Volviendo a centrarse en si el factor de corrección mejora la representación de los pozos si es que se le considera variable en el tiempo, es que se ha procedido a realizar una serie de pruebas bidimensionales en SEEP/W a modo de comparar con los datos obtenidos de los modelos tridimensionales con los pozos centrados en la sección de observación.

El primer paso fue optar por subdividir los dos años de modelación en cuatro escenarios de 6 meses cada uno, siguiendo la recomendación de la metodología explicada anteriormente. Además se escoge la posición de los tres nodos que se activarán como representación del efecto producido por el pozo de bombeo real. El nodo más profundo se encontrará en la misma elevación que el fondo de la criba, el siguiente nodo 60 metros sobre el anterior y el más somero nuevamente a 60 metros sobre el anterior (Figura 41).



**Figura 41: Posición de los nodos en la criba del pozo representado.**  
Fuente: Elaboración propia.

Luego, se utilizarán como datos para la calibración las cargas hidráulicas obtenidas de los dos piezómetros más cercanos a los pozos en cada paso de tiempo de los distintos modelos tridimensionales. Con estos datos, se calibrará el factor de corrección constante que minimice el ECM ponderado, que se define en la Ecuación 8.

$$ECMP = \frac{\alpha_n \sum_{j=1}^p ECM_{n,j} + \alpha_m \sum_{k=1}^p ECM_{m,k}}{p} \quad [8]$$

dónde:

$ECMP$ [m]:	Error cuadrático medio ponderado.
$ECM_{n,j}$ [m]:	Error cuadrático medio del piezómetro $n$ para el tiempo $j$ .
$\alpha_n$ [ ]:	Ponderador del piezómetro $n$ .
$p$ [ ]:	Total de tiempos comparados.

Para este análisis es necesario recordar la Figura 27, donde se identifica los dos piezómetros más cercanos al pozo out-pit, piezómetro 5 y piezómetro extra out-pit, correspondientes a los valores  $n$  y  $m$  respectivamente. Además, ambos piezómetros se encuentran a la misma distancia en planta del pozo de bombeo, por lo que sus ponderadores serán idénticos con un valor de 0.5 para cada uno. El total de tiempos comparados son los cuatro semestres, es decir un total de 24 meses (valor de  $p$ ).

De la misma forma, para el caso del pozo in-pit, los dos piezómetros más cercanos son los piezómetro 2 y el piezómetro extra in-pit, pero para este caso, el piezómetro 2 se encuentra bastante más cerca del pozo de bombeo que otro piezómetro, por lo que se opta por otorgarle un ponderador más alto correspondiente a dos tercios ( $2/3$ ), dejando el tercio ( $1/3$ ) restante al piezómetro extra.

La misma metodología se realizará para determinar el factor de corrección variable, pero ahora buscando minimizar semestralmente el ECMP.

Es preciso mencionar, que el factor de corrección es un valor entre entre 0 y 100%, y que para efectos de la calibración sólo se utilizarán porcentajes múltiplos de 5%, debido que se requiere una gran cantidad de tiempo involucrado en correr todos los escenarios para cada porcentaje utilizado, buscando determinar cuál es el que optimiza el ECMP.

Lo anterior es bastante claro cuando se realiza la optimización de los factores de corrección variable en el tiempo, ya que son muchas las combinaciones de factores que pueden potencialmente optimizar el ECMP, haciendo impracticable -debido a una limitación de tiempo involucrado en este trabajo de título- aumentar la precisión del factor que lo optimiza.

Los resultados obtenidos para las conductividades  $1 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{-9}$  [m/s] se presentan en las Tablas 15 y 16 respectivamente:

Ubicación:	Pozo out-pit		Pozo in-pit.	
Factor de corrección:	Constante	Variable	Constante	Variable
Semestre 1	25 %	40 %	40 %	50 %
Semestre 2	25 %	25 %	40 %	40 %
Semestre 3	25 %	25 %	40 %	35 %
Semestre 4	25 %	25 %	40 %	30 %
<b>EMCP [m]</b>	<b>5.10</b>	<b>4.44</b>	<b>15.01</b>	<b>12.40</b>

Tabla 15: Factores de corrección calibrados según el caso y tipo para  $K=1E-08$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

Ubicación:	Pozo out-pit		Pozo in-pit.	
Factor de corrección:	Constante	Variable	Constante	Variable
Semestre 1	35 %	50 %	40 %	55 %
Semestre 2	35 %	25 %	40 %	35 %
Semestre 3	35 %	25 %	40 %	30 %
Semestre 4	35 %	25 %	40 %	30 %
<b>EMCP [m]</b>	<b>4.34</b>	<b>3.55</b>	<b>18.62</b>	<b>16.38</b>

Tabla 16: Factores de corrección calibrados según el caso y tipo para  $K=1E-09$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

De las tablas se desprenden a simple vista tres observaciones:

- Utilizar un factor de corrección variable en el tiempo mejora el ajuste con la piezometría utilizada de los modelos tridimensionales.
- El factor de corrección variable es decreciente en el tiempo, siendo su máximo para el primer subescenario y estabilizándose en los subescenarios siguientes.
- Los valores de EMCP obtenidos para los casos del pozo in-pit son altos considerando el criterio de la Tabla 1, pero es preciso recordar que también incluye las diferencias que produce la geometría tridimensional. Se sugiere mayor estudio de la representación actual del pozo para estos casos.

A modo de medir la magnitud del beneficio entre utilizar un factor de corrección variable o constante, se define un factor de eficacia según lo expresado en la Ecuación 9, se cuyos resultados son presentados en la Tabla 17.

$$Ef = \frac{ECMP_C - ECMP_V}{ECMP_C} * 100 \text{ [%]} \quad [9]$$

dónde:

$Ef$  [%]: Eficacia.

$ECMP_C$  [m]: Error cuadrático medio ponderado utilizando un factor de corrección constante.

$ECMP_V$  [m]: Error cuadrático medio ponderado utilizando un factor de corrección variable.

	Pozo out-pit	Pozo in-pit.
$K_1=1 \times 10^{-8}$ [m/s]	12.9 %	17.4 %
$K_2=1 \times 10^{-9}$ [m/s]	18.2 %	12.2 %

**Tabla 17: Eficacias entre utilizar un factor de corrección variable frente a uno constante.  
Fuente: Elaboración propia.**

Las eficacias resultantes reafirman que utilizar un factor variable en el tiempo mejora considerablemente la calibración y, por tanto, es recomendable utilizar esos factores en el proceso, en virtud de mejorar la representación del efecto del pozo utilizando un enfoque bidimensional.

#### **4.2.4. Representación del efecto del pozo de bombeo en el modelo bidimensional cuando se encuentra fuera de la sección de observación.**

Tal como fue comentado anteriormente, resulta improbable que en faenas mineras los pozos de bombeo se encuentren exactamente sobre una sección bidimensional de modelación, y por lo general estos se encuentran a cierta distancia de ella. Por lo tanto, el efecto producido del

pozo en la sección es menor a que si estuviese sobre la sección misma, esto quiere decir que la representación del efecto del pozo en la sección bidimensional debe ser ajustada.

En particular, el proceso previamente utilizado para representar el pozo en la sección permite que los factores de corrección no sólo realicen la compensación de las diferencias que se producen entre utilizar un modelo bidimensional a uno tridimensional, sino que además abre la posibilidad a que se utilicen este mismo enfoque de factores de corrección como método para regular el efecto del pozo en función de la distancia que hay entre su posición y la sección modelada.

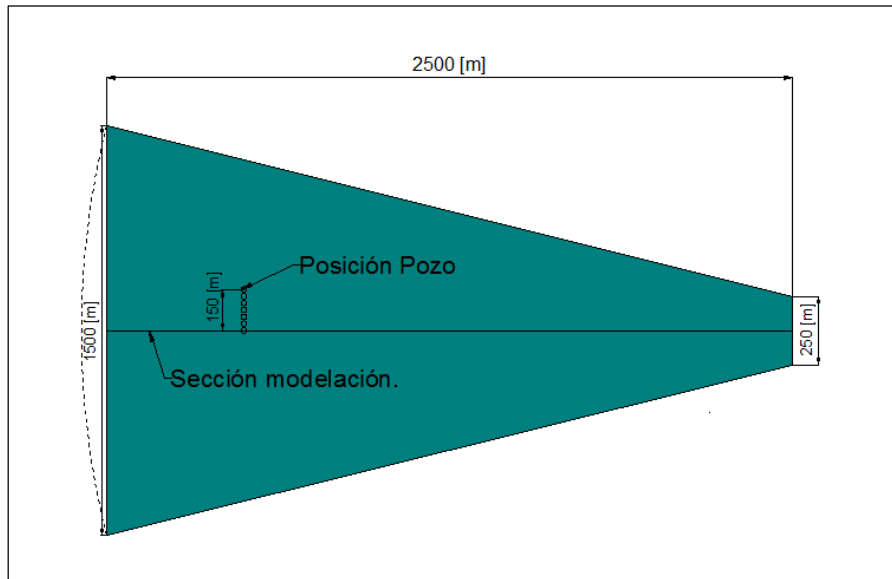
Resulta evidente que debido a que el efecto del pozo en la sección disminuye en la medida que aumenta la distancia a ella, es que los factores de corrección también deben disminuir acorde a representar este menor efecto.

La metodología empleada para encontrar estos nuevos factores de corrección es idéntica a la empleada para los casos del pozo ubicado sobre la sección, con la diferencia en que los datos de referencia de los piezómetros para realizar la calibración provienen de modelos tridimensionales de FEFLOW en donde se aleja la posición del pozo a la sección bidimensional cada 25 metros. Nuevamente se utiliza la conductividad hidráulica equivalente en los modelos bidimensionales, para evitar en lo posible mezclar los efectos de la geometría con el generado por los pozos.

Es importante destacar que los resultados que se presentarán en este apartado requirieron de resolver un gran número de modelos bidimensionales que buscaban los factores de corrección óptimos para cada caso, respondiendo al objetivo de entregar al modelador un valor de referencia de los factores de corrección según la conductividad hidráulica involucrada, posición del pozo de bombeo y distancia a la sección de modelación.

#### 4.2.4.1. Pozo de bombeo out-pit.

Se corrieron modelos tridimensionales con el pozo out-pit ubicado desde 0 a 150 metros de distancia a la sección bidimensional, variando cada 25 metros su posición, según se muestra en la Figura 42.



**Figura 42: Posición de los pozos out-pit fuera de la sección visto en planta.**  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se obtuvieron de los factores de corrección óptimos en función de la distancia a la sección de modelación se presentan en las Tablas 18 y 19 para las dos conductividades hidráulicas estudiadas.

$K=1E-8$ [m/s]	Distancia del pozo out-pit a la sección bidimensional modelada.						
Semestre	0 [m]	25 [m]	50 [m]	75 [m]	100 [m]	125 [m]	150 [m]
1	40 %	40 %	40 %	35 %	30 %	30 %	25 %
2	30 %	25 %	25 %	25 %	20 %	20 %	15 %
3	25 %	25 %	20 %	20 %	20 %	15 %	15 %
4	25 %	20 %	20 %	20 %	20 %	15 %	10 %
ECMP [m]	4.44	4.25	3.96	3.51	2.92	2.54	2.14

**Tabla 18: Factores de corrección según distancia del pozo out-pit para  $K=1E-8$  [m/s].**  
Fuente: Elaboración propia.

$K=1E-9$ [m/s]	Distancia del pozo out-pit a la sección bidimensional modelada.						
Semestre	0 [m]	25 [m]	50 [m]	75 [m]	100 [m]	125 [m]	150 [m]
1	50 %	50 %	45 %	35 %	30 %	25 %	20 %
2	25 %	20 %	20 %	20 %	20 %	15 %	15 %
3	25 %	20 %	20 %	20 %	20 %	15 %	15 %
4	25 %	20 %	20 %	20 %	15 %	15 %	15 %
ECMP [m]	3.55	3.63	3.16	2.63	2.08	1.80	1.35

Tabla 19: Factores de corrección según distancia del pozo out-pit para  $K=1E-9$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

De las tablas se infieren tres observaciones:

- Se confirma que el factor de corrección variable es decreciente en el tiempo.
- El factor de corrección es decreciente para el mismo semestre en la medida que aumenta la distancia entre el pozo de bombeo y la sección bidimensional modelada.
- El ECMP disminuye en lo que aumenta la distancia entre la ubicación del pozo y la sección bidimensional modelada.

#### 4.2.4.2. Pozo de bombeo in-pit.

Al igual que para el caso anterior, el pozo de bombeo in-pit se localizará desde 0 a 150 metros de distancia a la sección bidimensional modelada, variando su posición cada 25 metros, tal como muestra la Figura 48.

Los resultados que se obtuvieron de los factores de corrección óptimos en función de la distancia a la sección de modelación se presentan en las Tablas 20 y 21 para las dos conductividades hidráulicas estudiadas.

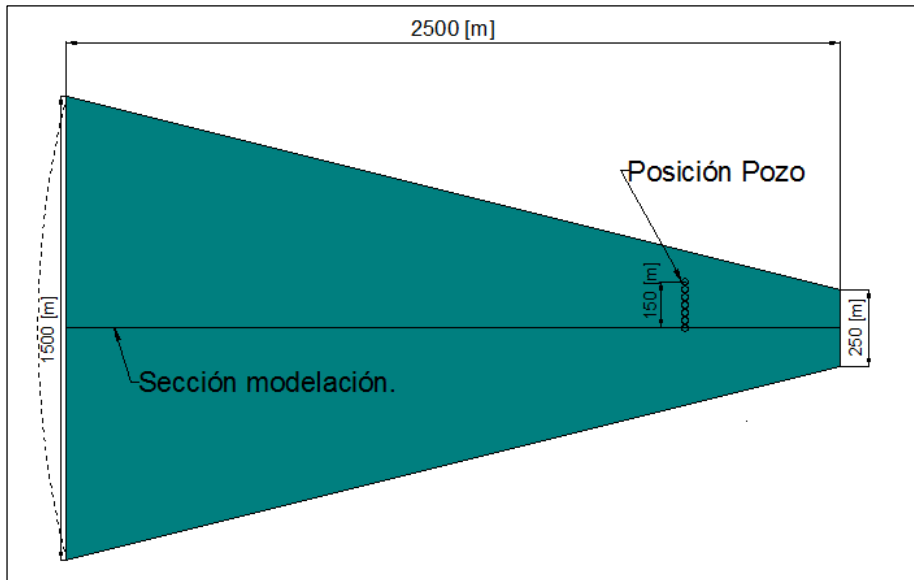


Figura 43: Posición de los pozos in-pit fuera de la sección visto en planta.  
Fuente: Elaboración propia.

$K=1E-8$ [m/s]	Distancia del pozo in-pit a la sección bidimensional modelada.						
Semestre	0 [m]	25 [m]	50 [m]	75 [m]	100 [m]	125 [m]	150 [m]
1	50 %	50 %	45 %	40 %	35 %	35 %	30 %
2	40 %	35 %	30 %	30 %	25 %	25 %	25 %
3	35 %	30 %	30 %	25 %	20 %	20 %	20 %
4	30 %	30 %	25 %	20 %	20 %	15 %	15 %
ECMP [m]	12.40	11.22	8.91	7.06	5.85	5.25	4.78

Tabla 20: Factores de corrección según distancia del pozo in-pit para  $K=1E-8$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.

$K=1E-9$ [m/s]	Distancia del pozo in-pit a la sección bidimensional modelada.						
Semestre	0 [m]	25 [m]	50 [m]	75 [m]	100 [m]	125 [m]	150 [m]
1	55 %	50 %	45 %	35 %	25 %	20 %	15 %
2	35 %	35 %	25 %	25 %	20 %	20 %	15 %
3	30 %	30 %	25 %	20 %	20 %	15 %	15 %
4	30 %	25 %	25 %	20 %	20 %	15 %	15 %
ECMP [m]	16.38	14.94	11.80	9.25	8.24	7.20	6.76

Tabla 21: Factores de corrección según distancia del pozo in-pit para  $K=1E-9$  [m/s].  
Fuente: Elaboración propia.



De los resultados de las tablas se infiere las mismas observaciones que para el caso del pozo out-pit, donde se agrega el hecho ya mencionado en de que hay un alto ECMP cuando se pretende representar un pozo in-pit, por lo que se sugiere mayor estudio de la representación para este caso particular.

## **5. Conclusiones**

A continuación se presentan las conclusiones finales del análisis de los resultados expuestos en el capítulo anterior, las cuales están alineadas a los objetivos generales y específicos propuestos para este trabajo de título.

Las conclusiones expuestas se enmarcan dentro de una visión técnica, pero se han agregado apartados que responden a potenciales beneficios comerciales que se pueden obtener de su aplicación y la futura investigación que se puede realizar utilizando este trabajo de título como base.

### **5.1.1. Conclusiones técnicas.**

El primer paso importante resultó de la comparación utilizando el mismo enfoque bidimensional en ambos softwares utilizados, de donde se puede concluir que existe una congruencia en términos de modelación numérica bidimensional independiente del software utilizado, ya sea SEEP/W v2007 o FEFLOW v6.0.

Además se responde al primer objetivo específico propuesto, donde en base al marco conceptual planteado, se determinaron una serie de parámetros hidrogeológicos, geométricos y temporales que debieron ser implementados de forma particular para cada uno de los softwares, dando consistencia a los resultados.

Para los casos sin pozos, lo más importante fue comprobar que la resolución del drenaje natural inducido era prácticamente idéntico para las distintas conductividades hidráulicas utilizadas, y en la misma línea, la adición de las condiciones de borde que representaban un pozo de bombeo en la sección bidimensional, también lograba una similitud adecuada de las distribuciones de presión de poro comparadas durante todo el periodo de tiempo simulado, utilizando el mismo enfoque bidimensional en Seep/W y FEFLOW.

Con la consistencia como base que se obtuvo entre las comparaciones entre el mismo enfoque bidimensional, es que se presenta de forma implícita la necesidad de resolver uno de los

principales desafíos que plantea la utilización de modelos numéricos tridimensionales, consistente en representar de forma adecuada la pared de un rajo genérico con excavaciones previas de gran magnitud, las que imponen un flujo subterráneo localizado de grandes gradientes hidráulicos involucrados. En particular, la modelación tridimensional en FEFLOW suele estar enfocada a la caracterización de acuíferos a escala distrital o regional, por lo que se requiere adaptar el modelo a un enfoque local con alta discretización vertical y con un flujo no saturado de gran relevancia; características que precisamente corresponde a parte de los beneficios que entrega la modelación bidimensional.

Fue posible realizar que la vista en planta del modelo tridimensional coincidiera con la utilizada en el enfoque bidimensional, pudiendo de esta forma lograr que la grilla sea idéntica, obteniendo una gran refinación vertical, algo sumamente importante para los fines de este trabajo de título.

En los resultados de las comparaciones entre el enfoque bidimensional y el pseudo-3D con ausencia de pozos, nuevamente no se observó gran diferencia en las distribuciones de presiones de poro en el tiempo, lo que permite concluir que el hecho de añadir la tercera dimensión no influye en los resultados si es que flujo subterráneo impuesto por las condiciones de borde presentes sigue manteniendo una orientación netamente bidimensional, paralela a las capas utilizadas en el modelo pseudo-tridimensional. Lo anterior también corrobora que los parámetros hidrogeológicos impuestos en el modelo tridimensional son congruentes a los utilizados en el modelo bidimensional.

En contrapartida, los resultados entre el enfoque bidimensional y pseudo-tridimensional con presencia de pozo de bombeo, reflejan diferencias substanciales en las mediciones de presión de poro para los piezómetros más cercanos a los pozos, indistintamente de la conductividad utilizada y de la posición del pozo, sea out-pit o in-pit. Para los piezómetros más alejados del pozo, las diferencias siguen manteniéndose acotadas a un rango aceptable entre los enfoques. Por lo tanto, en base a lo observado se puede decir que el flujo tridimensional impuesto por las condiciones de borde que representan al pozo de bombeo dentro del modelo pseudo-3D es el causante de las diferencias observadas.

Visto desde otro ángulo, las mismas condiciones de borde que representan al pozo de bombeo imponen una resolución diferente cuando se aplican a un modelo pseudo-tridimensional

a cuando se utilizan en un modelo bidimensional, en donde se produce específicamente una despresurización excesiva al utilizar un enfoque bidimensional en comparación a los resultados obtenidos a través del enfoque pseudo-3D.

Al aplicar la geometría tridimensional que representa un sector de pared del rajo tipo, las comparaciones realizadas con el enfoque bidimensional para los casos sin pozo de bombeo, logran concluir que la geometría radial de la pared influye en los resultados de la distribución de la presión de poro, y que las diferencias del drenaje natural simulado entre los enfoques son mayores en la medida que se utilizan conductividades más permeables.

Uno de los supuestos básicos de la utilización de modelos bidimensionales es que la orientación global de las líneas de flujo hacia el rajo son de componente radial, por lo tanto paralelas a la sección bidimensional a modelar, no obstante, al hacer esto se hace caso omiso que al ser concéntricas se produce un efecto acumulativo de presión de poro, causando diferencias significativas en las cargas hidráulicas simuladas por los distintos enfoques en la medida que se está más cerca de la zona del fondo del rajo.

Entendiendo que el proceso de calibración de los modelos bidimensionales con la piezometría aledaña logra remediar el fenómeno mencionado, es que se realizaron los cálculos de cuáles son las conductividades hidráulicas equivalentes que compensan y disminuyen las diferencias entre enfoques de forma global. Los resultados de estos cálculos mostraron que es necesario utilizar conductividades hidráulicas equivalentes de hasta un orden de magnitud menor, como fue el caso resultante para la conductividad más permeable ( $1 \times 10^{-7}$  [m/s]).

Es necesario aclarar que utilizar conductividades equivalentes menores en los modelos bidimensionales no sólo eleva el nivel freático, de tal forma de asimilar las presiones de poro al drenaje natural observado en el enfoque tridimensional, sino que también disminuye el aporte de caudal que entrega la recarga lateral representada como una carga hidráulica constante.

Al incorporar el pozo de bombeo en el modelo tridimensional centrado sobre la sección bidimensional, nuevamente se corrobora que el efecto de despresurización del pozo sobre el modelo tridimensional difiere bastante con los resultados de la modelación bidimensional, inclusive cuando esta última utiliza conductividad hidráulica equivalente para disminuir el efecto

producido por la geometría. Estas diferencias son significativas tanto para el pozo out-pit como el in-pit, e indistintamente para las dos conductividades hidráulicas seleccionadas.

Es en este punto, donde se utiliza un procedimiento que busca representar el efecto de un pozo de bombeo en la sección bidimensional, y es en base a los resultados obtenidos se sugiere el uso de factores de corrección con un comportamiento variable en el tiempo sobre las condiciones de borde que representan el pozo de bombeo en el modelo numérico bidimensional.

En relación a las magnitudes de los factores de corrección en el tiempo, se observa que se deben utilizar factores más elevados en los primeros escenarios semestrales, los que se van estabilizando para los escenarios siguientes.

#### **5.1.2. Beneficios comerciales.**

El principal beneficio comercial de este trabajo de título corresponde al mejor entendimiento que se tiene de la modelación bidimensional a través de los casos estudiados, ya que resulta importante que en los proyectos que involucran la utilización de modelos numéricos con este enfoque se tengan resultados que no se vean particularmente afectados por el hecho de modelar en forma bidimensional, como también una conceptualización más apropiada entre la realidad y lo reflejado por el modelo numérico, y un buen respaldo de la metodología empleada en la resolución de los modelos.

A modo de ejemplo, cuando las pruebas de conductividad hidráulicas realizadas en terreno entregan un rango de valores para cierta unidad hidrogeológica, es parte del proceso de calibración los modelos numéricos bidimensionales entregar valores de conductividad dentro del rango señalado, pero tal como sugieren las conclusiones de este trabajo en relación al efecto producido por la geometría del rajo sobre las cargas hidráulicas, probablemente las conductividades hidráulicas equivalentes que entrega el modelo numérico sean menores a las observadas en la realidad, abriendo la posibilidad de utilizar valores menores a los entregados por las pruebas de conductividad en terreno.

En la misma línea, una misma unidad hidrogeológica puede tener diferente conductividad hidráulica equivalente según su posición en el talud de la pared del rajo, a modo de compensar el efecto acumulativo de los flujos concéntricos que se genera por la geometría tridimensional del rajo.

Otro beneficio importante se obtiene de las tablas que relacionan el factor de corrección aplicado a los pozos en función de la conductividad hidráulica del macizo rocoso, la posición relativa a la pared del rajo y al tiempo transcurrido desde su entrada en operación. Tablas como estas pueden ser desarrolladas en virtud de obtener un valor de referencia del factor de corrección empleado en la representación de los pozos en los modelos numéricos, de tal forma que estos factores de corrección no se transformen en una variable extra de calibración.

Lo anterior se traduce en la posibilidad de disminuir significativamente de tiempo empleado en el proceso de calibración del modelo numérico, y en lograr diferenciar el efecto real del pozo en la sección bidimensional, y por consiguiente que no interfiera compensando otros efectos en el proceso de calibración empleado, tal como el efecto de la geometría tridimensional.

### **5.1.3. Futura investigación.**

Este trabajo de título entrega la base para poder realizar una serie de otras comparaciones que respondan a entregar una mejor comprensión del modelamiento numérico bidimensional, mejoras en la metodología utilizada y nuevas herramientas que ofrecen las versiones más recientes de los softwares.

Un gran avance sería introducir la representación de fallas geológicas del macizo rocoso, que son conductos preferenciales del agua subterránea, y que según su orientación inducen a un flujo tridimensional dentro del rajo. Lo mismo sucede en el estudio del efecto de la presencia de arcillas o limos en algunas zonas dentro de los límites del rajo estudiado.

En cuanto a continuar con las mejoras de la representación del efecto de los pozos de bombeo, quedan planteadas inquietudes referentes al número de nodos, posición de estos, factores de corrección dependiente de su posición, entre otros. Además, otro avance importante sería estudiar la representación del efecto de los drenes horizontales, que también son ampliamente utilizados como método artificial de drenaje del rajo.

Como último punto, durante el año 2012 tanto Geo-Slope como DHI-WASY han lanzado nuevas versiones de los softwares utilizados en este trabajo de título, SEEP/W v2012 y FEFLOW 6.1, que introducen nuevas herramientas que podrían eventualmente mejorar los modelos bidimensionales y las representaciones de los sistemas de drenaje artificial mencionados.

## 6. Referencias

Beale, G. (2007). Hydrogeological Model. En J. Read, & P. Stacey, *Guidelines for Open Pit Slope Design* (págs. 141 - 199). CSIRO.

De la Fuente, A., & Espinoza, C. (2010). Apuntes curso Modelación Numérica Aplicada a la Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Santiago, Chile: Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

DHI Forum - FEFLOW. (3 de Agosto de 2010). Recuperado el Julio de 2012, de <http://forum.mikebydhi.com/index.php/topic,854.msg2098.html#msg2098>

DHI-WASY. (Diciembre de 2011). Apuntes Curso de Formación FEFLOW v6.0. Lima, Perú: DHI-WASY.

DHI-WASY. (2009). *FEFLOW Reference Manual*. DHI-WASY.

Espinoza, C. (2010). Apuntes curso Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Geo-Slope. (2007). *Tutorial SEEP/W*. GEO-SLOPE.

González, L. (2009). Apuntes de clases Geomecánica. Santiago, Chile: Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Illman, W., & Hughson, D. (2002). Heterogeneous fractured rock properties: implications for unsaturated flow modelling of a high-level nuclear waste repository. *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: A Few Steps Closer to Reality*, págs. 37-44.

Kruseman, G., & De Ridder, N. (1990). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. ILRI Publication 47.

Lorig, L., Stacey, P., & Read, J. (2009). Slope Design Methods. En J. Read, & P. Stacey, *Guidelines for Open Pit Slope Design* (págs. 237 -264). CSIRO.

Martínez, C., & Ugorets, V. (2010). Use of Numerical Groundwater Modelling for Mine Dewatering Assessment. *Water in Mining* (págs. 317-326). Santiago: SRK Consulting S.A., Chile .

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12 , 513-522.

Ortíz, J. (2008). Apuntes de clases Explotación de Minas. Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Chile.

Richards, L. (1931). Capillary Conduction of Liquids Trought Porous Mediums. *Journal Physics*, Vol 1 .

Ritchie, A. (1963). Evaluation of Rockfall and its control. *Highway Research Record 17* , 13-68.

Schlumberger Water Services. (2011). *Memorandum Técnico - Anexo B - Antecedentes Hidrogeología - Minera La Escondida*. Santiago, Chile: Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio del Medio Ambiente.

Seaman, J., Singer, J., & Aburime, S. (2009). Evaluating the Relative Importance of the van Genuchten/Mualem Parameters. *Georgia Water Resources Conference* (págs. 1-6). Georgia: University of Georgia.

SERNAGEOMIN. (2011). *Anuario de la Minería de Chile*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SERNAGEOMIN. (2010). Guía Metodológica de Seguridad para Presentación de Proyectos Mineros a Rajo Abierto. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.

Stacey, P. (2009). Fundamentals of Slope Design. En J. Read, & P. Stacey, *Guidelines of Open Pit Slope Design* (págs. 1 - 14). CSIRO.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.

Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal 44* , 892-898.

Vutukuri, V., & Singh, R. (1995). Mine Inundation - Case Histories. *Mine Water and the Environment* , 107 - 130.

Waterloo Hydrogeologic, Inc. (Agosto de 2007). The Waterloo Training Course Series. *Finite Element Groundwater Modeling* . Lima, Perú: Waterloo Hydrogeologic, Inc.



## 7. Glosario

- Condición Seepage: Es una condición de borde, que impone que en el punto exista una carga hidráulica equivalente a su elevación, disipando toda la carga de presión a través de caudal en el punto. La determinación de ese caudal suele darse a través de un procedimiento iterativo interno en los modelos numéricos.
- Carga Hidráulica: Representa la suma de la carga de presión expresada en metros con la elevación del punto de medición sobre el datum seleccionado.
- Grilla: Consiste a la posición de los nodos que definen los elementos del modelo numérico, y que en su conjunto equivalen a la geometría total del modelo.
- Método de Elementos Finitos: Es una técnica numérica de resolución de ecuaciones diferenciales parciales y su unión en conjunto de los sistemas que conforman el problema. En otras palabras, es una forma de resolver un modelo numérico complejo en pequeños elementos que pueden ser resueltos individualmente a través de relaciones entre ellos.
- Porosidad: Es una medida de vacío presente en un material, que en este caso corresponde al macizo rocoso. Siendo aún más específico, para efectos de este trabajo, el vacío corresponde principalmente a las microfracturas del macizo rocoso interconectadas entre sí.
- Estructura: Para efectos de este trabajo, se define como cualquier tipo de discontinuidad en las características geológicas del macizo rocoso.
- Fractura o falla: Consiste en la separación linear o en un plano del macizo rocoso.
- Nivel freático: Superficie en el macizo rocoso donde la presión de poros equivale a la presión atmosférica.

## **8. Anexos**

### **8.1.1. Anexo I: Condiciones Iniciales.**

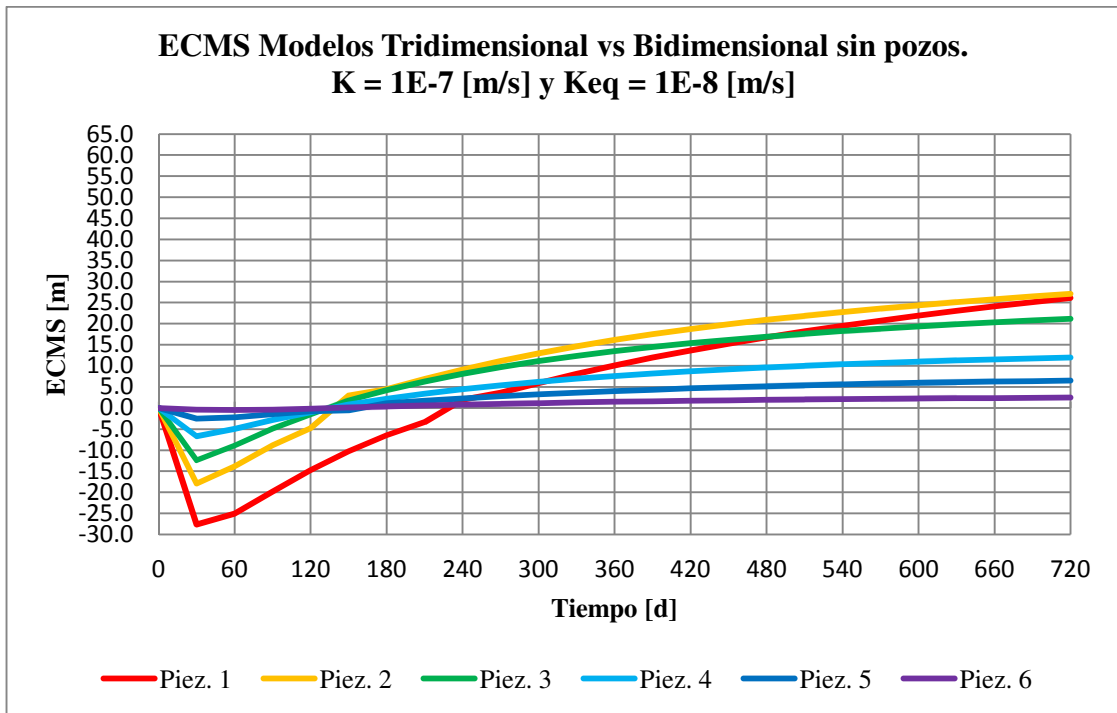
A modo de determinar una distribución inicial de las cargas hidráulicas en los modelos numéricos se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se construyó un modelo numérico en SEEP/W de una etapa previa de excavación del rajo, consistente a 100 metros adicionales por sobre el nivel de excavación actual del modelo.
2. En ese modelo se configuró una condición inicial de nivel freático horizontal, otorgando presión hidroestática en todos los puntos del modelo.
3. Se hizo correr el modelo numérico por dos años, a modo de simular condición de drenaje natural en el modelo.
4. Luego se construye otro modelo numérico bidimensional, con la geometría del rajo bajo la excavación actual y utilizando una grilla idéntica a la utilizar en los distintos casos modelados.
5. Se hizo correr este segundo modelo numérico sólo por cinco días, a modo de producir una despresurización rápida de las presiones sobre la pared del rajo, a modo de evitar las altas presiones de la excavación previa.
6. Se utiliza esta distribución de cargas hidráulicas como condiciones iniciales de los modelos numéricos en este trabajo de título.

Se realiza el mismo procedimiento para cada una de las conductividades hidráulicas estudiadas, siempre con el objetivo de tener una distribución de carga hidráulica inicial adecuada a cada conductividad; acorde a las excavaciones anteriores del rajo; y al evitar cualquier tipo de despresurización instantánea inadecuada en los modelos numéricos.

**8.1.2. Anexo II: Tablas de resultados de ECMS para la conductividad hidráulica equivalente.**

A continuación se presentan las tablas del ECM medido entre el enfoque tridimensional y bidimensional aplicado la conductividad hidráulica equivalente a este último.



**Figura 44: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-7$  [m/s] y  $Keq = 1E-8$  [m/s] respectivamente. Fuente: Elaboración propia.**

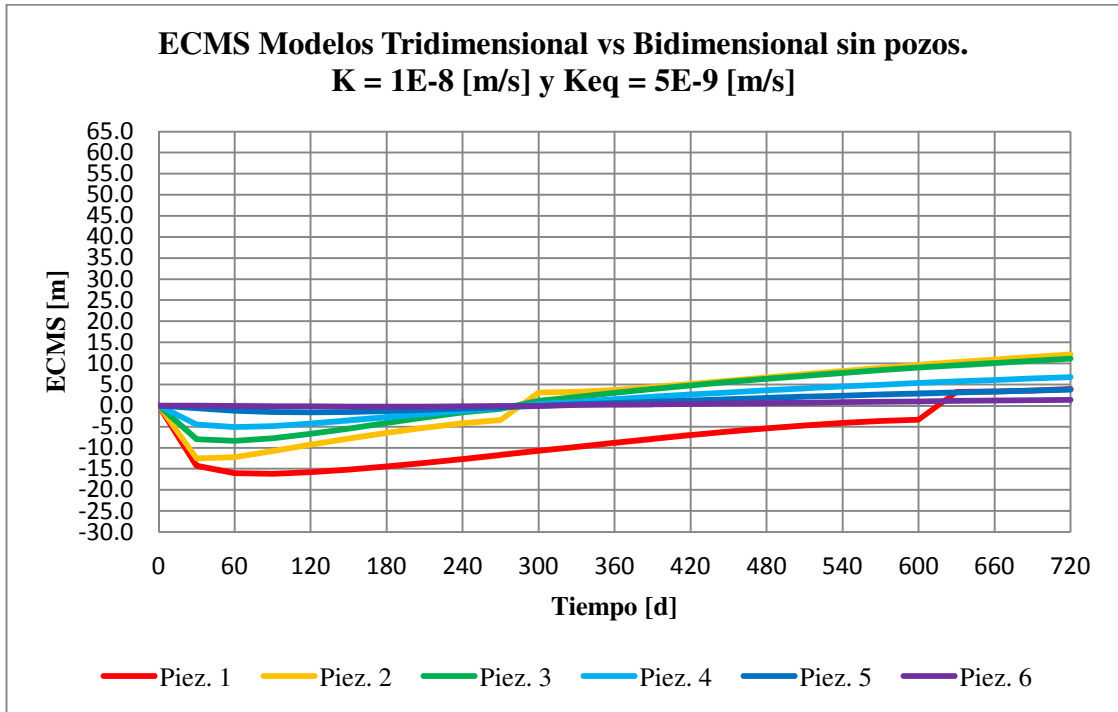


Figura 45: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-8$  [m/s] y  $Keq = 5E-9$  [m/s] respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

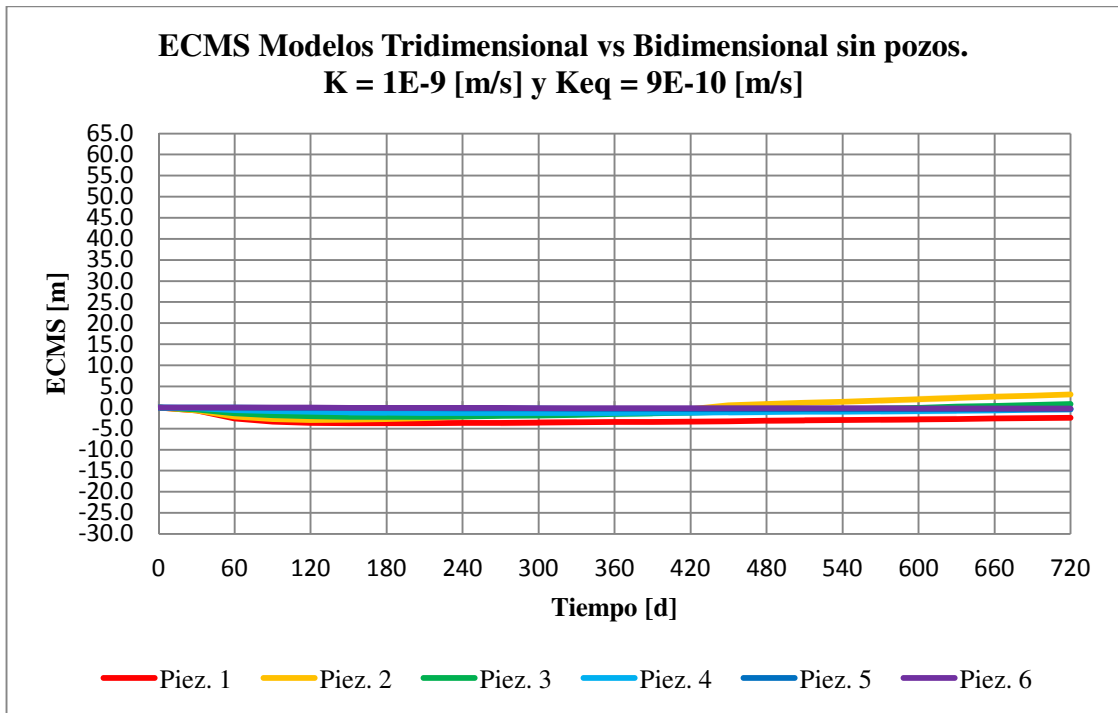


Figura 46: ECMS entre enfoques 3D y 2D sin pozos para  $K=1E-9$  [m/s] y  $Keq = 9E-10$  [m/s] respectivamente. Fuente: Elaboración propia.