



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

MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA PROYECTOS MINEROS DE  
EXTRACCIÓN POR BLOCK CAVING

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JAVIERA REGINA GELCICH DELGADO

PROFESOR GUÍA:  
JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
YARKO NIÑO CAMPOS  
RAÚL CASTRO RUIZ

SANTIAGO DE CHILE  
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: Javiera Regina Gelcich Delgado  
FECHA: diciembre de 2018  
PROF. GUÍA: Javier González Sandoval**

## MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA PARA PROYECTOS MINEROS DE EXTRACCIÓN POR BLOCK CAVING

Ante la necesidad de explotar cuerpos mineralizados ubicados en profundidad, la industria minera ha implementado una serie de métodos masivos para la extracción subterránea. Entre éstos, el Block Caving supone uno de los más utilizados debido a su alta efectividad y bajo costo operacional. Sin embargo, debido a las condiciones que genera el método extractivo en el macizo rocoso, la ocurrencia de *bombeos de barro* al interior de las minas se constituye en un peligro inherente.

Los bombeos de barro consisten en una entrada súbita de una mezcla de material fino y agua al nivel de producción proveniente desde el cuerpo mineralizado superior. Esto tiene como resultado la colmatación de túneles de producción junto a la pérdida de maquinaria e infraestructura, y el consecuente peligro para la vida de los trabajadores al interior de la mina.

Por lo anterior y, en consideración de que el agua es el principal movilizador del material fino en estos sistemas extractivos, resulta de especial interés estudiar uno de los posibles mecanismos de flujo por los cuales se generarían los bombeos de barro. De esta forma, este trabajo de título contempla el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual y numérico para evaluar la hipótesis de que los bombeos se generarían cuando una zona de mayor permeabilidad que se propaga de forma ascendente dentro de otra zona de roca fracturada relativamente impermeable, alcanza un acuífero superior originalmente aislado o bien sujeto a un drenaje gravitacional mínimo.

Mientras el modelo conceptual plantea la hipótesis del mecanismo de generación de los bombeos, el modelo numérico busca evaluar qué combinación de propiedades hidráulicas y geométricas para las diferentes zonas de roca, deben coexistir para propiciar el drenaje súbito del acuífero y alcanzar un caudal representativo de estos eventos; este último fue estimado a partir de las condiciones resultantes en un evento real al interior de una mina.

El modelo numérico se construyó mediante el software COMSOL Multiphysics. Las simulaciones mostraron que, si el mecanismo de generación es el planteado, se requeriría del desarrollo de vías de flujo preferencial en la zona de mayor permeabilidad, cuyas características difieren de las de un medio poroso clásico. Por su parte la zona fracturada original debe ser prácticamente impermeable para evitar su drenaje natural. Las simulaciones también indicaron que, frente al desarrollo de vías de flujo preferencial, la ecuación de Brinkman entrega caudales menores que la Ley de Darcy utilizada fuera de su rango de validez.

## **Agradecimientos**

Agradecer por la importante ayuda en el desarrollo de esta memoria a mis profesores, en especial a mi profesor guía, Javier, por su apoyo, sus conocimientos y su buena disposición a ayudarme y alentarme. En no menor medida mis profesores de comisión, Yarko y Raúl, fueron siempre importantes en la colaboración con aportes significativos, certeros y enriquecedores para mi trabajo. Darles las gracias a los tres por su ayuda y dedicación en todo este proceso.

Manifestar mi agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres por su incondicional apoyo. También agradecer a Ignacio por quererme y confortarme cuando lo necesité.

# Tabla de contenido

<b>CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1    MOTIVACIÓN .....	1
1.2    OBJETIVOS.....	4
1.2.1 <i>General</i> .....	4
1.2.2 <i>Específicos</i> .....	4
1.3    ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 : REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1    EXTRACCIÓN POR BLOCK CAVING.....	6
2.2    ELIPSOIDES DE EXTRACCIÓN Y MOVIMIENTO.....	8
2.3    EVENTOS DE BOMBEO EN BLOCK CAVING.....	10
2.3.1 <i>Antecedentes de bombeos de barro</i> .....	13
2.4    FLUJO HIDRÁULICO EN MEDIOS POROSOS .....	14
2.4.1 <i>Validez de la Ley de Darcy</i> .....	15
2.5    ESTUDIOS PREVIOS .....	17
2.6    COMSOL MULTIPHYSICS .....	18
<b>CAPÍTULO 3 : MODELO CONCEPTUAL.....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 4 : MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>24</b>
4.1    GEOMETRÍA DEL MODELO .....	24
4.2    MALLA .....	25
4.3    CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE .....	26
4.4    VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	27
4.5    CASOS DE ESTUDIO .....	29
<b>CAPÍTULO 5 : RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>48</b>
6.1    CONCLUSIONES.....	48
6.2    TRABAJO FUTURO .....	49
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>

<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>
ANEXO A .....	55
ANEXO B .....	59

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Motivación

A raíz del agotamiento de yacimientos minerales superficiales, Chile se ha visto en la necesidad de explotar yacimientos mineros masivos de menor ley que se encuentran en profundidad. Esto ha significado la implementación de métodos subterráneos de extracción que permitan acceder a este material de forma rentable y competitiva. Dentro de estos métodos, el Block Caving o hundimiento por bloques es uno de los más utilizados en la actualidad debido a su bajo costo operacional y alta tasa de extracción (Castro, Fuenzalida, & Lund, 2014).

El Block Caving corresponde a un método por hundimiento en el cual se busca inducir la falla del macizo rocoso debido al corte o tronadura de éste en su parte inferior. De esta forma, al extraer parte del material tronado desde la base del macizo se crea un vacío que, por acción de la gravedad y la redistribución de esfuerzos internos, promueve el hundimiento y el fracturamiento progresivo de la roca que se encuentra por sobre esta socavación. Esta condición se puede propagar a través del cuerpo mineralizado hasta la superficie conformando un cráter de subsidencia. Posteriormente, el material fracturado es transportado desde el nivel de hundimiento a los puntos de extracción ubicados en un nivel inferior (nivel de producción) mediante zanjas o bateas (Montecino, 2011).

Un aspecto importante a considerar en un entorno propio de una extracción por Block Caving es que la dinámica de las aguas, tanto superficiales como subterráneas, se relaciona estrechamente con las características del método extractivo en sí. Esto debido a la zona de subsidencia que se genera en la superficie y que se va desarrollando tanto en profundidad como en extensión producto de la extracción progresiva de material bajo la superficie (Figura 1.1).

El cráter generado supone una depresión en el terreno, la cual se constituye en una cuenca artificial propiciando la acumulación de aguas superficiales y subterráneas. A su vez, la captación de éstas se va haciendo cada vez mayor a medida que se desarrolla el cono de subsidencia en profundidad y ancho. Un caso real de la situación descrita se muestra en la Figura 1.2.; ésta corresponde a la mina de cobre Palabora ubicada en Sudáfrica, la cual opera mediante Block Caving.

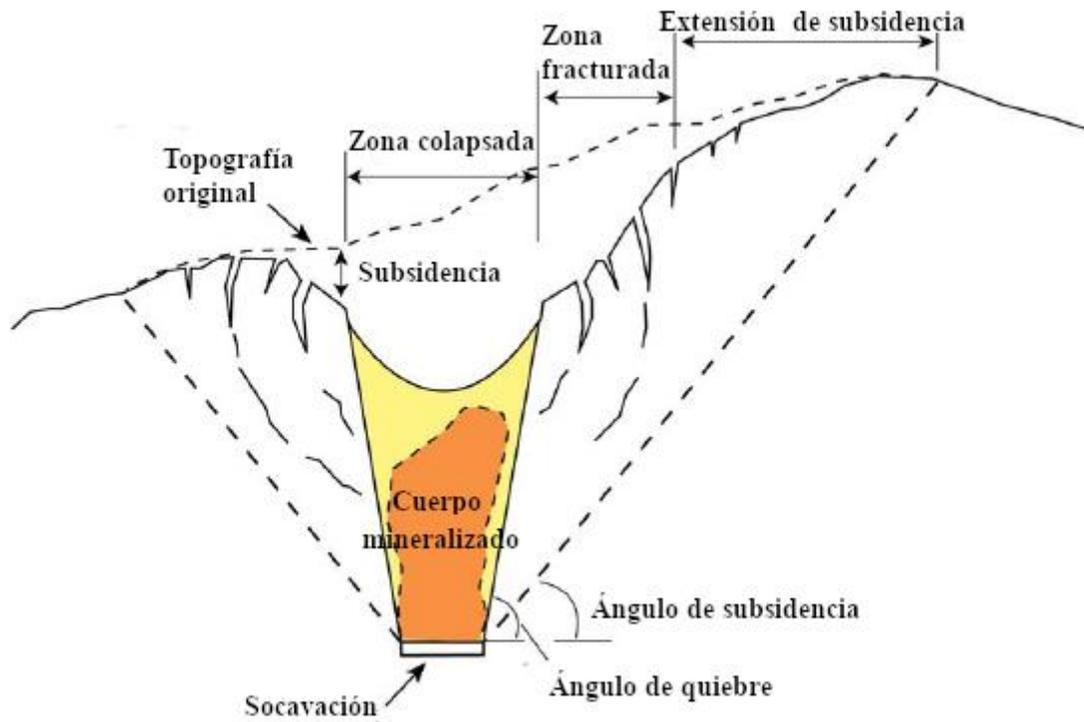


Figura 1.1: Esquema del cono de subsidencia en un sistema de Block Caving. Modificado de Woo, Eberhardt, Elmo & Stead (2013).



Figura 1.2: Efecto de la subsidencia en un talud de la Mina Palabora, Sudáfrica. Ahmed, Eberhardt, & Dunbar (2014).

Las aguas captadas por el cono de subsidencia son de especial interés puesto que, ya sean de origen nival o pluvial, eventualmente infiltran hacia el interior de la mina a través del material quebrado al interior del cono.

El agua que percola a través de la columna de material puede quedar acumulada en bolsones ubicados en el material secundario por sobre el material primario, o en estructuras generadas por extracciones pasadas ya cerradas. Una vez que ingresa el agua a la columna de material quebrado, ésta interactúa con los finos generados producto de la fragmentación progresiva de la roca conformando barro.

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta esta actividad extractiva debido a las condiciones características que genera (aumento de la permeabilidad del medio, generación de material fino y perturbaciones producto de las actividades propias de la faena), corresponde a los escurrimientos y bombeos de barro en los niveles de producción. Específicamente, se puede definir a los escurrimientos de barro como el ingreso de una mezcla de agua y material fino hacia las faenas mineras subterráneas; si este evento es de carácter violento, ocurriendo de manera repentina y movilizándolo un gran volumen de material, se denomina bombeo (Sánchez, 2017). El mecanismo para la ocurrencia de un bombeo de barro en el nivel productivo de la mina no es único, sin embargo, los perjuicios asociados al ingreso súbito de barro son los mismos: peligro en la vida de los trabajadores por quedar atrapados en el flujo de barro, pérdida de infraestructura y maquinaria, cierre de puntos de extracción y pérdida de producción.

Considerando lo anterior y teniendo en cuenta que nuestro país irá desarrollando cada vez más la minería subterránea, es que resulta de especial interés estudiar uno de los posibles mecanismos de flujo por los cuales se generarían los bombeos de barro. De esta forma, se presenta el desarrollo de un modelo conceptual el cual plantea la hipótesis del mecanismo para la ocurrencia de un bombeo de barro y, además, sustenta el modelo numérico que se construirá posteriormente. Mediante el modelo numérico se busca simular distintos casos de estudio donde se varían las propiedades efectivas del sistema, geométricas e hidráulicas, con la finalidad de evaluar cuáles son las condiciones necesarias para alcanzar el caudal estimado para estos eventos en el punto de extracción.

Con este propósito y, dado que no existe certeza de cuáles son las condiciones del flujo en actividades de minería mediante Block Caving, se prefiere trabajar con un software como COMSOL Multiphysics, el cual tiene la capacidad de considerar otra ley descriptiva de la conservación de momentum en medios porosos, además de la Ley de Darcy, como lo es la ecuación de Brinkman. De esta forma se cuenta con dos alternativas para la resolución del problema de flujo hidráulico: la Ley de Darcy en el caso de que el flujo quede descrito tan solo por gradientes de presión y los efectos inerciales puedan ser ignorados, y la ecuación de Brinkman en el caso de que pueda existir un intercambio de momentum en el flujo producto de esfuerzos inerciales. En primera instancia, se opta por modelar el problema recurriendo a la Ley de Darcy, evaluando si los resultados obtenidos se corresponden con el rango de validez de esta ley. Según la aplicabilidad de

los resultados, se implementarán las simulaciones utilizando la ecuación de Brinkman como modelo de flujo con el propósito de verificar lo obtenido.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

El objetivo del trabajo de título es desarrollar una modelación de tipo hidrogeológica que integre el problema de flujo hidráulico a un caso representativo de una faena de explotación minera por Block Caving. De esta manera, se busca evaluar hidrogeológicamente un posible mecanismo de generación para la ocurrencia de un bombeo de barro.

### **1.2.2 Específicos**

Los objetivos específicos de este estudio pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

1. Desarrollar un modelo conceptual descriptivo del mecanismo de generación de bombeos que se plantea como hipótesis.
2. Estimar caudales máximos de referencia para bombeos de barro a partir de antecedentes disponibles de eventos reales.
3. Implementar un modelo en COMSOL Multiphysics capaz de representar el problema de estudio definido como modelo conceptual.
4. Realizar simulaciones con distintas condiciones geométricas e hidráulicas, para identificar la combinación de parámetros que permita considerar que el mecanismo de generación planteado es factible.

## **1.3 Organización del documento**

A continuación se indican los principales contenidos abordados en cada capítulo del trabajo:

En el Capítulo 2, “Revisión bibliográfica”, se presenta la recopilación de información existente en la literatura atinente a los siguientes temas: descripción del método de Block Caving para la extracción de mineral, flujo granular enfocado en la descripción de los conceptos de elipse de extracción y movimiento, flujo hidráulico en medios porosos, descripción de los eventos de bombeo en minas subterráneas y, por último, se presentan los antecedentes de trabajos previos referentes a los eventos de bombeo en minería subterránea junto con una descripción del programa a utilizar para la modelación, COMSOL Multiphysics.

En el Capítulo 3, se desarrolla el modelo conceptual del problema representando el mecanismo de generación planteado como hipótesis para los bombeos de barro, el cual se tendrá como referencia para la construcción del modelo numérico.

En el Capítulo 4, “Modelo numérico”, se describen las características del modelo numérico y cada uno de los elementos que lo componen. También se mencionan los distintos casos de estudio a simular y comparar.

En el Capítulo 5, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los casos estudiados. Se analizan los valores de caudales máximos resultantes, comparando entre las distintas configuraciones simuladas y el antecedente de referencia presentado en el Capítulo 2.

Por último, en el Capítulo 6, “Conclusiones y trabajo futuro”, se exponen las conclusiones inferidas a partir de los resultados obtenidos referentes al comportamiento del sistema para los distintos casos de estudio, los caudales máximos alcanzados y las ecuaciones de flujo hidráulico utilizadas. También se comenta respecto a recomendaciones de trabajo futuro que se pueden desarrollar a partir de lo exhibido en la presente memoria.

# Capítulo 2: Revisión bibliográfica

En esta sección se presenta la recopilación de información presente en la literatura para los temas correspondientes a explotación por Block Caving, flujo granular gravitacional, eventos de bombeo en faenas mineras subterráneas y modelos de flujo de agua en medios porosos. También se presenta un estudio previo de modelación numérica aplicada a eventos de bombeo y una breve descripción del software utilizado.

## 2.1 Extracción por Block Caving

La extracción por Block Caving se ha convertido en una de las técnicas más efectivas en lo referido a minería subterránea. La alta demanda de minerales junto con los bajos costos de producción y la alta eficiencia, han devenido en un liderazgo de este método extractivo (Vyazmensky, Elmo, & Stead, 2010). Por otro lado, según señala Castro et al. (2014), debido al agotamiento de yacimientos superficiales, los métodos subterráneos de extracción han jugado un rol preponderante en las extracciones mineras. Prueba de esto son los proyectos “Nuevo Nivel Mina El Teniente” y el “Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea” (PMCHS) de Codelco.

Según menciona Vyazmensky et al. (2010), en una típica mina de Block Caving es posible reconocer dos niveles de faenas: un nivel de hundimiento y un nivel de producción. El proceso extractivo en una mina de Block Caving se inicia mediante la socavación basal del cuerpo mineralizado a explotar. La redistribución de esfuerzos combinada con la fuerza de gravedad propicia el fracturamiento progresivo y el hundimiento del material mineral en el espacio socavado. El nivel de hundimiento está conectado mediante bateas a los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción (Figura 2.1). De esta forma, el material quebrado cae hasta los puntos de extracción donde es recolectado y transportado para un proceso posterior. A medida que el mineral fracturado es removido de los puntos de extracción, el mineral superior continúa fragmentándose y hundiéndose producto de la gravedad. El fracturamiento se propaga de forma progresiva y ascendente a medida que el mineral es extraído, causando una depresión superficial o subsidencia a nivel superficial del punto de hundimiento y en áreas adyacentes.

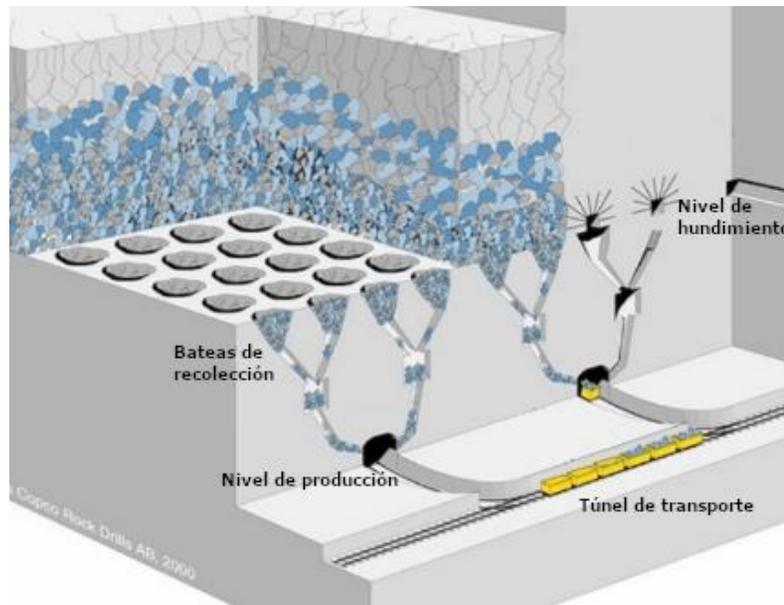


Figura 2.1: Esquema de Block Caving. Modificado de Rashidi-Nejad, Suorineni & Asi (2014).

Durante el proceso de fracturamiento, se pueden identificar tres tipos de fragmentación en el macizo rocoso: fragmentación in-situ, cuyo origen dice relación con la formación y las características geológicas del macizo previo al proceso de minado; fragmentación primaria, generada a partir de los fragmentos de roca que se desprenden del macizo rocoso producto de la socavación; fragmentación secundaria, producida por la interacción entre los bloques de roca que se desplazan a través de la columna fracturada hasta el punto de extracción. “En general, la precisión de las predicciones de fragmentación (in-situ, primaria y secundaria) depende en gran medida de las predicciones de los sets de discontinuidades (orientación, tamaño, espaciamiento, condición y término)” (Montecino, 2011).

El fenómeno de flujo granular empezó a ser estudiado a raíz de la implementación del Block Caving como método extractivo en Estados Unidos. Históricamente la mayoría de los estudios al respecto se han realizado a partir del estudio de modelos físicos donde se ha experimentado con arena, grava o roca fragmentada. Además, se ha estudiado a escala mina utilizando distintos tipos de marcadores. Conjuntamente con los estudios de campo y experimentos en laboratorio, se ha incursionado en modelos matemáticos basados, por lo general, en métodos estocásticos o en análisis de esfuerzos considerando la plasticidad del material como enfoque de estudio del flujo granular (Brown, 2002).

En la literatura se pueden encontrar varios trabajos experimentales estudiando el comportamiento de flujo gravitacional, como por ejemplo lo presentado por Castro et al., (2014), Kvapil, (1965), Laubscher, (2000), Melo, Vivanco, Fuentes, & Apablaza, (2008), Trueman, Castro, & Halim, (2007). Entre los modelos matemáticos, se pueden destacar distintas aproximaciones para predecir el campo de velocidades de materiales granulares. Tal como menciona Melo et al. (2008), una de las corrientes está basada en la teoría de la plasticidad donde la distribución de velocidades es estimada a partir de la distribución de esfuerzos calculados en el material estático, sin embargo,

pocos avances se han hecho en esta línea investigativa. Por otro lado, se han propuesto otros enfoques para el modelamiento del flujo granular como, por ejemplo, la consideración de una difusión ascendente de vacíos en la columna de material o la idea de la probabilidad del movimiento del material granular como un proceso aleatorio. Ambos enfoques resultan en que la velocidad difunde ascendentemente desde el punto de hundimiento. En su trabajo, Nedderman & Tüzün (1979) plantean el modelo cinemático para predecir el campo de velocidades en una columna de material granular que fluye. Para este fin se considera como premisa que, al producirse el flujo, las partículas en niveles superiores llenan los espacios vacíos generados por partículas que se han desplazado desde niveles inferiores empujándose unas a otras. De esta manera, la componente horizontal de la velocidad es función del gradiente de la velocidad vertical de la partícula y se relacionan mediante la denominada “constante cinemática”. Esta relación acoplada con la ecuación de continuidad para un material incompresible, resultan en una ecuación de difusión para la componente vertical de la velocidad.

## **2.2 Elipsoides de extracción y movimiento**

En lo que respecta a flujo granular gravitacional, se pueden definir dos zonas definidas por elipsoides que describen la geometría del medio granular producto de la descarga de material a través de un punto de extracción. Estas corresponden a la “zona aislada de extracción” (IEZ por su sigla en inglés) y a la “zona aislada de movimiento” (IMZ) (Figura 2.2). La primera de ellas corresponde a la superficie definida por el material que se ha efectivamente extraído en la operación de descarga, mientras que la segunda zona corresponde al elipsoide determinado por el material que se ha desplazado o soltado desde su posición original pero que no ha alcanzado el punto de extracción. El material fuera de este límite permanece in situ.

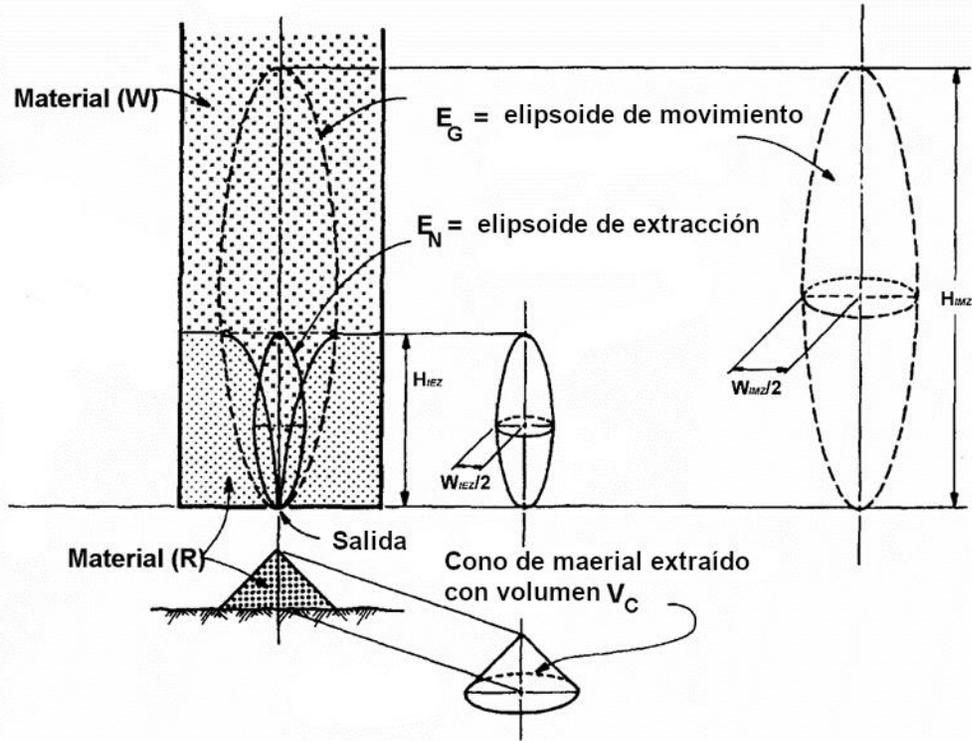


Figura 2.2: Esquema de elipsoides de extracción y movimiento. Modificado de Brown (2002).

Melo, Vivanco & Fuentes (2009) pudieron establecer, mediante la consideración del efecto de la dilatación del material debido a la fractura en el modelo cinemático, un coeficiente que vinculara ambos elipsoides. De esta forma, las elipses de la zona de extracción (IEZ) y de la zona de movimiento (IMZ) para un modelo en dos dimensiones, quedan descritas por las siguientes ecuaciones:

$$H_{IEZ} = \left[ \frac{3S}{4\sqrt{\pi D_p}} \right]^{2/3} \quad (2.1)$$

$$W_{IEZ} = 2 \left( \frac{6D_p}{e} \right)^{1/2} \left[ \frac{3S}{4\sqrt{\pi D_p}} \right]^{1/3} \quad (2.2)$$

$$H_{IMZ} = \left( \frac{\rho}{\Delta\rho} \right)^{2/3} \left[ \frac{3S}{4\sqrt{\pi D_p}} \right]^{2/3} \quad (2.3)$$

$$W_{IMZ} = 2 \left( \frac{\rho}{\Delta\rho} \right)^{1/3} \left( \frac{6D_p}{e} \right)^{1/2} \left[ \frac{3S}{4\sqrt{\pi D_p}} \right]^{1/3} \quad (2.4)$$

donde  $H$  y  $W$  corresponden a la altura y ancho de la elipse respectivamente,  $S$ : superficie extraída,  $\rho$ : la densidad en condición estacionaria,  $\Delta\rho$ : cambio de densidad desde la condición inicial a la condición estacionaria,  $D_p$ : diámetro medio de las partículas extraídas.

## 2.3 Eventos de bombeo en Block Caving

Los bombeos de barro impactan directamente en la seguridad de la faena minera. Estos consisten en entradas repentinas de barro en puntos de extracción y otros sectores de la mina. La velocidad de ingreso del flujo suele ser de una magnitud tal que es poco probable que el personal alcance a escapar o refugiarse, además de causar significativas pérdidas en la infraestructura de la mina. Sin embargo, si bien los eventos de bombeo son considerados como un problema serio dentro del ámbito minero, es poca la literatura existente al respecto (Butcher, Joughin, & Stacey, 2000)

“Los escurrimientos de barro son peligrosos eventos que han ocurrido con frecuencia en minas de Sudáfrica, y han sido la causa de numerosas muertes en el pasado.” (Butcher, Stacey, & Joughin, 2005). Por otro lado, en Chile, se tiene el antecedente de la operación minera Diablo Regimiento, división El Teniente de Codelco, donde en el año 2007 un escurrimiento derivó en una situación fatal.

Según Butcher et al. (2005), se deben presentar cuatro factores de forma simultánea para la ocurrencia de un bombeo de barro: presencia de potenciales materiales formadores de barro, existencia de puntos de extracción por los cuales el barro pueda entrar a la faena minera, presencia de agua y, por último, una perturbación a causa de una extracción u otra actividad minera. Estos últimos dos factores son considerados precursores para la ocurrencia de un evento de bombeo puesto que, una perturbación crea las condiciones necesarias para propiciar la descarga libre de barro, mientras que el agua actúa como la fuerza movilizadora para el movimiento del barro.

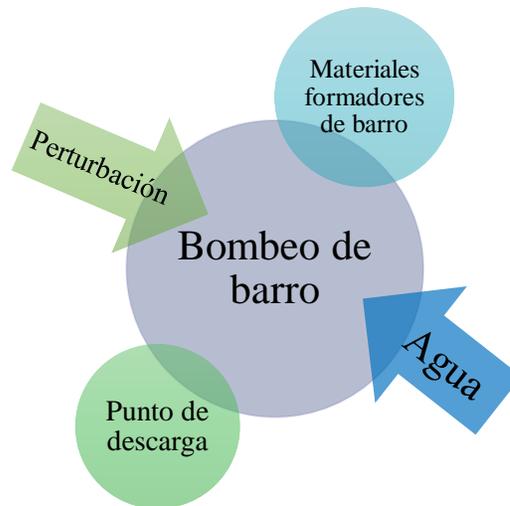


Figura 2.3: Factores requeridos para un evento de bombeo.

A partir de lo descrito por Butcher et al. (2005), se desprende que la mayoría de las minas que sufrieron problemas asociados a eventos de escurrimiento de barro en Sudáfrica, lograron mitigarlo mediante el control de ingreso de agua hacia el interior de la mina y la extracción de ésta mediante túneles de drenaje. De esta manera, se tiene como evidencia que el agua juega un rol significativo tanto en la formación de lodo, como en gatillar la ocurrencia de estos eventos en faenas mineras subterráneas.

Existen varios mecanismos para la ocurrencia de un bombeo de barro al interior de una mina. Butcher et al. (2000) clasifican estos eventos en externos o internos. En el primero de ellos, el barro se produce fuera del ambiente subterráneo, por ejemplo, debido a la deposición de relaves o material de relleno. Por otro lado, los mecanismos internos suponen formación del lodo al interior de la mina a partir de la conminución del mineral y de los finos que se producen como resultado del proceso extractivo.

Los bombeos externos se producen a partir de tres causas principales: flujo de relaves y finos producto de la ruptura de algún muro de contención; falla de rellenos excavados producto de la colocación de material de mala utilidad; y, en el caso de que la actividad subterránea haya sido precedida por una extracción superficial, la falla asociada a los taludes de la fosa. En todos los casos el material entra a las faenas subterráneas a través de piques, excavaciones o fisuras.

Dentro de los bombeos internos, se distinguen dos mecanismos: el primero de ellos es considerado como primordial, y ocurre cuando se tiene una depresión en superficie sobre la actividad extractiva subterránea (ya sea por una mina superficial predecesora o un cráter de subducción). Producto de la erosión se acumula material fino en el fondo de la depresión o excavación, llenando los espacios vacíos que puedan existir entre los fragmentos de roca más grande. Una vez que el agua percola a través del terreno, se mezcla con el material fino generando bolsones de barro los cuales, si la actividad subterránea es lo suficientemente intensiva, terminan siendo alcanzados por la columna de extracción ingresando al nivel de producción. Un esquema

explicativo se observa en la Figura 2.4. El mecanismo secundario, corresponde a una compactación rápida de la pila de material quebrado al interior de la columna de extracción. Este supone la formación de un arco al interior de la columna de extracción y la generación de un vacío bajo este a medida que se extrae material. El arco eventualmente colapsa compactando el material inferior al interior de la columna. A medida que se compacta la columna, los bolsones de barro son impulsados a través del punto de extracción. Un esquema de este mecanismo se muestra en la Figura 2.5.

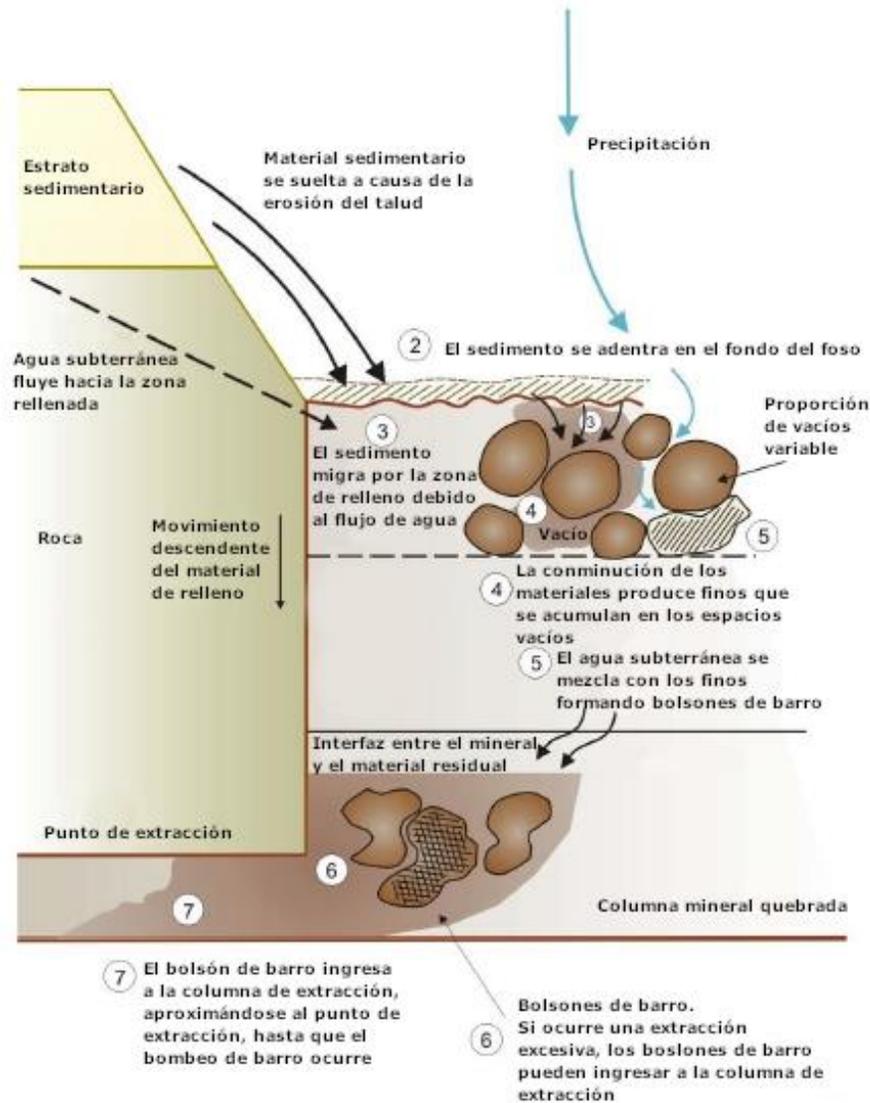


Figura 2.4: Mecanismo primario para la ocurrencia de un bombeo interno. Modificado de Butcher et al. (2000).

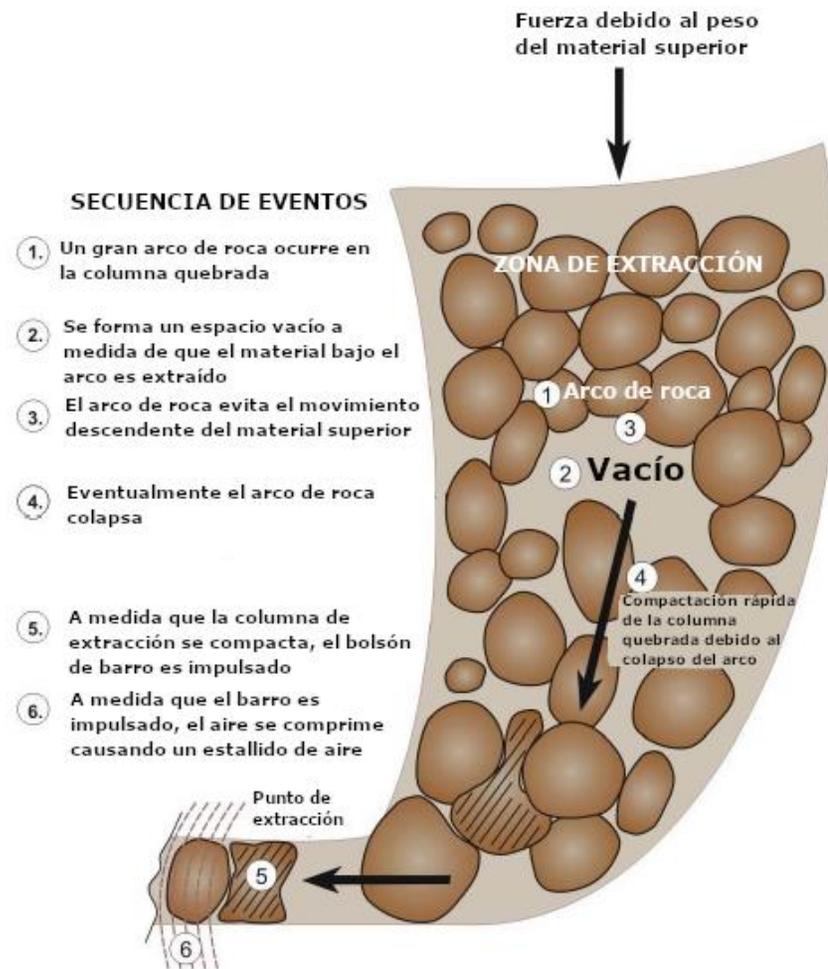


Figura 2.5: Descarga de barro producto de la compactación de la columna fragmentada. Modificado de Butcher et al. (2000).

### 2.3.1 Antecedentes de bombeos de barro

Se cuenta con un antecedente de bombeo de barro, correspondiente a las condiciones resultantes de un evento ocurrido en una mina subterránea nacional. Se conoce que un tramo de túnel de 100 m de longitud y 4x4 m<sup>2</sup> de sección transversal, se vio afectado por el barro. El barro alcanzó una altura de llenado máxima de 4 m, colmatando el túnel de producción en un tercio del tramo afectado. Se estima que el evento ocurrió en 3 minutos aproximadamente.

Si bien el evento descrito fue un caso violento en donde el barro llenó el tramo de túnel en un par de minutos, se tiene conocimiento de escurrimientos de barro que tardan varios minutos, e incluso horas, en llenar las galerías con el barro.

Mayores detalles del evento están restringidos por motivos de confidencialidad. Sin perjuicio de lo anterior, con los antecedentes descritos, se estimará el valor del caudal que se tendrá como referencia para los casos que se estudiarán en la presente memoria.

## 2.4 Flujo hidráulico en medios porosos

Existen dos posibilidades para describir el flujo de agua a través de un medio poroso. “La primera posibilidad es considerar las ecuaciones a un nivel micro (nivel de poros), lo cual se denomina modelo microscópico. La segunda posibilidad consiste en sustituir el medio heterogéneo por un medio homogéneo imaginario y considerar las ecuaciones macroscópicas, siendo este el modelo macroscópico” (Laptev, 2003). De esta forma, según el modelo microscópico, el medio poroso se puede modelar como los espacios saturados interconectados dentro de los cuales el flujo puede ser descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes, y donde se asumen condiciones de no deslizamiento en los bordes de la matriz sólida. Si bien a nivel local el modelo describe de forma precisa el problema físico, es poco usado en la práctica puesto que requiere saber la geometría interna del medio poroso la que suele ser incierta o compleja de conocer en la totalidad del dominio de estudio (Laptev, 2003; Marušić-Paloka, Pažanin, & Marušić, 2012). Cuando el problema de estudio supone una escala donde el dominio abarca gran cantidad de poros, se suele adoptar el enfoque macroscópico donde la heterogeneidad del medio es incluida en parámetros efectivos, y donde las mediciones promedio en el espacio del dominio son útiles para la simplificación de la descripción del flujo (Nield & Bejan, 2006).

Según menciona Laptev (2003), se pueden dar casos en los que dentro del medio poroso saturado exista una región que se encuentre únicamente ocupada por agua, caracterizada por un flujo libre, y cuyo tamaño es significativo en comparación al del resto del medio. Así también lo describe Popov et al. (2009) en su estudio en reservorios de rocas carbonatadas, en donde los vacíos y cavidades en la roca pueden afectar significativamente (órdenes de magnitud) la permeabilidad efectiva del medio, jugando un rol preponderante en el comportamiento de flujo en el reservorio estudiado.

Según Soullaine (2015), se puede distinguir entre dos enfoques para el estudio de flujo de agua en un medio poroso fracturado (donde existen efectos inerciales necesarios de considerar en el potencial hidráulico). El primero consiste en abarcar el problema aplicando las ecuaciones de Darcy y Stokes. De esta forma, la ecuación de Stokes describe la zona de flujo libre al interior de las fracturas donde es necesario considerar efectos inerciales, mientras que la Ley de Darcy se utiliza para modelar el flujo a través del medio poroso. Para la aplicación, se hace necesario establecer condiciones de borde en la interfaz consistentes principalmente en la conservación de masa y momentum, con el propósito de acoplar ambos medios (Beavers & Joseph, 1967; Laptev, 2003; Popov et al., 2009).

Por otro lado, el segundo enfoque para enfrentar el problema consiste en utilizar una sola ecuación (ecuación de Brinkman) que aplique a todo el dominio, sea este medio poroso o flujo libre en fracturas. En este caso se estarían obviando condiciones específicas en las interfases, ya que la diferenciación se genera a partir de la variación espacial de las propiedades del medio (conductividad y porosidad).

En este ámbito, distintos autores (Durlafsky & Brady, 1987; Popov et al., 2009; Shi & Wang, 2007) han reconocido complicaciones en la aplicación del enfoque Darcy-Stokes a medios porosos fracturados debido principalmente a las siguientes razones: en primer lugar, se requiere tener en conocimiento la geometría del medio poroso (escala fina) y de las interfases entre medio poroso y flujo libre. En segundo lugar, es necesario conocer los valores de los parámetros relacionados con las condiciones de borde en las interfases, sean éstos obtenidos numérica o experimentalmente. Por último, para la aplicación de las ecuaciones se requiere que la región de flujo libre consistente en las cavidades y/o fracturas inmersas en el medio poroso esté libre de material fino en su interior que pueda ser considerado como obstáculo para el flujo o sponga material en suspensión en movimiento con el fluido.

Tal como se mencionó anteriormente, es posible utilizar como alternativa la ecuación de Brinkman (ecuación V) la cual consiste en un modelo en el cual no se requiere precisar la geometría del medio, y permite estudiar tanto regiones de flujo dominados por Darcy como flujos descritos por Navier-Stokes, según sea la definición de los parámetros (Popov et al., 2009). En conformidad con lo señalado por Nield & Bejan (2006), diversos autores han encontrado conveniente la implementación de la ecuación de Brinkman cuando se requiere estudiar flujos bajo distintas condiciones, puesto que puede derivar en la ecuación de Navier Stokes o en la ecuación de Darcy al variar algunos de sus parámetros como, por ejemplo, haciendo tender la permeabilidad  $K$  a infinito o a cero respectivamente.

$$\Delta p = -\mu k^{-1} \mathbf{u} + \tilde{\mu} \Delta \mathbf{u} \quad (2.5)$$

Arriba se muestra la ecuación de Brinkman, donde  $\mathbf{u}$  corresponde a la velocidad,  $k$  es la permeabilidad intrínseca,  $\Delta p$  es el gradiente de presión,  $\mu$  corresponde a la viscosidad dinámica del fluido y  $\tilde{\mu}$  es una viscosidad efectiva. El primer término del lado derecho corresponde a la Ley de Darcy, mientras que el segundo término es análogo al laplaciano en la ecuación de Navier Stokes, lo cual permite adicionar una condición de no deslizamiento alrededor de las partículas de suelo al resolver el flujo hidráulico. Por otro lado, la relación  $\tilde{\mu}/\mu$  depende de la geometría del medio y puede estimarse como  $\frac{\tilde{\mu}}{\mu} = \frac{1}{\varepsilon}$ , siendo  $\varepsilon$  la porosidad del medio (Nield & Bejan, 2006).

### 2.4.1 Validez de la Ley de Darcy

Empíricamente se ha demostrado que a medida de que la descarga específica aumenta, la Ley de Darcy, la cual establece una correlación lineal entre la descarga específica ( $q$ ) y el gradiente hidráulico ( $J$ ), deja de ser válida (Bear, 1972).

Para evaluar posibles límites de aplicabilidad de la Ley de Darcy, se define, análogamente al flujo a través de tuberías, el número de Reynolds (Bear, 1972). Este es un número adimensional que refleja la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en un flujo, y es usado como criterio para distinguir entre un flujo de carácter laminar y un flujo turbulento. El número de Reynolds para medios porosos puede definirse como:

$$Re = \frac{qd}{\nu} \quad (2.6)$$

En la fórmula anterior,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $d$  es un largo característico de la matriz porosa; en estricto rigor, debiese corresponder a un ancho característico de los canales de flujo del medio poroso aunque, usualmente, se utiliza una dimensión representativa del tamaño de los granos por ser más fácil de estimar (Bear & Cheng, 2010).

Análogamente al caso de flujos en tuberías, para analizar la pérdida de carga y la descarga específica de un flujo a través de una matriz porosa, es posible estudiar la relación entre un factor de fricción y el número de Reynold. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 2.6. El factor de fricción corresponde al definido por Fanning:

$$f = \frac{1}{2} dJ \frac{g}{q^2} \quad (2.7)$$

donde  $d$  es el largo característico de la matriz,  $J$  es la pérdida de carga por unidad de longitud y  $q$  corresponde a la descarga específica.

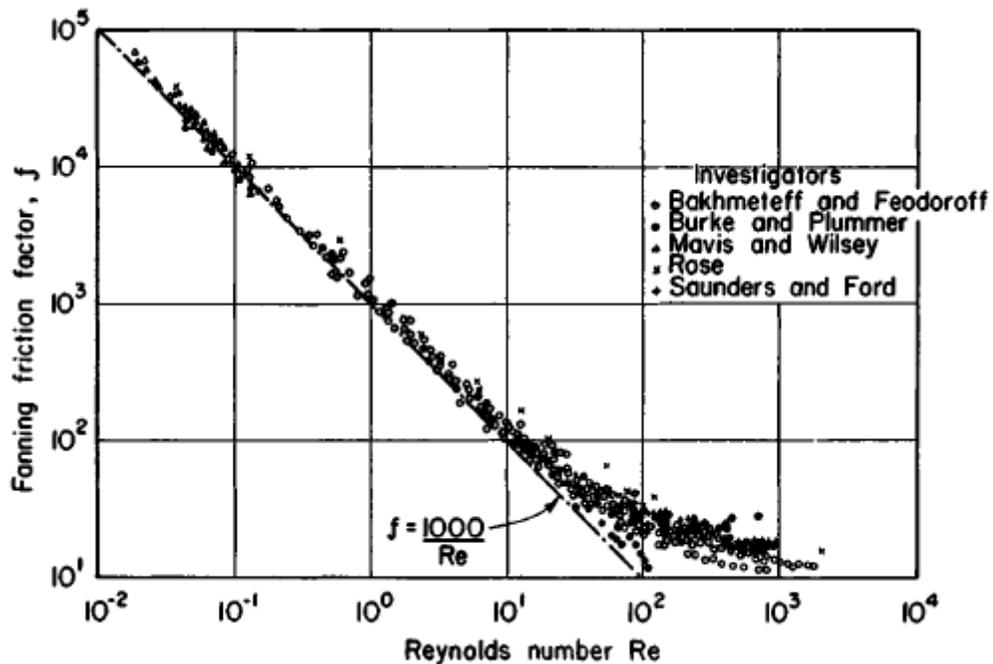


Figura 2.6: Resultados experimentales de la relación entre el factor de fricción de Fanning y número de Reynolds (Bear, 1972).

Se observa que en la primera porción del gráfico existe una relación lineal entre el factor de fricción y el número de Reynolds. A medida que el número de Reynolds aumenta, los resultados empíricos empiezan a desviarse de la proyección lineal. Sin embargo, no se debe considerar necesariamente esta desviación como el punto de inflexión desde un régimen laminar a uno turbulento.

En base a lo anterior, Bear (1972) sostiene que, para bajos números de Reynolds, se tiene una región de flujo laminar, donde las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas inerciales y la Ley de Darcy es válida. Se estima un rango hasta  $Re=10$ .

## 2.5 Estudios previos

Los trabajos referidos al estudio del transporte de agua subterránea en un contexto de minería mediante Block Caving son bastante escasos. Dentro de estos, el estudio realizado por Sánchez (2017) es el único que ha tratado el problema desde un punto de vista determinístico.

Sánchez (2017) simuló mediante un modelo 2D los campos de velocidades del flujo de agua producidos a través de medios granulares ante la existencia de un *caving* que se va propagando. Para esto analizó el problema bajo distintas condiciones como, por ejemplo, distintas secuencias de extracción minera y diferentes valores para el efecto de la dilatación local del material granular. La modelación se realizó tanto para un punto de extracción aislado, como para varios puntos de extracción (5 en total ubicados a diferentes alturas) ante distintas estrategias de extracción: tiraje uniforme, Panel Caving y tipo domo (Figura 2.7).

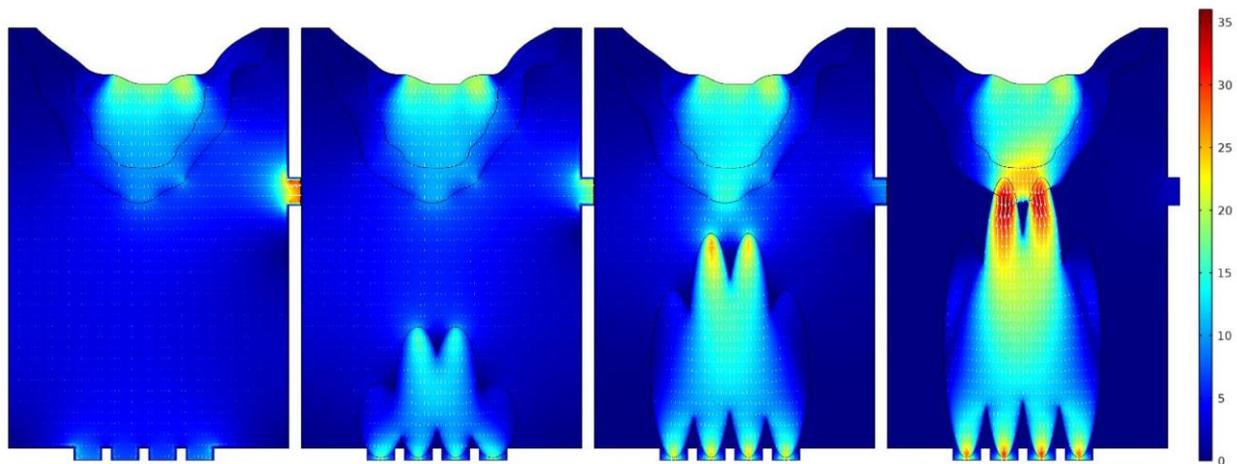


Figura 2.7: Evolución de la velocidad del agua (m/s) en una extracción tipo domo (Sánchez, 2017).

Dentro de los resultados obtenidos, se logró corroborar que la altura a la cual se encuentra un punto de extracción respecto a los otros incide directamente en el transporte de agua, pudiendo retardar o acelerar el ingreso de agua a los otros puntos de extracción a medida que evoluciona la propagación del Caving y la columna fragmentada interseca con el punto de extracción superior. Por otro lado, se constató el hecho de que zonas en donde el material fragmentado logra una mayor porosidad, logran redireccionar el agua producto de la menor resistencia que imponen al flujo de ésta. En cuanto a la forma de extracción se observó que las mayores velocidades se obtuvieron en aquellos puntos en los cuales la columna fragmentada presentaba una mayor altura.

En términos generales, se concluyó que la velocidad registrada en el punto de extracción está relacionada directamente con la velocidad inicial del fluido impuesta, el tamaño del material obtenido en el nivel de producción, el volumen extraído, la separación entre los puntos y la estrategia con la cual se desarrolla la extracción mediante el Caving.

## 2.6 COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics corresponde a una plataforma multi propósito para la modelación aplicada a problemas de ingeniería. El paquete computacional permite la resolución y análisis mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) para problemas que impliquen diversos fenómenos físicos como pueden ser transferencia de calor, electromagnetismo, mecánica estructural, acústica, flujo de fluidos, y reacciones químicas entre otros, en base a la resolución de sistemas acoplados que involucren ecuaciones de derivadas parciales (EDPs).

COMSOL cuenta con un gran número de módulos en su librería para la aplicación específica al problema multifísico que se busca simular. De esta forma, permite acoplar tantos módulos como sean necesarios según los fenómenos físicos involucrados en el problema. Entre otras de sus ventajas se destaca la interfaz gráfica que posee, la cual resulta ser amigable con el usuario donde se definen en una secuencia lógica distintos aspectos del proceso de modelación como, por ejemplo, dimensión espacial del modelo, parámetros y variables globales, geometría, materiales, leyes física involucradas, y la malla del modelo que puede ser generada de forma automática o manual por parte del usuario, y que tiene la posibilidad de ser deformable durante la simulación. Por último, COMSOL también cuenta con herramientas destinadas a la visualización y post procesamiento de los resultados obtenidos en la simulación.

En la presente memoria, se trabajará con el módulo de flujo subsuperficial brindado por COMSOL Multiphysics (versión 5.3a), diseñado para el estudio del flujo e interacción de fluidos en medios porosos (saturados y no saturados). Cuenta con distintas ecuaciones posibles de implementar incluyendo la Ley de Darcy y la extensión de Brinkman.

La interfaz de la Ley de Darcy describe el flujo a partir del acoplamiento de la ecuación de continuidad y de la velocidad de Darcy (ecuación 2.8 y 2.9 respectivamente).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2.8)$$

$$u = -K\nabla H \quad (2.9)$$

donde  $\rho$  corresponde a la densidad del fluido [ $\text{kg/m}^3$ ],  $\varepsilon$  es la porosidad,  $K$  es la conductividad hidráulica [ $\text{m/s}$ ] y  $H$  corresponde a la carga hidráulica [ $\text{m}$ ].

De esta forma, se obtiene la siguiente ecuación para describir el sistema (COMSOL Multiphysics, 2013):

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (-K \nabla H) = 0 \quad (2.10)$$

En la ecuación,  $S_s$  corresponde al almacenamiento específico [1/m], el cual considera la capacidad del sistema para liberar/almacenar agua por unidad de volumen, debido a la compresibilidad del fluido y de la matriz sólida ante un cambio unitario en la carga hidráulica del acuífero.

En vez de resolver el flujo para la ecuación recién expuesta, COMSOL resuelve para la formulación en términos de presión:

$$\rho S \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left[ -\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g) \right] = 0 \quad (2.11)$$

En la última ecuación,  $p$  es la presión [Pa] y  $k$  es la permeabilidad del medio poroso [m<sup>2</sup>].  $S$  está relacionado con la aceleración de gravedad y la densidad del fluido de la forma  $S = S_s / \rho g$  [1/Pa]. La conductividad hidráulica está descrita en términos de permeabilidad y viscosidad dinámica del fluido  $K = \frac{k \rho g}{\mu}$ , mientras que la carga hidráulica está relacionada con la presión del fluido.

Cabe mencionar que esta última ecuación considera que el sistema estudiado está completamente saturado y no existe el efecto asociado al drenaje de poros. Esta condición limita las posibilidades de un análisis estricto del drenaje para un acuífero superior en el caso del Block Caving, pero no debiesen afectar significativamente el análisis de caudales máximos en puntos de extracción inferiores.

Por otro lado, la interfaz de la ecuación de Brinkman calcula el campo de velocidades y de presión de un flujo a través de un medio poroso. Esta interfaz supone una extensión de la Ley de Darcy para el problema de flujo, ya que describe la disipación de energía tanto por esfuerzos viscosos como por gradientes de presión, de modo similar a lo planteado en la ecuación de Navier Stokes.

El flujo hidráulico se resuelve en el dominio de estudio mediante el acoplamiento de la ecuación de continuidad (ecuación 2.8), y la siguiente ecuación de momentum:

$$\frac{\rho}{\varepsilon} \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \frac{u}{\varepsilon} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \frac{\mu}{\varepsilon} \left\{ (\nabla u + (\nabla u)^T - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right\} \right] - \frac{\mu}{k} u + F \quad (2.12)$$

donde  $p$  es la presión [Pa],  $I$  es el vector identidad,  $u$  es la velocidad [m/s],  $\rho$  corresponde a la densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>],  $\varepsilon$  es la porosidad y  $k$  es la permeabilidad del medio poroso [m<sup>2</sup>]. La influencia de fuerzas volumétricas como la acción de la gravedad, por ejemplo, son consideradas en el término de la fuerza  $F$  [N/m<sup>3</sup>].

# Capítulo 3: Modelo conceptual

En primera instancia, se desarrolla un modelo conceptual con el propósito de representar la hipótesis del mecanismo de generación para un bombeo de barro, y definir los parámetros geométricos e hidráulicos involucrados en el problema en estudio. Para esto, si bien se conoce la existencia de diversos tipos de mecanismos para la ocurrencia de un bombeo, se opta por trabajar con el mecanismo interno primario descrito en el Capítulo 2 para conceptualizar el fenómeno en estudio.

El modelo conceptual considera el caso en que el caving está conectado, es decir, la fragmentación se ha propagado por todo el macizo rocoso y, por ende, es posible considerar todo el material existente como material granular. La fragmentación progresiva de la roca y, en consecuencia, el desarrollo del caving, es inducida por la descarga continua de material desde los puntos de extracción ubicados en la base del macizo. Dentro de la columna de material quebrado es posible distinguir zonas de densidad diferenciada. Si bien resulta lógico estimar que, a raíz de la compresión por el peso propio del material al interior de la columna, la base de ésta presenta una menor permeabilidad, localmente se tiene una zona de descompresión idealizada como una elipse debido a la extracción de material desde el punto de extracción. Un esquema explicativo se muestra a continuación en la Figura 3.1.

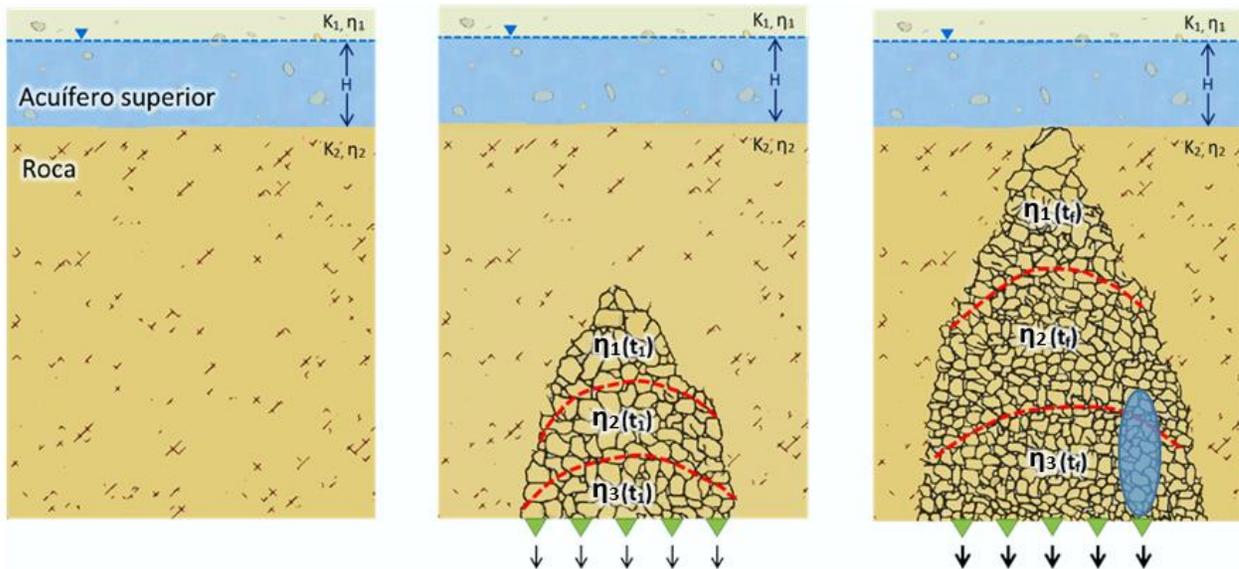


Figura 3.1: Esquema de la propagación del caving en un macizo rocoso. De izquierda a derecha, se muestran los estados asociados a un tiempo inicial, un tiempo intermedio y un tiempo final.

De esta forma, se propone como modelo conceptual para la ocurrencia de un bombeo de barro, un sistema en dónde una zona de mayor permeabilidad, definida como una elipse, se propaga de forma ascendente dentro de otra zona de roca fracturada relativamente impermeable, y alcanza un acuífero superior sujeto a un drenaje gravitacional mínimo. En la Figura 3.2 se muestra un diagrama explicativo del problema a estudiar. El dominio de control se define por un estrato superior de

origen aluvial que actúa como reservorio de agua, y por un estrato inferior de roca fragmentada inmersa en una matriz de material fino de muy baja conductividad (indicado como “Material granular” en la Figura 3.2). Se establece un punto de extracción localizado en la base del modelo por donde se extrae material de forma progresiva.

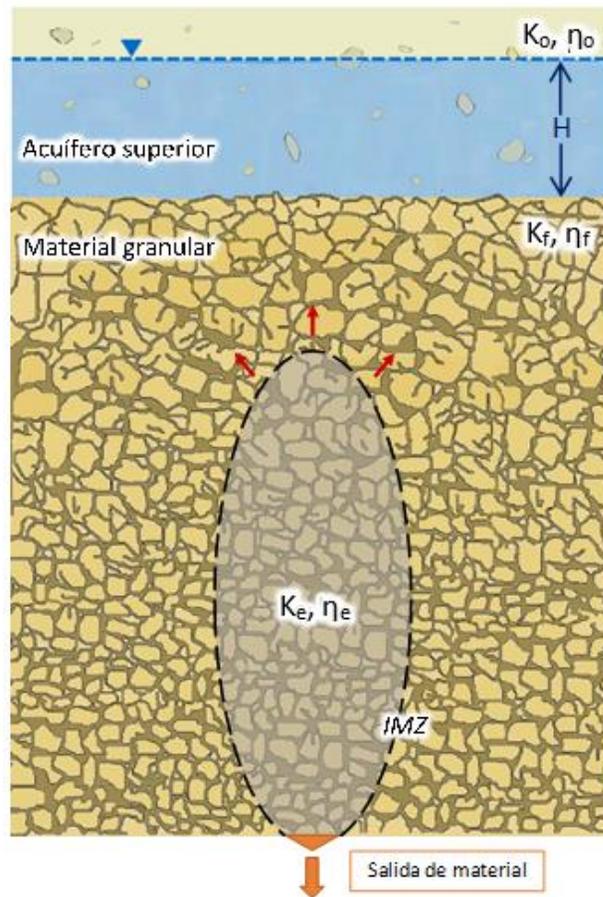


Figura 3.2: Propagación de la elipse de movimiento en el estrato granular.

Con el propósito de simplificar la simulación del flujo hidráulico, se supondrá que el material granular está completamente saturado. Debido a esto, se deberá considerar un caudal permanente que sale por la base del modelo,  $q_f$ . Las propiedades correspondientes a la conductividad y la porosidad están descritas por  $K_f, \eta_f$ , y  $K_0, \eta_0$  para el medio fracturado y el estrato superior respectivamente. Al interior de la elipse éstas están descritas por  $K_e$  y  $\eta_e$ .

La simulación en COMSOL contempla en primer lugar, el estado sin descarga en el sistema; es decir, el material granular sin la elipse de movimiento y sólo con el acuífero superior drenando gravitacionalmente (Figura 3.3-a). En segundo lugar, se tendrá una configuración como la mostrada en la Figura 3.3-b, donde se incorpora un punto de extracción y el elipsoide de movimiento correspondiente que alcanza el acuífero superior. De esta forma se busca representar la descompresión local de material respecto al material circundante y perturbar el sistema propiciando la descarga del volumen de agua superior.

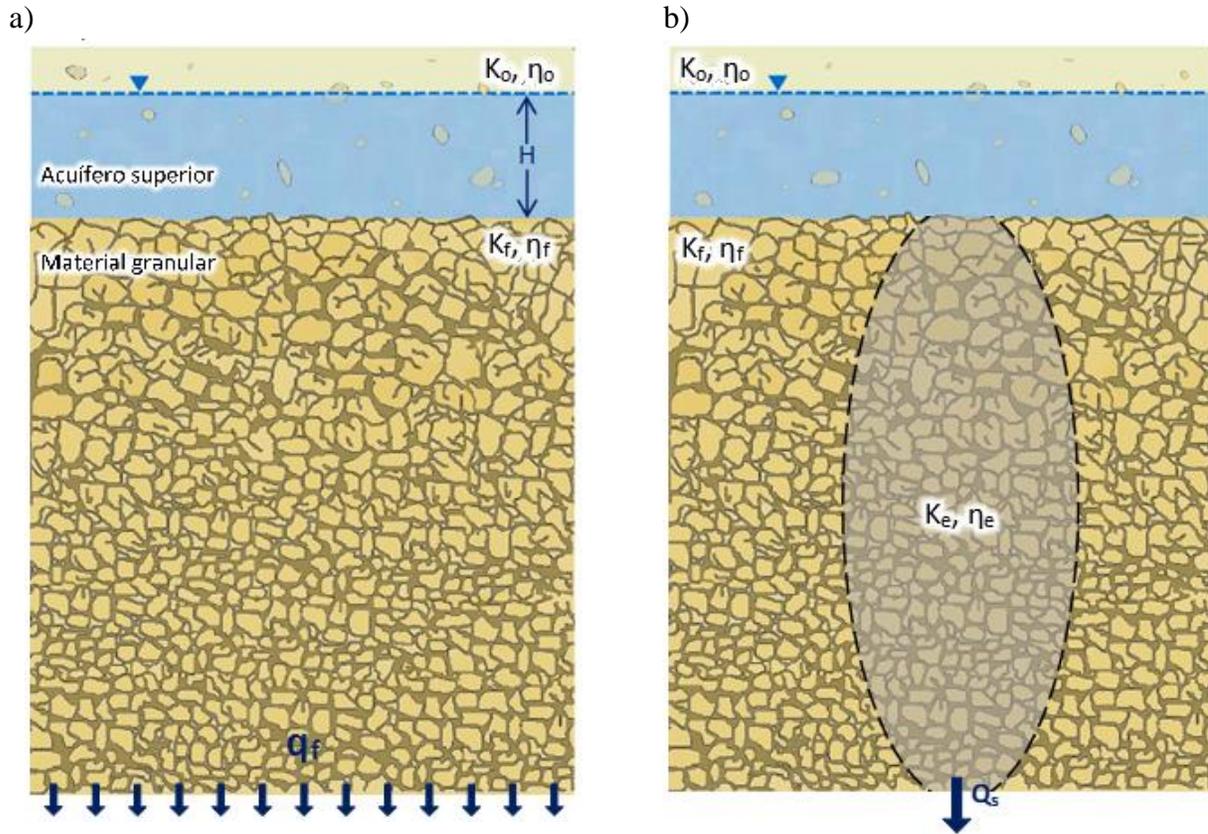


Figura 3.3: a) Primer caso de estudio (situación inicial). b) Segundo caso de estudio (situación final).

Los supuestos a considerar para la modelación en ambos casos son: todos los materiales se encuentran inicialmente saturados, son isotrópicos y homogéneos. Por otro lado, dado el carácter súbito del flujo asociado al bombeo, se supondrá que el flujo de material granular inducido por la extracción de material desde el nivel de producción, ocurre de forma gradual, en una escala de tiempo mucho mayor a la del flujo hidráulico generado una vez que la elipse interseca el estrato superior. De esta manera, al no ser comparables ambas escalas de tiempo, se estudiarán los fenómenos (flujo granular y flujo hidráulico) de forma desacoplada, considerando estático el medio granular ante el flujo de agua, predefiniendo la geometría de éste.

En lo relativo al caudal de referencia característico, es necesario considerar que, dada la no unicidad de los mecanismos de generación para los eventos de bombeo, y la falta de mediciones in situ, el caudal de referencia que se adoptará se estimará teniendo en cuenta los antecedentes mostrados en la sección 2.3.1. Por consiguiente, se supondrá como caudal máximo de referencia aquel que permita llenar un túnel de 50 metros de largo y una sección transversal de  $4 \times 4 \text{ m}^2$ , con un alcance de llenado de 4 metros en tres minutos. Esto supone un caudal de  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente, sin embargo, para simplificar el problema, se optará por trabajar tomando en cuenta el orden de magnitud de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A continuación, se presentan los alcances del presente trabajo en lo relativo al problema del régimen de flujo y del fluido utilizado para el desarrollo del modelo.

En primer lugar, puede mencionarse que la realización de la presente memoria se basa en la aplicación de ecuaciones para la solución del problema de flujo (Ley de Darcy y la ecuación de Brinkman), las cuales tienen cierto dominio de validez. Ejemplo de esto, dice relación con la consideración de un flujo laminar, es decir los efectos viscosos sobre el flujo son predominantes frente a los inerciales. Sin embargo, es importante recalcar que, en la práctica, el régimen que suele presentarse en la naturaleza corresponde a flujos turbulentos. En éstos, las partículas de agua siguen trayectorias irregulares y se mueven de forma caótica debido a que las fuerzas viscosas son débiles en comparación a las inerciales y ya no son capaces de amortiguar las perturbaciones a las cuales está sometido el flujo.

Algunas consideraciones que se han hecho en estudios de flujos turbulentos en medios porosos incluyen la integración de la extensión de Forchheimer en la ecuación de momentum, y el uso de operadores para promediar el sistema de ecuaciones (promedios de Reynolds o enfoque RANS). Por lo general se utiliza un promedio estadístico para tratar la turbulencia del flujo, y un promedio espacial para adaptar el medio poroso. Una descripción más detallada de la modelación de flujo turbulento en medios porosos se presenta en Chan, Huang, Leu, & Lai (2007) y Drouin, Grégoire, & Simonin (2013).

Por otro lado, el fluido a estudiar en la modelación de problema corresponderá a agua, sin embargo, el fenómeno describe un flujo de barro. La salvedad dice relación con la diferencia en el comportamiento mecánico de ambos fluidos. Siendo el agua un fluido newtoniano, su viscosidad, para condiciones de temperatura y presión dadas, puede considerarse constante. En otras palabras, si se le aplica un esfuerzo de corte a una masa de fluido, la velocidad de deformación generada en el fluido se relaciona con el esfuerzo de cizalle mediante una constante de proporcionalidad igual a la viscosidad. Sin embargo, el barro al tratarse de un fluido no newtoniano no obedece este comportamiento, y su viscosidad cambia conforme la velocidad de deformación. Una caracterización geotécnica del material de barro extraído en faenas mineras puede encontrarse en Basaure (2014).

Finalmente, es necesario recordar que la conductividad hidráulica es una propiedad que depende tanto del medio poroso como del fluido que circula a través de éste. Al utilizar agua para las simulaciones, se está optando por un enfoque conservador puesto que al tener una menor viscosidad que el barro, las conductividades hidráulicas con las que se trabajan serán mayores que en el caso de tratar con barro.

# Capítulo 4: Modelo numérico

El modelo numérico simula el comportamiento del flujo considerando el modelo conceptual que se ha establecido. Con éste se pretende estudiar bajo qué combinación de parámetros característicos del modelo conceptual, la hipótesis del mecanismo de generación alcanza el valor de caudal de referencia para este tipo de eventos estimado en el capítulo anterior.

## 4.1 Geometría del modelo

La geometría del modelo numérico se corresponde con lo expuesto en el modelo conceptual. Al ser éste simétrico respecto a su eje vertical central, se construye definiéndolo como un modelo 2D con geometría axisimétrica siguiendo el supuesto de que el dominio en estudio puede definirse por un cilindro. Debido a esto, la geometría descrita a continuación corresponde a la mitad del plano vertical central del cilindro. De esta forma, se logra un modelo que requiere de menos tiempo y de menos recursos computacionales para su resolución.

En la Figura 4.1 se puede observar la geometría del sistema, consistente en un cilindro principal definido para el material granular correspondiente al caving propagado, y un cilindro sobreyacente, de menores dimensiones, para representar el acuífero superior. También, se define una semi elipse truncada en los extremos representando la elipse de movimiento que interseca con el reservorio de agua.

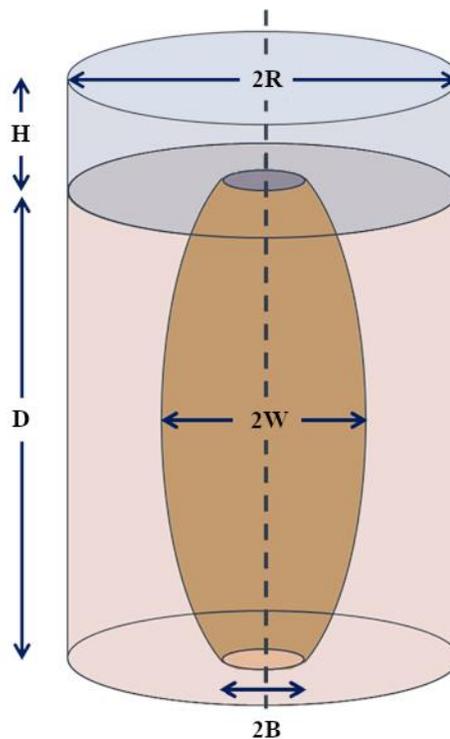


Figura 4.1: Geometría del modelo.

## 4.2 Malla

El método de elementos finitos discretiza el dominio de modelación utilizando nodos definidos por los vértices de cada uno de los elementos donde se resuelven las ecuaciones que definen el problema de flujo. En este estudio, se optó por un mallado triangular con el objetivo de representar de mejor forma la geometría del dominio. Adicionalmente, se refinaron zonas correspondientes a singularidades en la geometría de modelo como los contornos correspondientes al diámetro del punto de extracción, al contorno que describe la superficie de la elipse de movimiento, y la porción inferior al interior de la elipse. Lo anterior con el propósito de mejorar la precisión de los resultados obtenidos, puesto que son zonas donde se tiene contraste de conductividad y donde se esperan mayores velocidades del flujo.

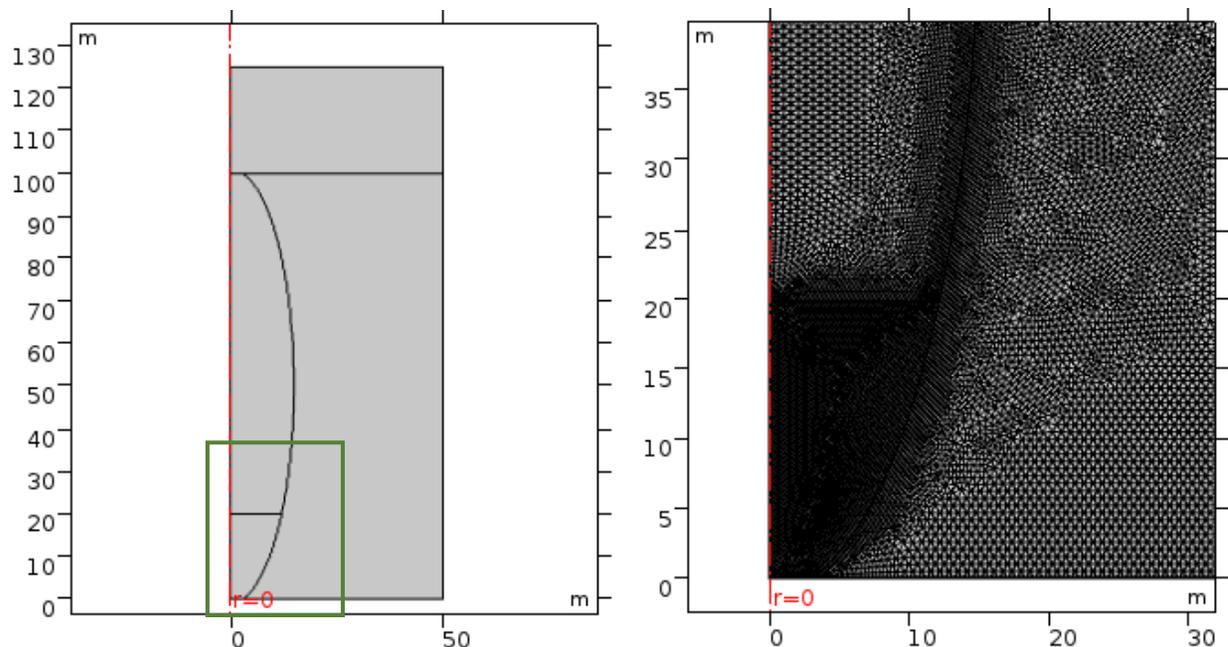


Figura 4.2: Malla del modelo. El gráfico de la derecha corresponde al rectángulo verde indicado en el gráfico de la izquierda.

La malla cubre un dominio de  $6250 \text{ m}^2$  y está compuesta por 50108 elementos. El tamaño máximo del elemento en la grilla es de 0.65 metros, mientras que el tamaño mínimo corresponde a 0.1 mm.

La calidad media de la malla es de 0.9 según el criterio de oblicuidad, el cual se basa en el ángulo máximo que posee el elemento y toma valores desde 0 a 1. Es decir, si alguno de los ángulos es mayor que al de un triángulo equilátero (elemento óptimo), la medida muestra qué tan distinto es asociando el estado de degeneración del elemento. En el caso de ser igual a un triángulo equilátero, la medida es 1 representando un elemento perfectamente regular.

### 4.3 Condiciones iniciales y de borde

Con el modelo se busca estudiar el comportamiento de un medio poroso que se encuentra en un drenaje libre, al incorporar una zona de mayor permeabilidad que conecte el borde inferior del dominio con la fuente de agua superior. Para esto se analizan dos regímenes de simulación. El primero de ellos está compuesto por el material granular con el acuífero superior. Este estado es simulado en régimen permanente y sirve como condición inicial para el estado transitorio en donde la geometría del modelo es modificada para incorporar la elipse de movimiento.

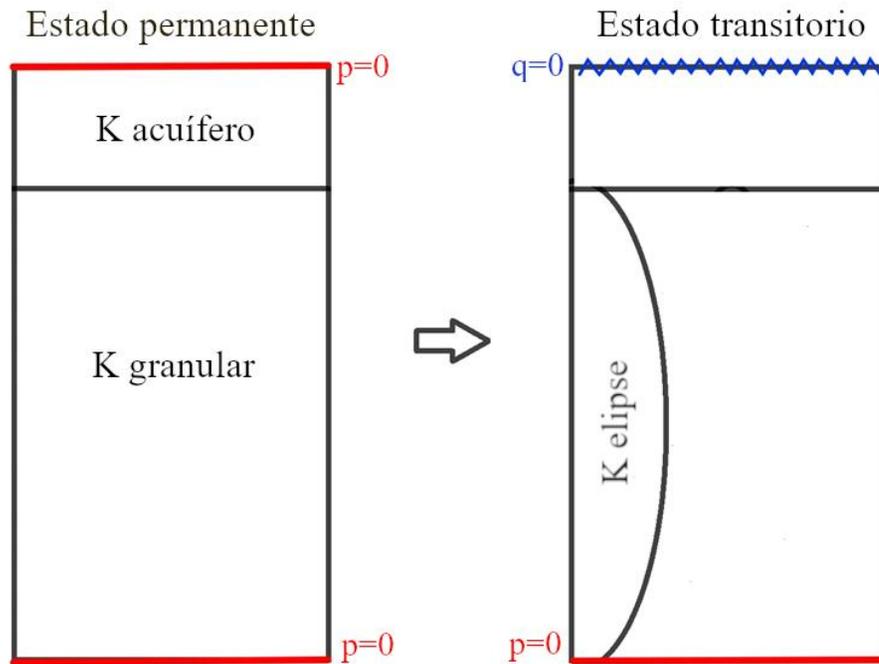


Figura 4.3: Condición de borde para estados permanente y transiente del sistema.

De esta manera, las condiciones de borde para la situación en estado permanente son:

1. Se define un nivel freático constante en el borde superior del modelo, correspondiente a la carga hidráulica del acuífero superior, imponiendo presión cero en este contorno.
2. Al tratarse de un drenaje libre, puesto que bajo el sistema estudiado se encuentran los túneles del nivel de producción, se establece una condición de presión cero en el borde inferior del dominio.

Para el estado transitorio, se tienen las siguientes condiciones de borde:

1. Se anula la condición de nivel freático constante en el borde superior. De esta forma se permite el drenaje del agua contenida en el acuífero.

2. Se incorpora, la geometría correspondiente a la elipse y sus propiedades hidráulicas correspondientes.
3. Por último, se mantiene la condición de presión cero a la salida de modelo.

Para ambos casos se tiene una condición de no flujo en el borde derecho, dado que no existe flujo normal sobre esa cara del modelo. Esto en COMSOL se precisa mediante la siguiente ecuación:

$$-\mathbf{n} \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (4.1)$$

Donde  $\mathbf{n}$  es el vector normal a la superficie,  $\rho$  es la densidad del medio poroso y  $\mathbf{u}$  es la velocidad del flujo.

## 4.4 Verificación del modelo

Con la finalidad de comprobar la validez del modelo generado en COMSOL, se analiza y compara con una solución analítica, un problema simplificado correspondiente a un drenaje libre gravitacional a través de dos estratos, lo que equivale al problema descrito en el caso correspondiente al régimen permanente. Para esto, se estudió un dominio compuesto por un estrato superior de conductividad hidráulica mayor a la del estrato inferior, y donde las condiciones de borde coinciden con las descritas anteriormente para el drenaje libre, es decir, se impone presión cero tanto en el borde inferior como superior. Las dimensiones corresponden a las mismas del modelo: los espesores del estrato inferior y superior son 100 m y 25 m, respectivamente, y el radio es de 50 m. El medio está completamente saturado y se establecieron conductividades hidráulicas de  $3 \times 10^{-4}$  y  $2.7 \times 10^{-7}$  m/s, por ser éstas representativas de un acuífero aluvial y un material fragmentado poco permeable respectivamente.

El problema descrito se simula en un régimen permanente utilizando la Ley de Darcy como ecuación de flujo. A continuación, se muestra el esquema correspondiente.

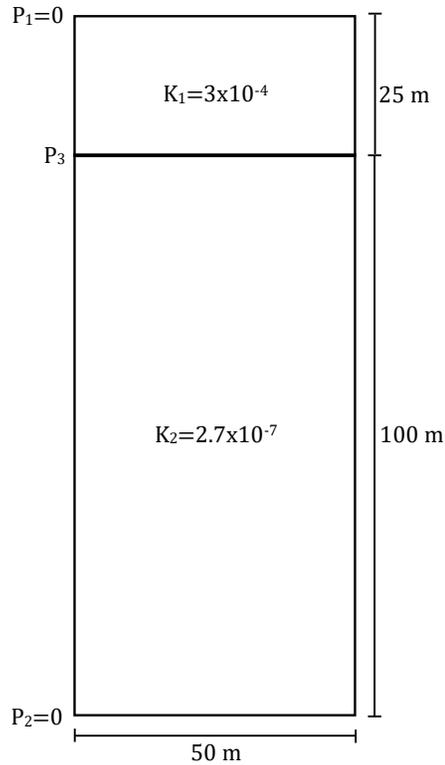


Figura 4.4: Dimensiones y conductividades para la verificación del modelo.

Con el propósito de comprobar que el modelo arroja resultados acertados, se comparan los valores de presión en la interfaz entre ambos estratos obtenidos mediante la solución analítica del problema, y lo obtenido mediante la simulación.

Para estimar el valor de la presión  $P_3$ , se calcula mediante la Ley de Darcy el caudal que circula por ambos medios. Luego, al imponer continuidad de flujo en la interfaz y despejar la incógnita correspondiente a  $P_3$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$P_3 = \left[ \frac{\frac{K_1}{K_2} - 1}{\frac{K_1}{K_2 D_1} + \frac{1}{D_2}} \right] \gamma \quad (4.2)$$

donde  $D_1$  y  $D_2$  corresponden a los espesores del estrato superior e inferior respectivamente y  $\gamma$  es el peso específico del agua.

Reemplazando con los valores numéricos:  $D_1 = 25 \text{ m}$ ,  $D_2 = 100 \text{ m}$ ,  $K_1 = 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $K_2 = 2.7 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ , y  $\gamma = 9800 \text{ kg/m}^2 \text{ s}^2$  en la ecuación (4.2), se obtiene una presión  $P = 244.7 \text{ KPa}$ .

Adicionalmente, el caudal saliente de sistema corresponde a  $2.65 \text{ [l/s]}$ .

A continuación en la Figura 4.5, se muestran los resultados arrojados por el modelo. Se define como punto de evaluación un punto ubicado en la interfaz entre ambos medios y el caudal saliente se registra integrando la velocidad sobre la superficie basal del modelo.

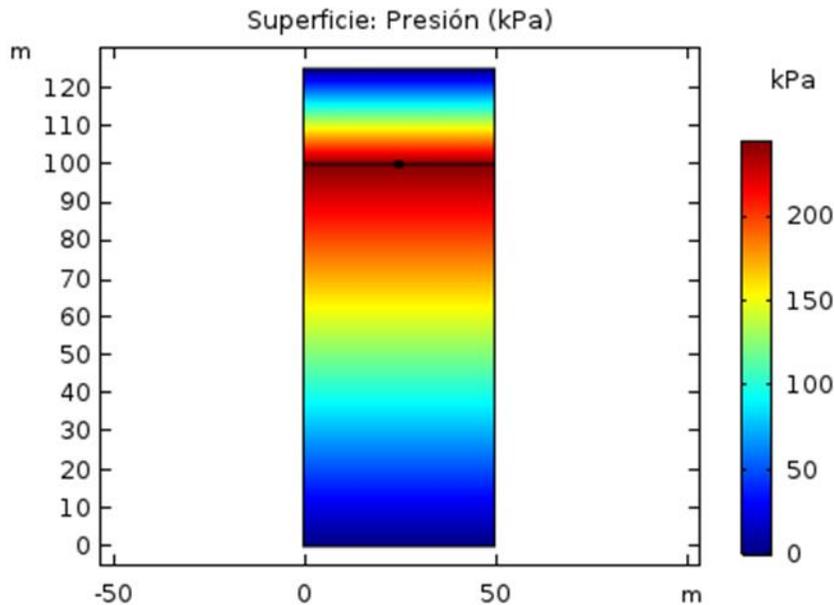


Figura 4.5: Superficie de presión resultante de la simulación.

De este modo, evaluando el punto correspondiente a  $(r, z) = 25, 100$  m se obtiene un valor de 244.796 [KPa], mientras que el caudal de salida corresponde a 2.65 [l/s]. De esta forma, se observa que ambos resultados, los obtenidos de forma analítica y los obtenidos a partir de la modelación, son prácticamente idénticos comprobando la validez de la implementación del modelo.

## 4.5 Casos de estudio

Dado que no se tiene certeza de la configuración real de los sistemas al interior de la roca cuando se presentan los eventos de bombeo de barro en la mina, se definieron 3 etapas de análisis con el propósito de averiguar bajo qué condiciones se obtienen los mayores caudales, teniendo en cuenta que al fenómeno se le puede asociar un caudal de referencia de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ :

- i. Análisis de la influencia de la conductividad hidráulica en las zonas de mayor y menor permeabilidad (elipse y material granular respectivamente).
- ii. Análisis de la geometría de la zona de mayor permeabilidad.
- iii. Análisis de caminos preferenciales de alta conductividad para el flujo de bombeo.

En primer lugar, se simula el caso ya descrito correspondiente a la elipse de movimiento en el medio granular. La conductividad hidráulica del acuífero superior se fija en  $5 \times 10^{-4}$  m/s lo cual resulta representativo de un acuífero aluvial. Por otro lado, se estudian distintas combinaciones para la conductividad del material granular y de la elipse. De esta forma, se comienza estableciendo un valor igual  $1.4 \times 10^{-5}$  m/s para la conductividad de la elipse y se opta por variar la conductividad hidráulica del medio granular, tomando valores entre  $1 \times 10^{-7}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m/s. El valor de la conductividad hidráulica al interior de la elipse se estima a partir de los resultados presentados por Basaure (2014), en donde se hace una caracterización geotécnica del material saturado de un bombeo de barro al interior de la mina El Teniente. Posteriormente, se fija el valor para la conductividad del medio granular en  $1 \times 10^{-9}$  m/s, haciendo variar la conductividad al interior de la elipse entre  $1 \times 10^{-5}$  y  $1 \times 10^{-3}$  m/s.

En segundo lugar, se modifica la geometría de la zona de alta permeabilidad. Se hace variar la longitud del semieje menor de la elipse adoptando valores entre 5 y 15 m. A la conductividad del material granular se le asigna un valor de  $1 \times 10^{-9}$  m/s, y a la conductividad de la elipse  $1 \times 10^{-3}$  m/s. Posteriormente, la elipse es reemplazada por un cilindro central de permeabilidad mayor a la circundante, manteniendo las conductividades hidráulicas recién definidas. Se hicieron simulaciones para distintos valores de radio del cilindro central: 3, 5, 10 y 15 m.

Finalmente, a raíz de los resultados obtenidos, se decide incorporar a la geometría del modelo una banda de 30 cm de diámetro que actúe como vía preferencial para el flujo. La banda se ubica al interior de la semi elipse y se extiende desde los 0 m a los 100 m en el eje vertical del modelo, es decir, abarca todo el espesor del material granular. Al igual que en el caso anterior, se estableció en el medio granular una conductividad de  $1 \times 10^{-9}$  m/s, y una conductividad de  $1 \times 10^{-3}$  m/s al interior de la elipse. Se hicieron simulaciones para distintas longitudes de banda, considerando conductividades de  $1 \times 10^{-2}$  m/s y  $1 \times 10^{-1}$  m/s al interior de ésta.

## Capítulo 5: Resultados y análisis

En el presente capítulo se muestran los resultados de las simulaciones realizadas para cada uno de los casos de estudio descritos anteriormente.

Los parámetros de entrada del modelo que caracterizan la matriz porosa y la geometría del sistema se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros de entrada para las simulaciones.

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Semieje menor (W)	m	15
Radio de punto de extracción (B)	m	3
Radio del modelo (R)	m	50
Altura de acuífero (H)	m	25
Altura de material granular (D)	m	100
Almacenamiento específico del acuífero	1/m	$1 \times 10^{-5}$
Almacenamiento específico de la elipse	1/m	$1 \times 10^{-4}$
Almacenamiento específico del medio granular	1/m	$1 \times 10^{-5}$
Conductividad hidráulica del acuífero	m/s	$5 \times 10^{-4}$

Fijando la conductividad de la elipse en  $1.4 \times 10^{-5}$  m/s, se hicieron simulaciones en régimen transitorio ocupando la Ley de Darcy variando la conductividad del material granular circundante. El horizonte de tiempo de la simulación corresponde a 100 horas y, en primera instancia, se escogieron 3 valores de conductividad entre  $1 \times 10^{-7}$  y  $1 \times 10^{-9}$  m/s para el material granular. Las imágenes correspondientes a la distribución de presión del sistema para distintos tiempos a lo largo de la simulación, se presentan en la Figura 5.1. En cada imagen se puede observar como drena el sistema mediante la posición de la isóbara cero (indicada mediante la línea amarilla), la cual se corresponde con la altura del nivel freático al interior del dominio.

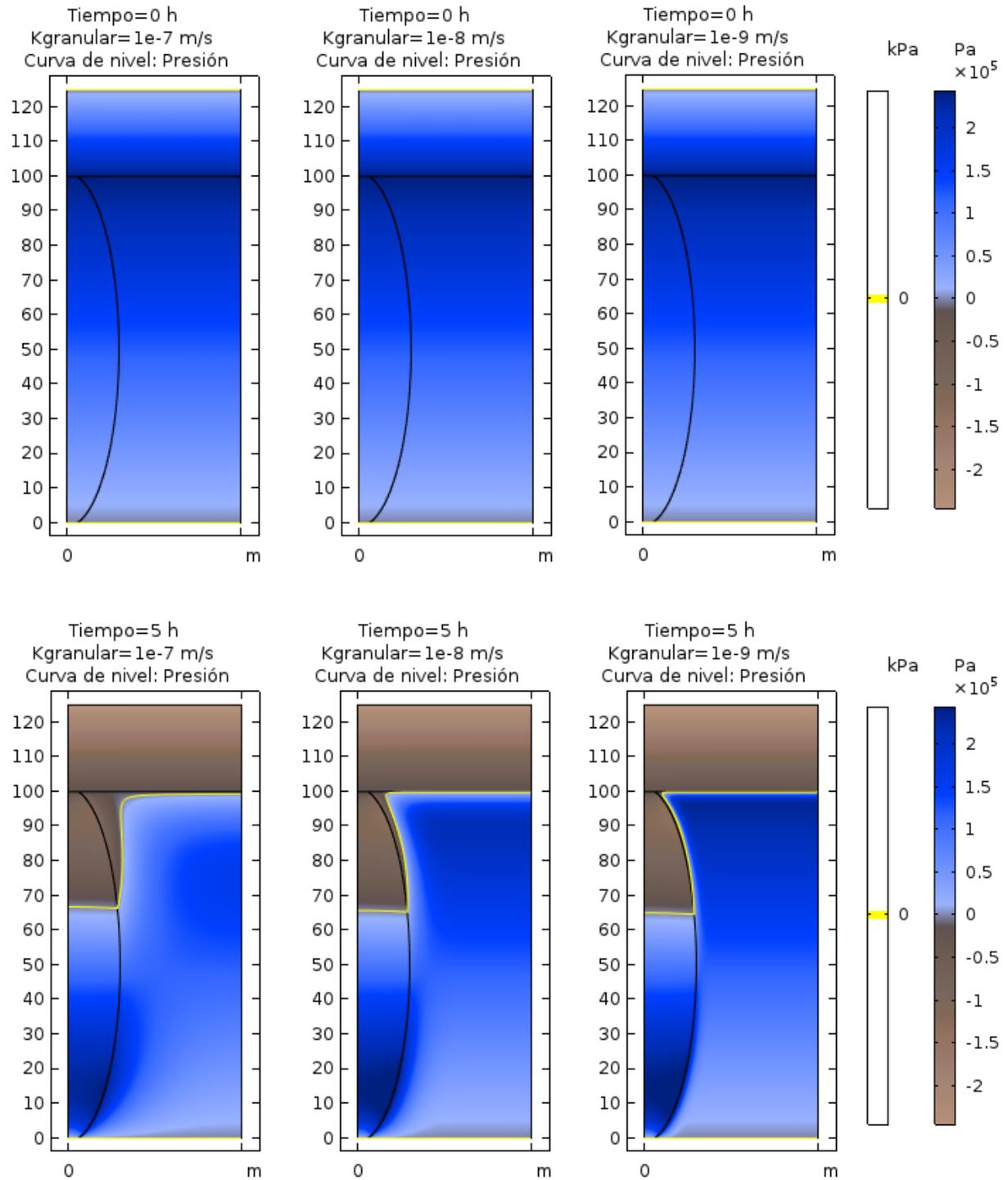


Figura 5.1: Campo de presiones e isóbara cero entre  $t=0$  y  $t=70$  horas.  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

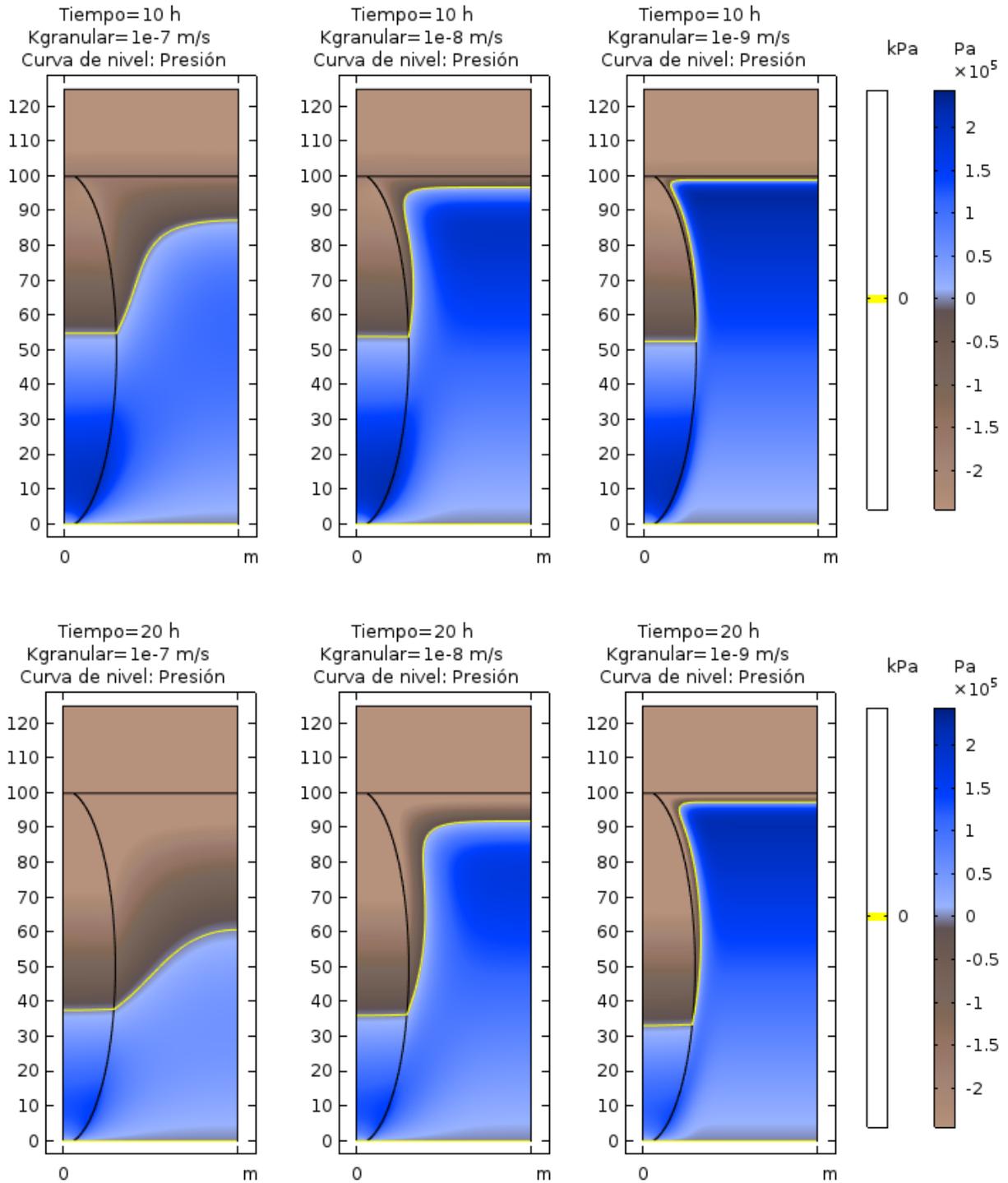


Figura 5.1 (Continuación): Campo de presiones e isóbara cero entre  $t=0$  y  $t=70$  horas.  $K_{elipse} = 1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

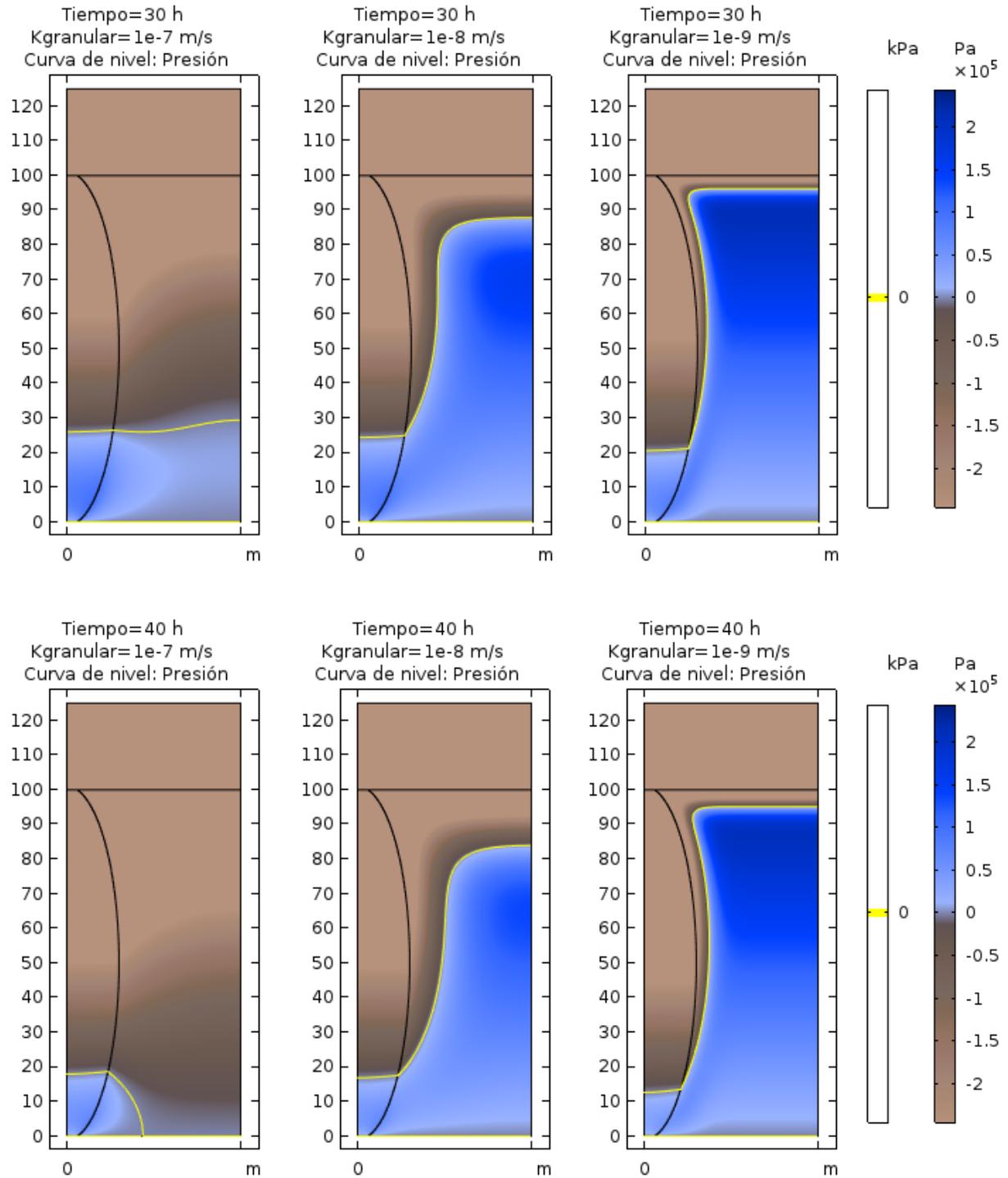


Figura 5.1 (Continuación): Campo de presiones e isóbara cero entre  $t=0$  y  $t=70$  horas.  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

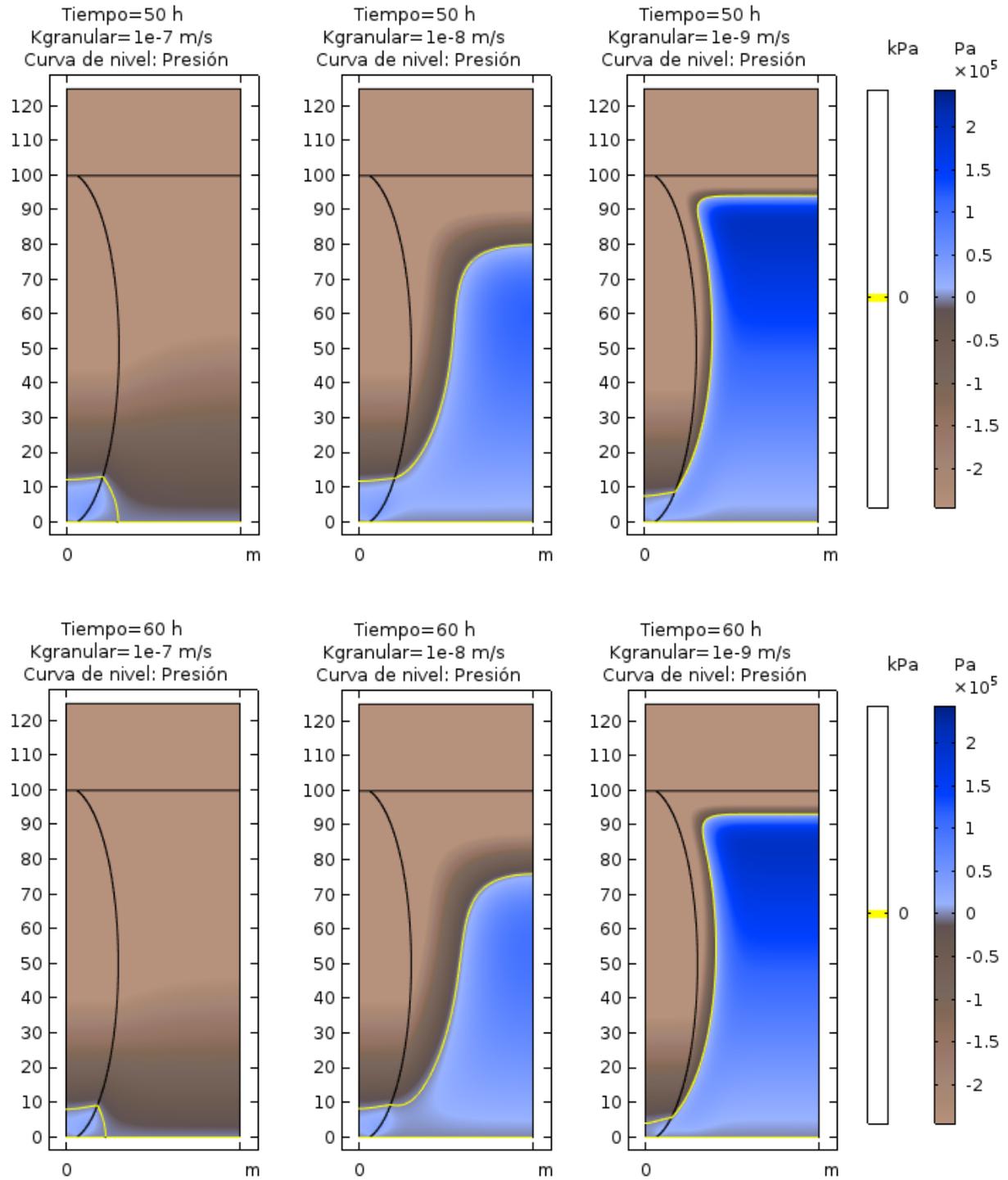


Figura 5.1 (Continuación): Campo de presiones e isóbara cero entre  $t=0$  y  $t=70$  horas.  $K_{elipse} = 1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

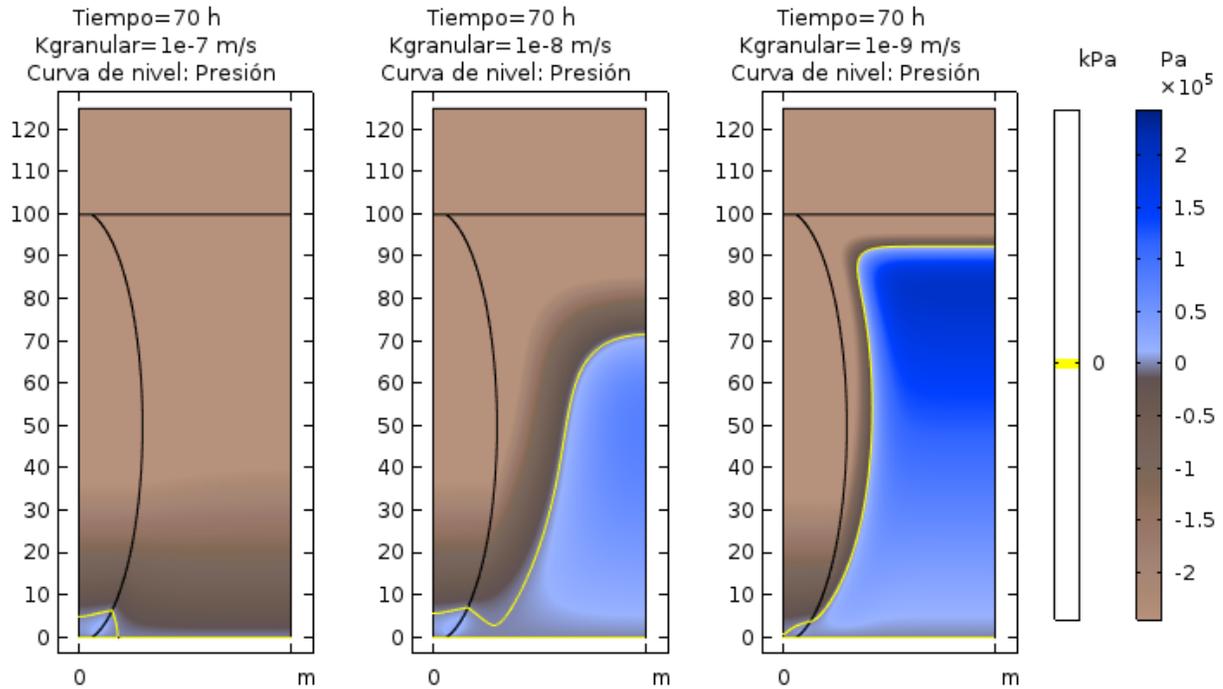


Figura 5.1 (Continuación): Campo de presiones e isóbara cero entre  $t=0$  y  $t=70$  horas.  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

En la Figura 5.1 se observa que, para que el drenaje del sistema ocurra preferencialmente a través de la elipse de mayor permeabilidad, soportando el acuífero superior, es necesario que el material de menor permeabilidad (material granular) tenga conductividades del orden de  $1 \times 10^{-9}$  m/s, la cual es característica de rocas competentes.

Como forma de constatar la validez numérica de las simulaciones se estima el error de cierre del balance hídrico en el modelo. Para esto se calcula la diferencia neta entre el volumen almacenado al interior del sistema y el flujo saliente por el borde inferior del modelo para cada periodo de estrés.

Como una medida referencial, se consideró el criterio de cierre de balance que establece la Guía para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2012). Esta guía recomienda que el error de cierre porcentual sea menor al 1%. Los flujos máscicos acumulados y el balance resultante para el caso  $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s y  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s, se presentan en la Figura 5.2. Las figuras de balance respectivas para el resto de los casos modelados se presentan en el Anexo A. En todas las simulaciones se obtuvo un error de cierre menor a 1%.

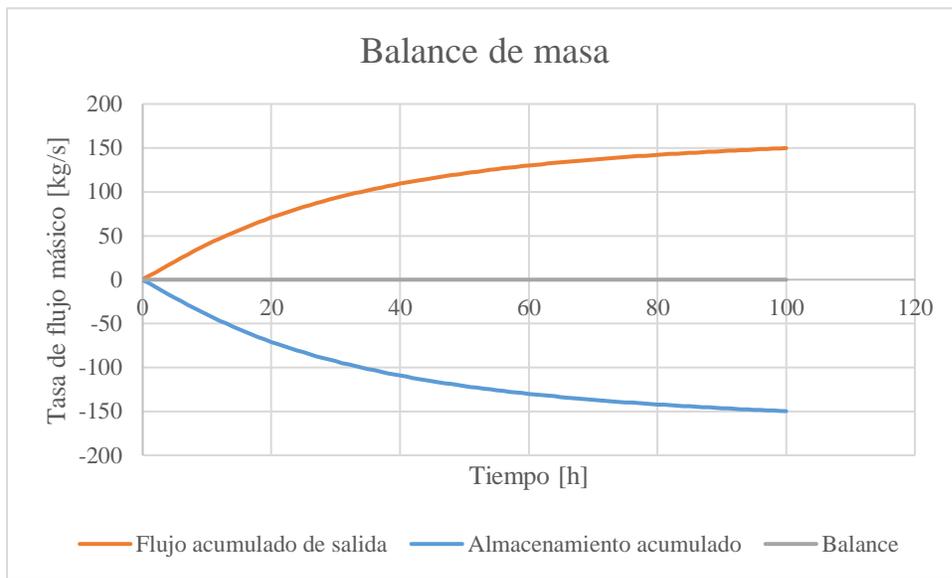


Figura 5.2: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

Los caudales máximos obtenidos a la salida de la elipse y desde la base del medio granular para distintos valores de la conductividad hidráulica en el medio granular se presentan en las Figuras 5.3 y 5.4 respectivamente. Dado que lo que se busca es el máximo en toda la serie de tiempo, se optó por refinar la escala de tiempo, considerando un paso temporal de minutos en vez de horas para un mayor detalle en los resultados. La conductividad hidráulica del estrato granular se fijó en  $1 \times 10^{-9}$ ,  $3 \times 10^{-9}$ ,  $5 \times 10^{-9}$ ,  $1 \times 10^{-8}$ ,  $3 \times 10^{-8}$ ,  $5 \times 10^{-8}$  y  $1 \times 10^{-7}$  m/s.

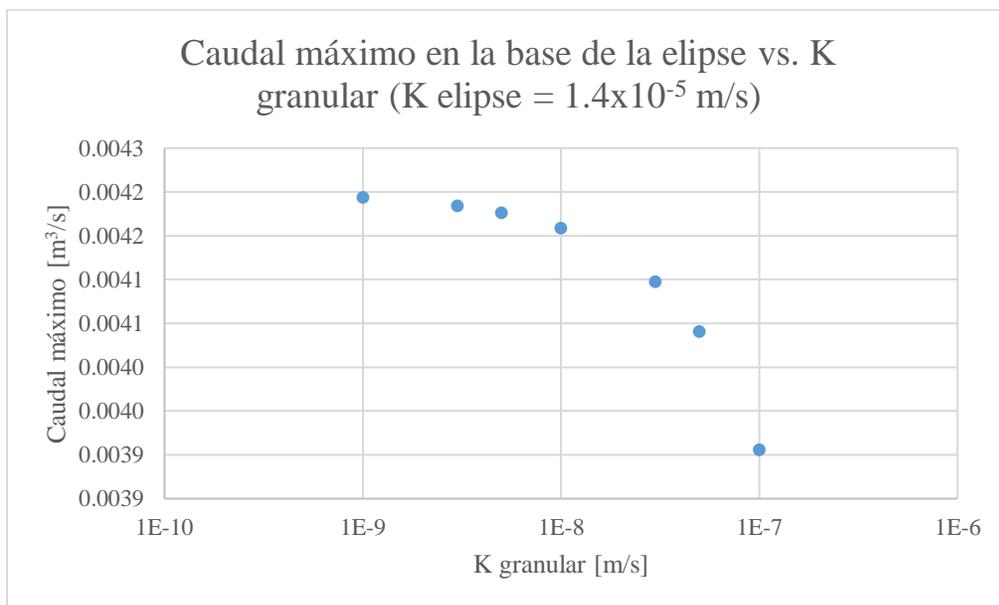


Figura 5.3: Caudal máximo a la salida de la elipse versus conductividad del medio granular

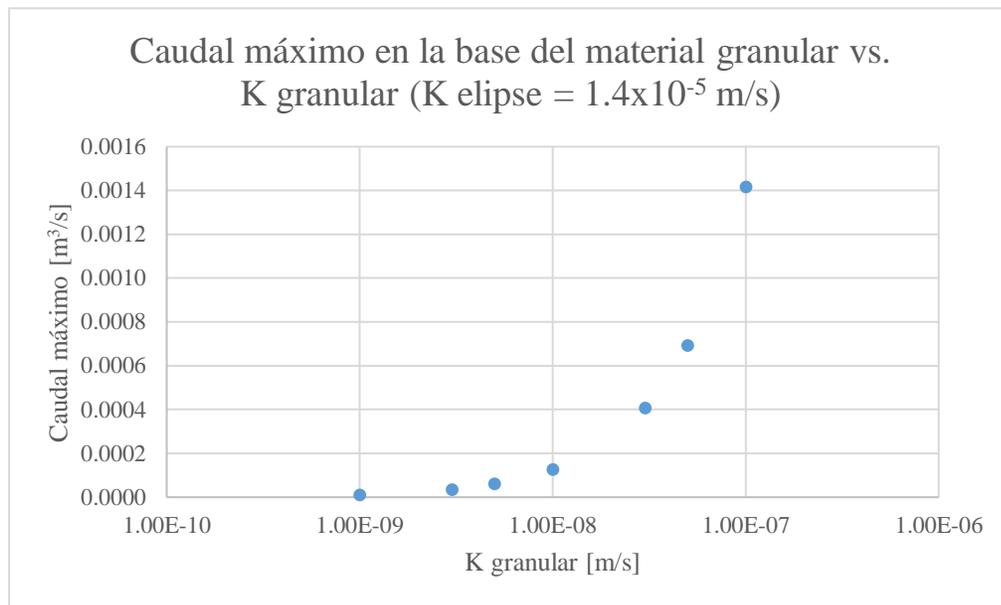


Figura 5.4: Caudal máximo en la base del medio granular versus conductividad del medio granular

De las dos últimas figuras se observa que, al aumentar la conductividad del medio granular, disminuye el flujo saliente por la base de la elipse, es decir, por el punto de extracción. Esto estaría relacionado con que el fluido, inicialmente dentro de la elipse, tendría mayor facilidad de atravesar la interfaz con el material granular cuando la conductividad de éste es más alta y, por consiguiente, salir del sistema por su base.

Como se mencionó anteriormente, el propósito es determinar las condiciones para las cuales se pueden obtener caudales de magnitudes similares a las estimadas para el evento real descrito en la sección 2.3.1 de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tomando en cuenta la figura anterior, donde se observa que a menores valores de conductividad hidráulica en el medio granular, mayores son los caudales a la salida de la elipse, se asigna la menor de las conductividades estudiadas ( $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ ) para ocupar en las futuras simulaciones. Con esta conductividad hidráulica fija, se desarrollan simulaciones análogas al caso anterior, donde la conductividad hidráulica al interior de la elipse toma valores de  $1 \times 10^{-5}$ ,  $3 \times 10^{-5}$ ,  $5 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ ,  $3 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ . Los resultados para el caudal que sale por la elipse se presenta en la Figura 5.5, mientras el caudal que sale por la base del material granular se presenta en la Figura 5.6.

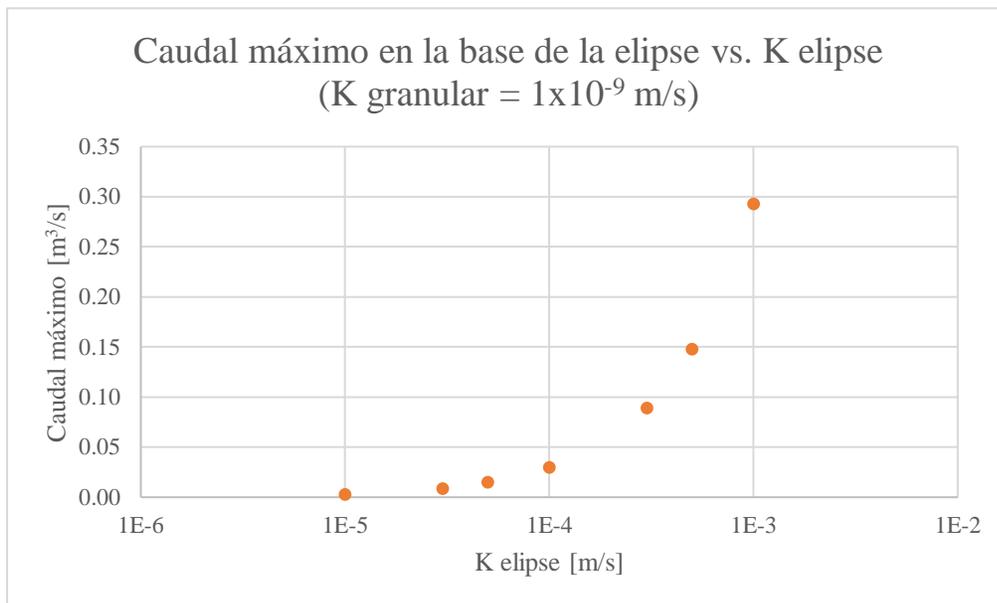


Figura 5.5: Caudal máximo a la salida de la elipse versus conductividad de la elipse

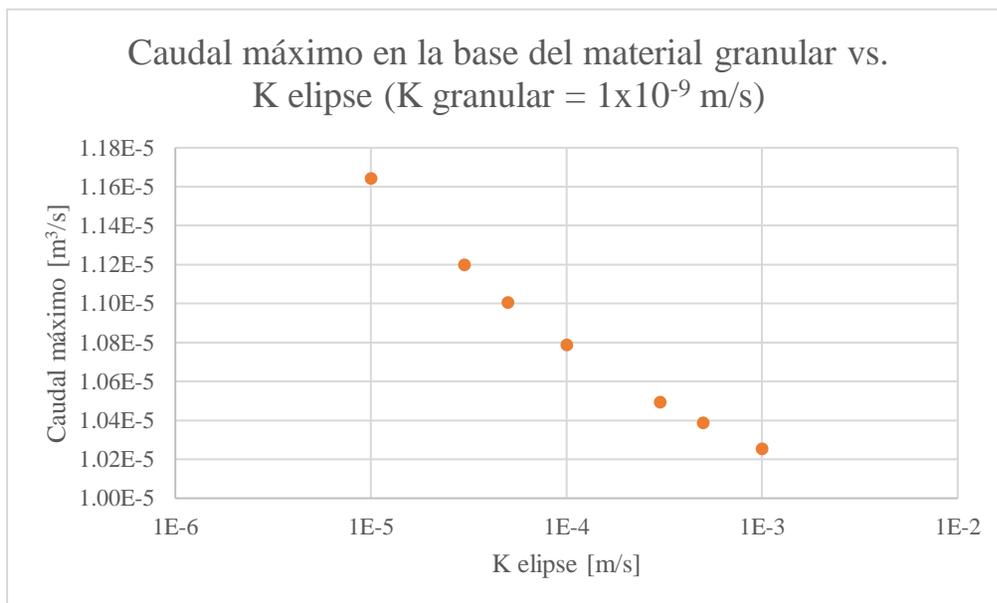


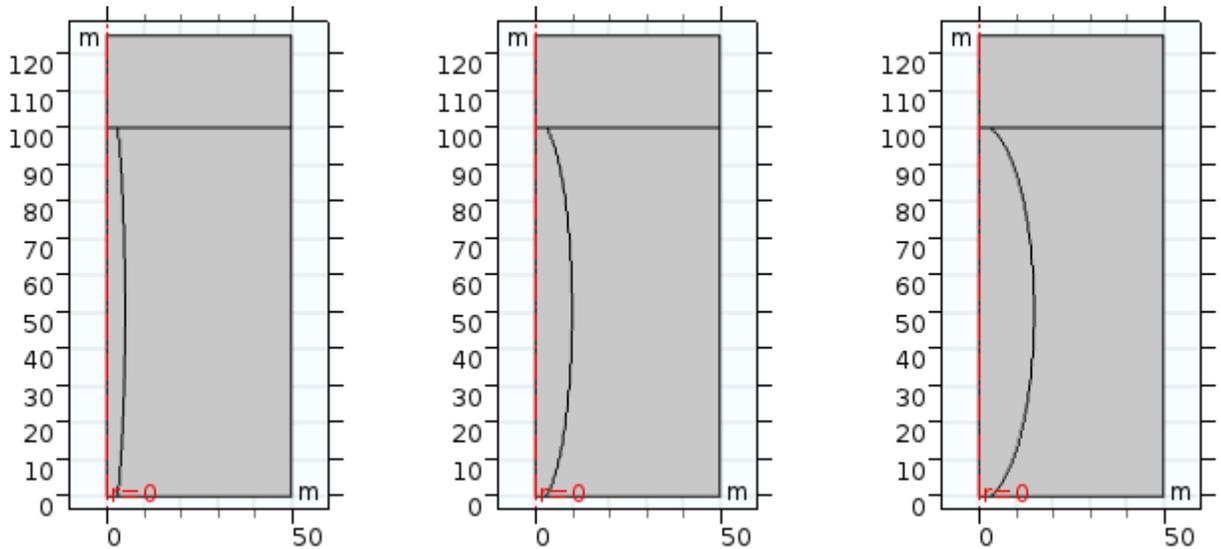
Figura 5.6: Caudal máximo en la base del medio granular versus conductividad de la elipse

Es importante notar que, si bien los caudales a la salida de la elipse mostrados en la Figura 5.5 son hasta dos órdenes de magnitud mayor que los observados en la Figura 5.3, éstos siguen siendo menores al caudal máximo estimado para un evento de bombeo en una mina de Block Caving ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

En virtud de lo descrito anteriormente, se escoge como escenario base para los próximos casos de estudio la combinación de conductividades que provoca el mayor caudal a la salida de la elipse, es decir, una conductividad de  $1 \times 10^{-9}$  y  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  para el medio granular y la elipse respectivamente. La conductividad del acuífero superior se mantiene en  $5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Se estudiaron distintas configuraciones para la geometría de la zona de alta permeabilidad. Las geometrías simuladas se muestran en la Figura 5.7. El primer conjunto de imágenes corresponde a la variación del semi eje menor de la elipse, mientras que, en el segundo, se reemplaza la elipse central por un cilindro al cual se le modifica el radio basal. Los valores adoptados en las simulaciones para el semi eje menor son 5, 8, 10, 12 y 15 metros, mientras que para el cilindro se establecieron radios de 3, 5, 10 y 15 metros.

a)



b)

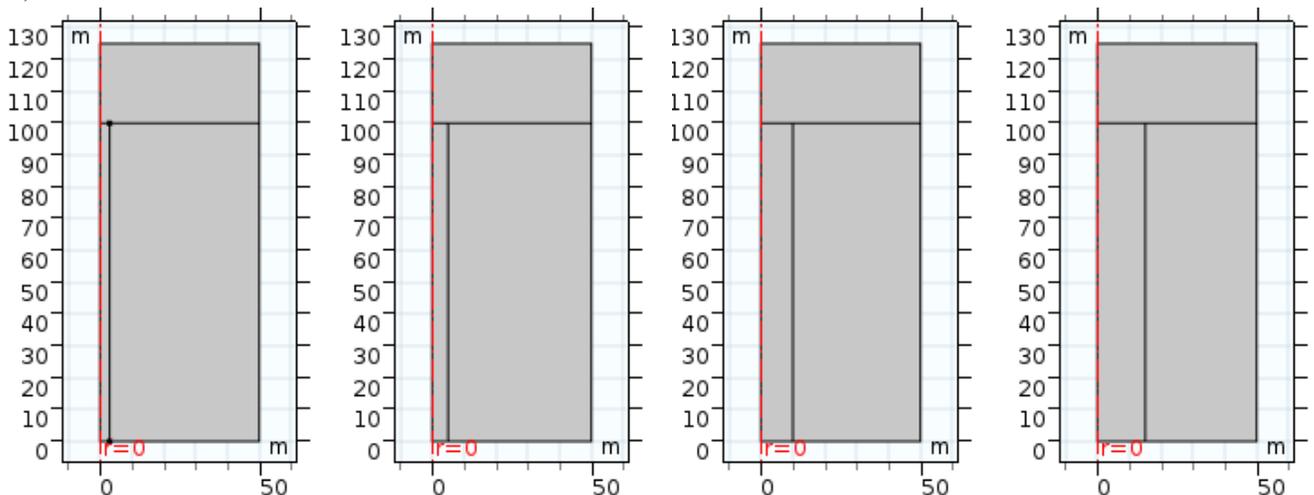


Figura 5.7: Configuraciones a estudiar: a) Elipses de semieje menor de 5, 10 y 15 m. b) Cilindros de radio 3, 5 10 y 15 m.

Las simulaciones se realizaron para un paso de tiempo de 1 minuto. Los caudales máximos resultantes para el caso a) se presenta en la Figura 5.8:

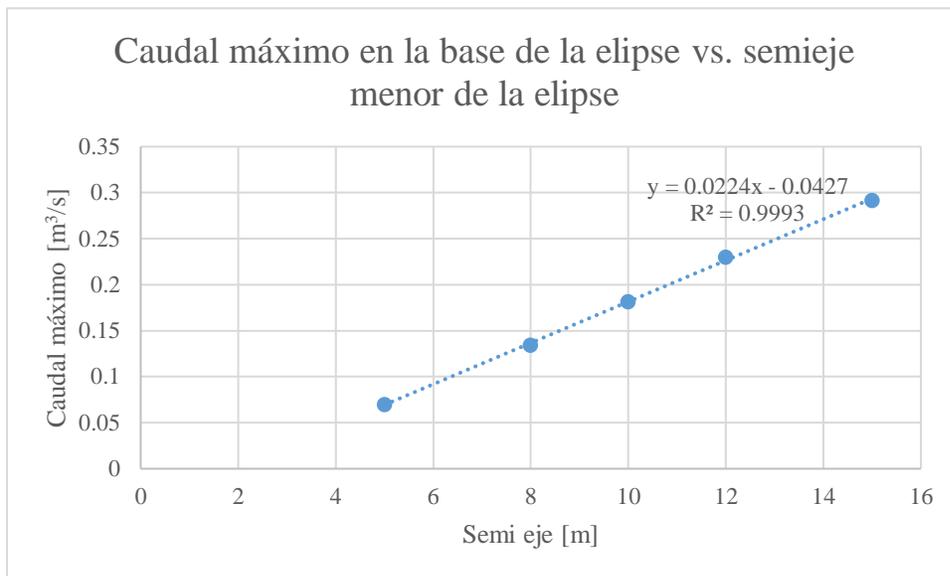


Figura 5.8: Caudales máximos obtenidos para distintos tamaños de elipse ( $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1 \times 10^{-3}$  m/s).

Se aprecia que el caudal saliente por la base de elipse obedece una relación directamente proporcional con respecto al ancho del semieje menor de la elipse. Sin embargo, ninguno de los caudales resultantes alcanza el valor del caudal máximo de referencia estimado a partir de datos reales ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Para evaluar si mediante variaciones geométricas, es posible obtener caudales mayores, se simplifica la geometría de la zona de alta permeabilidad a un cilindro y se opta por estudiar la variación en la sección del punto de extracción (Figura 5.9).

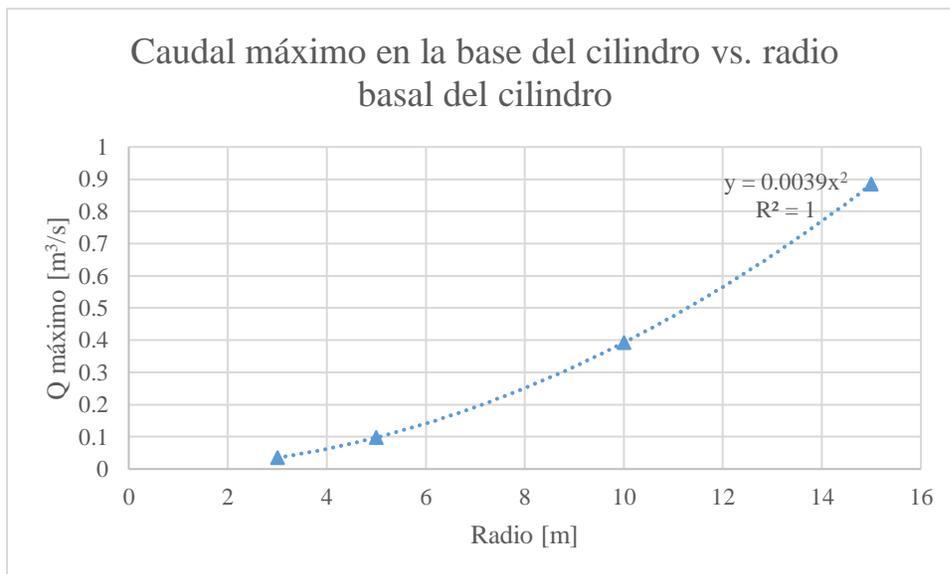


Figura 5.9: Caudales máximos obtenidos para distintos tamaños de cilindro ( $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1 \times 10^{-3}$  m/s).

De la Figura 5.9 se desprende que el caudal de salida y el radio del punto de extracción siguen una relación aproximadamente cuadrática. También se aprecia que, para valores de diámetro cercanos a las dimensiones habituales que se dan en las faenas de Block Caving (3 m de radio), los caudales son del orden de los  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y sólo se alcanzan caudales cercanos a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  para radios de 15 m. Esto podría indicar que, si el mecanismo de generación corresponde al planteado en el modelo conceptual, el flujo máximo del bombeo puede estar relacionado al radio del punto de extracción, y la geometría de la elipse, en especial el ancho de su semieje menor. Sin embargo, los caudales máximos obtenidos en estas condiciones geométricas siguen requiriendo de una conductividad hidráulica especialmente alta en la zona de la elipse.

Ante los resultados mostrados hasta este punto, es posible inferir que el fenómeno estudiado tiene pocas probabilidades de ocurrir siguiendo las condiciones clásicas de un flujo a través de medios porosos. Esto puesto que el caudal máximo para el evento de bombeo sólo se alcanza con combinaciones de geometría y conductividades hidráulicas particulares para la zona de mayor fracturamiento, que no parecen consistentes con los antecedentes que se tienen para el tipo de faena.

Una forma alternativa de generar condiciones equivalentes para el flujo que pudiesen llevar a obtener caudales máximos similares, corresponde a la existencia de vías de flujo preferencial (VPF) dentro de la zona de mayor permeabilidad. Estas vías preferenciales, podrían proporcionar una resistencia al flujo tan baja como la obtenida en el caso con una geometría cilíndrica (15 m de radio) para la zona de mayor permeabilidad, con una conductividad de  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  (Figura 5.9). Esta condición podría, por ejemplo, representar una fractura continuamente interconectada al interior de esta zona.

En virtud de lo anterior, al modelo compuesto por la elipse de semi eje menor de 15 m, radio del punto de extracción de 3 m y conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ; se le incorpora una franja de 30 cm de ancho en su interior con conductividades hidráulicas de  $1 \times 10^{-2} \text{ m/s}$  primero, y  $1 \times 10^{-1} \text{ m/s}$  después. Para la geometría de la franja, se analizan distintas configuraciones, según se muestra en la Figura 5.10.

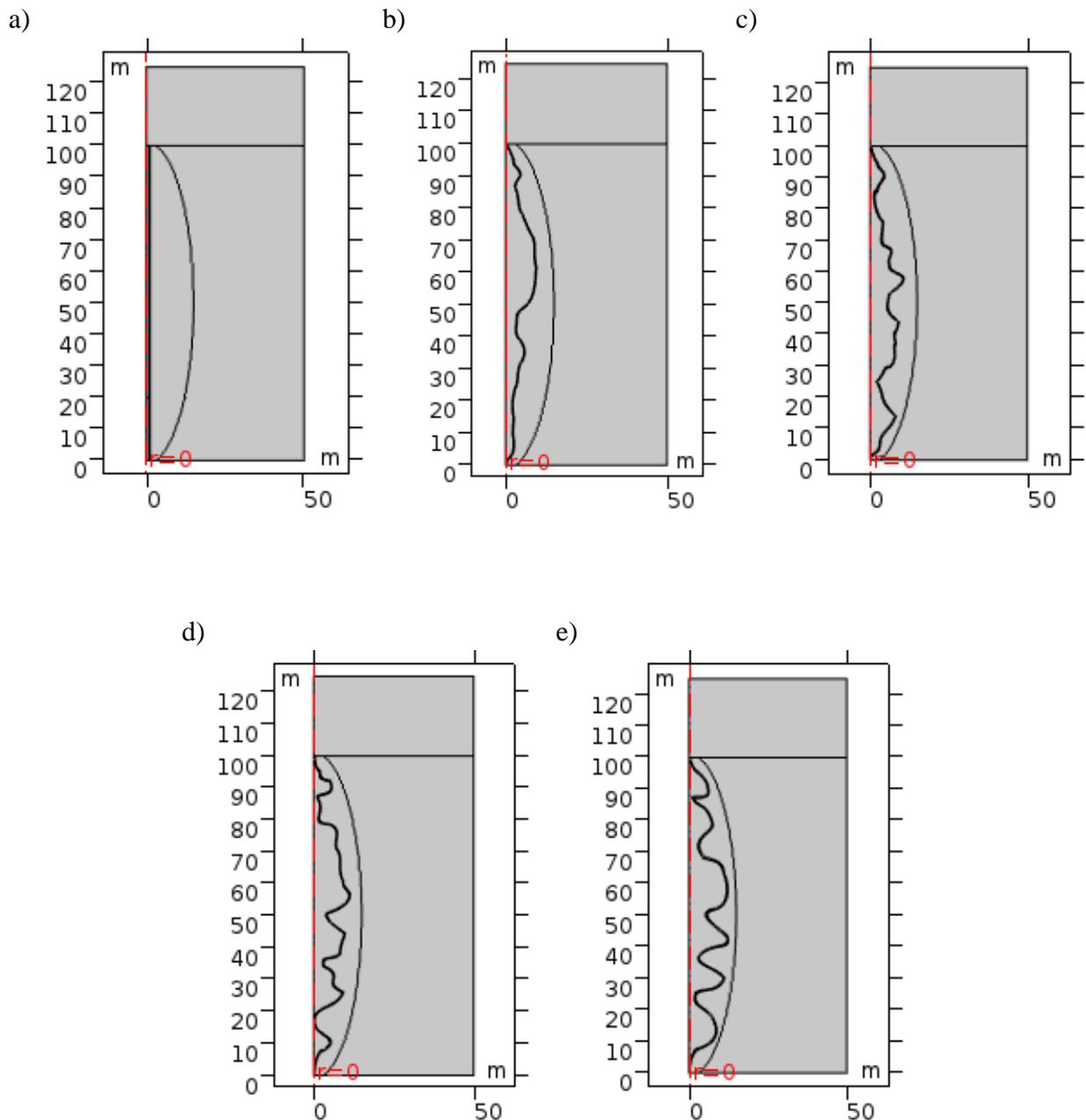


Figura 5.10: Configuraciones a estudiar: a) Longitud de la VPF: 100 m. b) Longitud de la VPF: 106.5 m. c) Longitud de la VPF: 117.5 m. d) Longitud de la VPF: 132.3 m. e) Longitud de la VPF: 142.5 m.

En la Figura 5.11 se muestra la evolución temporal para la configuración correspondiente a la VPF de 132.3 m mostrada en la Figura 5.10. El horizonte de tiempo es de 180 minutos. La discretización del tiempo para la simulación es cada 1 minuto, a excepción de los primeros 27 minutos donde el paso de tiempo es de 0.5 minutos puesto que es donde se esperan los mayores caudales. Los gráficos correspondientes a los otros casos mostrados en la Figura 5.10 se presenta en el Anexo B.

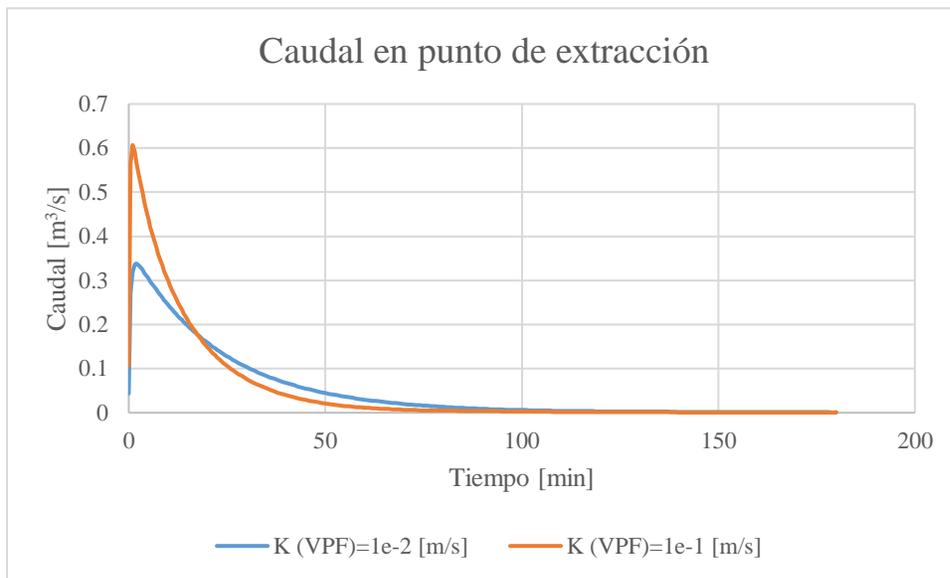


Figura 5.11: Evolución temporal del caudal en el punto de extracción para vía preferencial de flujo de 132.3 metros.

Se observa de las simulaciones que el momento de caudal máximo en el sistema configurado, ocurre cuando se tiene la máxima carga sobre el punto de extracción, es decir, al comienzo de la simulación. Los caudales menores que se observan en  $t=0$  corresponden a los caudales resultantes del régimen permanente, que no cuenta con elipse de mayor permeabilidad, utilizado como condición inicial para las simulaciones.

Dado que COMSOL no considera el drenaje de poros del acuífero, se analizó la eventual variación de resultados al considerar en la ecuación 2.11 un valor de  $S_s$  sobredimensionado para el acuífero superior. De esta manera, se le asignó un valor de 0.2 1/m como forma de considerar un almacenamiento más cercano al que podría tener el drenaje de un acuífero libre. Cambiando este valor en el caso de estudio que arrojó el máximo caudal (VPF de 117 m), se obtuvo un caudal de 0.37 y 0.84  $\text{m}^3/\text{s}$  para las conductividades de la VPF de  $1 \times 10^{-2}$  y  $1 \times 10^{-1}$  m/s respectivamente. Estos caudales presentan una diferencia porcentual de 2% con respecto a los caudales obtenidos con el valor original del  $S_s$  presentado en la tabla 5.1 (0.36 y 0.83  $\text{m}^3/\text{s}$ ), verificando que los caudales resultantes no difieren en gran medida. De esta forma, se puede inferir que el parámetro  $S_s$  no influye en el valor del caudal máximo alcanzado, el cual está probablemente asociado al valor total de la carga hidráulica inicial sobre el punto de salida, más que a la forma en la que ocurre el drenaje del acuífero superior. De cualquier manera, se recomienda considerar en trabajos futuros, códigos que consideren ecuaciones, o esquemas de solución, que puedan representar de mejor forma los procesos de drenaje, sin requerir una simulación de flujo en medio parcialmente saturado.

Con el objetivo de evaluar cómo pueden cambiar los resultados para estas condiciones, si se toma en cuenta que las condiciones de flujo pueden estar fuera del rango de validez de la Ley de Darcy, se desarrollaron simulaciones utilizando la Ley de Brinkman. Las simulaciones con esta ley se desarrollaron en régimen permanente considerando las condiciones con las cuales se obtuvieron

los caudales máximos en el sistema, es decir, con la carga hidráulica máxima sobre el punto de extracción, dada por la condición de presión cero en el borde superior del modelo. A continuación, se resumen los resultados del caudal máximo para ambos valores de conductividad al interior de la vía de flujo preferencial y para ambas ecuaciones de flujo (Figura 5.12).

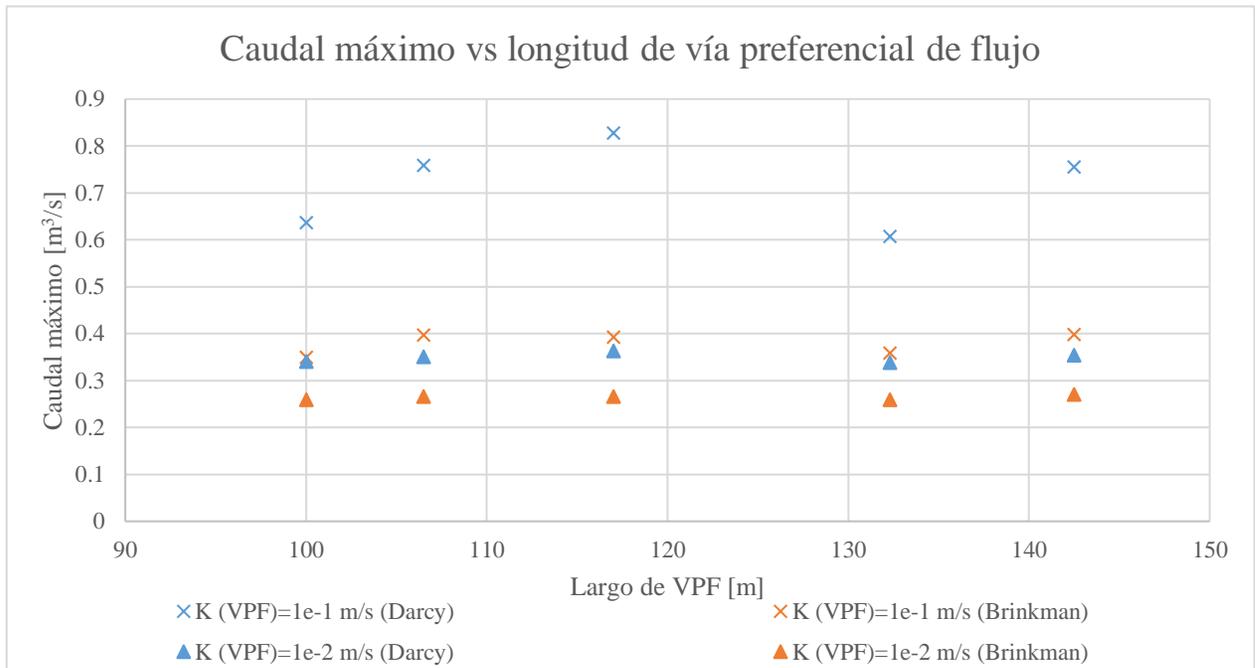


Figura 5.12: Resultados obtenidos mediante la Ley de Darcy y la ecuación de Brinkman para distintos valores de conductividad y longitud de la vía preferencial de flujo.

La figura 5.12 muestra que en el caso en que la vía preferencial de flujo adopta una conductividad de  $1 \times 10^{-1}$  m/s, y se considera en ella válida la Ley de Darcy, se alcanzan caudales máximos cercanos a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para analizar referencialmente la validez de la Ley de Darcy en estas condiciones se opta por analizar el número de Reynolds del flujo. Para esto se estima la velocidad máxima al interior de la elipse (Figura 5.13) y se aplica la fórmula (2.6) seleccionando como escala característica de longitud ( $d$ ), el radio del canal de flujo definido, es decir, 0.15 m. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.2.

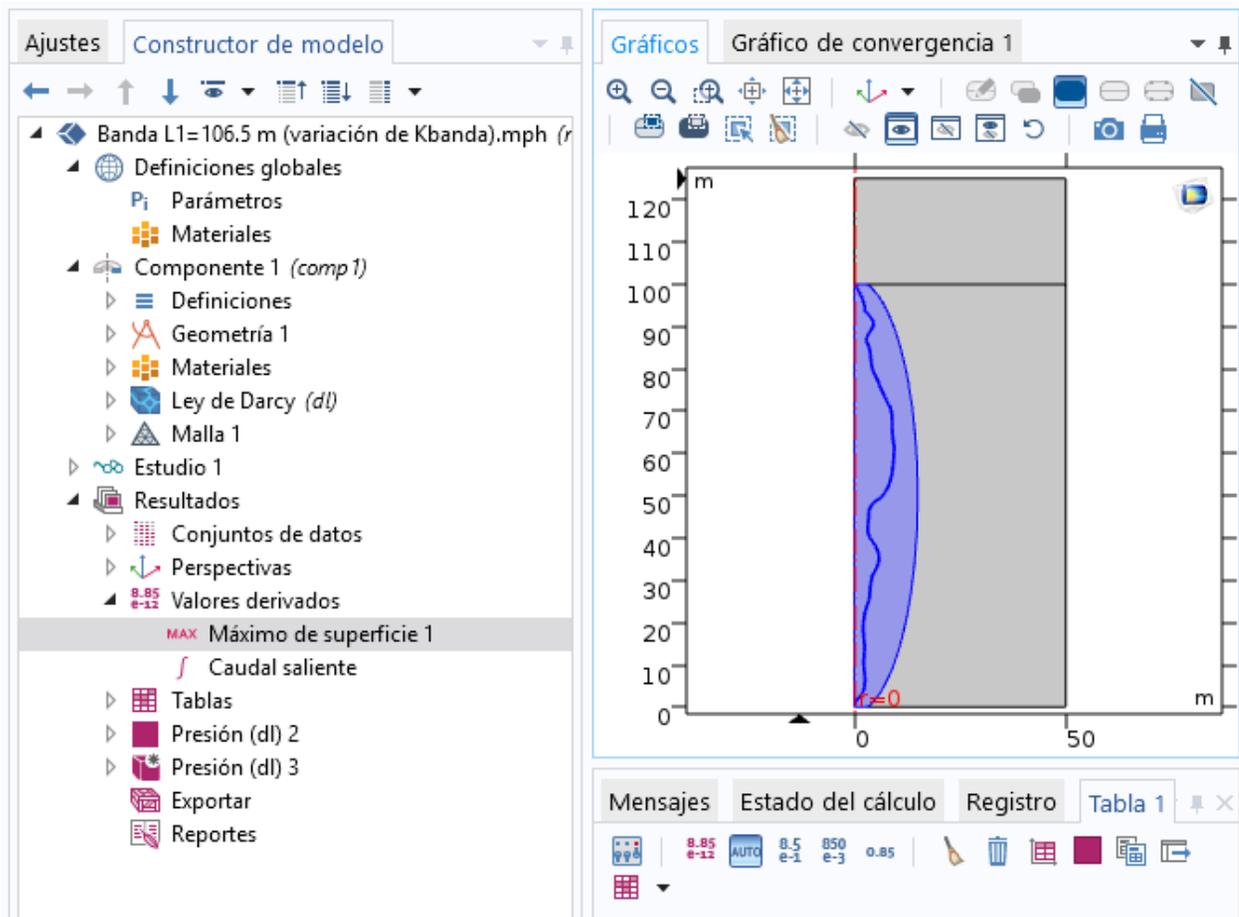


Figura 5.13: Interfaz de COMSOL para estimar el máximo de superficie en el modelo. Se adopta como dominio sólo el interior de la elipse por tratarse de la zona que presenta mayor flujo y se dan los mayores gradientes de velocidad.

Tabla 5.2: Velocidad máxima y número de Reynolds asociado ocupando la interfaz de la Ley de Darcy

Longitud de VPF [m]	Velocidad [m/s]		N° de Reynolds	
	$K_{VPF}=1 \times 10^{-2}$ m/s	$K_{VPF}=1 \times 10^{-1}$ m/s	$K_{VPF}=1 \times 10^{-2}$ m/s	$K_{VPF}=1 \times 10^{-1}$ m/s
100.0	0.05	0.25	8244	37877
106.5	0.10	1.45	15349	217638
117.5	0.11	1.73	16479	258885
132.3	0.08	0.99	12196	147905
142.5	0.09	1.29	13119	192960

Los valores de los números de Reynolds alcanzados van desde el orden de  $10^3$  a  $10^5$ , superando el límite superior de la aplicabilidad de la Ley de Darcy según lo descrito en el Capítulo 2. Si bien Bear (1972) sostiene que no es posible vincular la aplicabilidad de la Ley de Darcy con el tipo de régimen presente, es decir, sobrepasar el límite superior no supone pasar de un régimen laminar a uno turbulento, sí se concilia la idea de que los efectos inerciales empiezan a ser preponderantes

en el flujo. Ahora bien, si se comparan los puntos correspondientes a los caudales calculados mediante la ecuación de Brinkman con los caudales calculados con la Ley de Darcy, se advierte que con la ecuación de Brinkman los caudales son menores para ambas conductividades estudiadas y que la diferencia entre los caudales correspondientes a cada una de las conductividades para una vía preferencial de flujo dada, también son menores.

Es preciso notar que la Figura 2.6 presentada en el capítulo de revisión bibliográfica, muestra que para números de Reynold mayores a 10, la tendencia lineal deja de ajustarse a los resultados del factor de fricción calculados experimentalmente, es decir, la relación lineal entre la pérdida de carga y la descarga específica deja de ajustarse a los resultados experimentales. De hecho, se observa que la proyección de la tendencia lineal tiende a subestimar el factor de fricción para Reynolds altos (orden de  $10^1$  en adelante).

Cabe mencionar que el factor de fricción de Fanning presentado en la ecuación (2.7) también se puede escribir en términos de la conductividad hidráulica,  $K$ , en el caso de aplicar la Ley de Darcy:

$$f = \frac{dg}{2K^2i} \quad (5.1)$$

donde  $d$  es el diámetro característico,  $g$  es la fuerza de gravedad,  $K$  es la conductividad hidráulica e  $i$  es el gradiente hidráulico.

A partir de esta expresión, se puede inferir que, a partir de ciertos valores del número de Reynolds, igual a 10 según la Figura 2.6, para que la ecuación de Darcy reproduzca los valores de los resultados experimentales donde se obtienen valores de fricción por sobre la proyección del segmento lineal, sería necesario variar la conductividad hidráulica disminuyendo su valor. Este análisis es consistente con los resultados encontrados en la Figura 5.12, donde los caudales obtenidos mediante a ecuación de Brinkman son menores que los obtenidos mediante Darcy.

En segundo lugar, de la ecuación también se desprende que la pérdida de carga hidráulica tiene un peso menor en comparación al efecto de la conductividad hidráulica de la matriz porosa en el valor del factor de fricción. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos de caudal para distintas longitudes de vías preferenciales, donde no se observa una correlación clara entre el largo de la vía y la descarga resultante, pero sí se observa una diferencia significativa para las distintas conductividades hidráulicas estudiadas.

# Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo se ha presentado una modelación hidrogeológica referida al problema de bombeos de barro en operaciones mineras mediante el método extractivo de Block Caving. Se han desarrollado diversas simulaciones numéricas con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo hidráulico para el mecanismo de generación de bombeo de barro planteado en el modelo conceptual. Las conclusiones principales del trabajo se presentan a continuación.

## 6.1 Conclusiones

A partir de los resultados de este trabajo es posible concluir una serie de aspectos relevantes para el análisis del mecanismo de generación planteado para la ocurrencia de los bombeos de barro.

En primer lugar, se pudo concluir que se requiere que el medio granular original, sobre el cual se propaga posteriormente la elipse de mayor permeabilidad, esté asociado a una muy baja conductividad hidráulica para hacer factible la existencia previa de un acuífero superior de forma permanente. Posteriormente, se pudo concluir que también se requiere una alta conductividad en la elipse que se propaga en el medio granular para generar caudales máximos del evento de bombeo, que fuesen comparables a los estimados a partir de antecedentes existentes, sin perjuicio de que todas las simulaciones entregaron caudales menores. En este sentido, se espera al menos una diferencia de 4 órdenes de magnitud entre ambos medios. En el presente trabajo se adoptó una conductividad hidráulica de  $1 \times 10^{-9}$  m/s para el material granular circundante, lo que equivale a una conductividad propia de una roca sana o de muy bajo fracturamiento.

Se analizaron diversas configuraciones del sistema con distintas combinaciones de conductividades hidráulicas y geometría asociadas. Sin embargo, resultó difícil alcanzar el caudal máximo representativo estimado ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ), exceptuando combinaciones muy particulares de los parámetros, que involucran una alta conductividad hidráulica en la zona de mayor permeabilidad y un mayor ancho del punto de extracción. En la mayoría de los casos presentados, se alcanzó cerca de un tercio de caudal de referencia ( $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

A partir de las simulaciones se pudo constatar que, en términos de la geometría del sistema considerado, el radio del semi eje menor de la elipse y el del punto de extracción tienen un efecto directo en el caudal máximo resultante ante un evento de bombeo como el propuesto. Sin embargo, el factor más importante para determinar el caudal máximo de salida del evento de bombeo corresponde al valor de la conductividad hidráulica dentro y fuera de la elipse.

Ante esto, se puede concluir que las condiciones propias de un fenómeno violento de bombeo son difícilmente asociables a las características de un flujo clásico en medios porosos, con el mecanismo de generación propuesto y las características hidráulicas y geométricas adoptadas. Resulta mucho más probable que la ocurrencia de este tipo de eventos, en una situación como la

considerada, esté asociada a la generación de vías preferenciales de flujo al interior de material de la zona de alta permeabilidad, favoreciendo de esta forma la descarga de la fuente de agua superior.

A partir de la conclusión anterior, se estudiaron distintas configuraciones para el caso con vías preferenciales de flujo (VPF). Se consideró la generación de estas vías mediante la incorporación dentro de la elipse, de una franja de espesor acotado (del orden de 30 cm) pero asociadas a una conductividad hidráulica muy alta (superior a  $10^{-2}$  m/s). Se obtuvieron caudales del orden de 0.7 m<sup>3</sup>/s con una conductividad de  $1 \times 10^{-1}$  m/s al interior de la vía, y un caudal promedio de 0.35 m<sup>3</sup>/s para una conductividad de  $1 \times 10^{-2}$  m/s. Ambos resultados indicados se obtuvieron utilizando como modelo de flujo hidráulico a la Ley de Darcy. Los caudales alcanzados mediante la ecuación de Brinkman fueron de 0.4 m<sup>3</sup>/s y 0.27 m<sup>3</sup>/s para conductividades de  $1 \times 10^{-1}$  y  $1 \times 10^{-2}$  m/s al interior de la vía preferencial respectivamente.

Para este mismo caso, se obtuvo que para variaciones en la longitud y consecuente tortuosidad de la VPF (diferencia porcentual máxima entre las longitudes estudiadas de 35%), no se altera significativamente el caudal obtenido en el punto de extracción, pero sí se observa una diferencia significativa para las distintas conductividades hidráulicas estudiadas. Lo anterior se debería al hecho de que el valor de la conductividad hidráulica resulta más importante que la pérdida de carga hidráulica en el valor final del factor de fricción y, en consecuencia, en el valor de los caudales resultantes.

Por otro lado, en lo relativo a las ecuaciones de flujo hidráulico estudiadas, fue posible observar que al considerar esfuerzos de inerciales en la pérdida de energía del flujo a través de la aplicación de la ecuación de Brinkman, se obtienen caudales menores a los obtenidos mediante la Ley de Darcy, donde el intercambio de momentum se debe sólo a un gradiente de presiones. En este sentido, dado que la Ley de Darcy subestimaría el factor de fricción y, teniendo en cuenta que la mayoría de los programas comerciales la utilizan como modelo de flujo para describir el flujo hidráulico a través de una matriz sólida, ésta se figura como un enfoque conservador para modelar este tipo de problemas puesto que entrega caudales máximos para estos eventos, que son mayores a lo que se obtienen utilizando la Ley de Brinkman.

## 6.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro, se sugiere continuar avanzando en el estudio y caracterización de los bombeos de barro. Para esto se propone la modelación de otros tipos de mecanismos de bombeo como los mencionados en el capítulo de revisión bibliográfica; ejemplo de esto puede ser incorporar la mecánica del flujo granular al sistema para, de esta forma, integrar los posibles colapsos mecánicos que puedan existir al interior de la columna de material quebrado, que terminan por generar un exceso de presión sobre el barro impulsándolo para salir por el punto de extracción. En este ámbito, el desarrollo de modelos físicos que integren el problema de flujo granular en

condiciones saturadas, también supondría una importante herramienta para ahondar en el estudio de estos fenómenos.

Por otro lado, también se recomienda continuar la investigación sobre la simulación del drenaje del medio aplicando la ecuación de Brinkman, u otra ley que considere efectos inerciales, para describir el flujo en régimen transitorio. De esta forma, se podría hacer una comparación más acabada entre ambas ecuaciones de flujo en toda la evolución temporal del sistema, y no sólo la comparación de los caudales máximos obtenidos en el estado de carga máxima sobre el punto de extracción como se hizo en la presente memoria. En cualquier caso, se debe avanzar en la utilización de un código de simulación que permita incorporar en el análisis el proceso de drenaje de poros de manera más estricta a lo que permite COMSOL.

Finalmente, en virtud de lo expuesto en esta memoria, se recomienda que las mineras hagan un muestreo constante del material fragmentado ubicado sobre los puntos de extracción como forma de monitorear las conductividades hidráulicas asociadas, junto con aplicar algún método de prospección para ubicar posibles fuentes de agua subterránea que pudiesen ser alcanzadas por las columnas de extracción. En este ámbito, cualquier tipo de esfuerzo dirigido a caracterizar este tipo de eventos, y de las condiciones del medio granular y fracturado donde estos eventos ocurren, son elementos fundamentales para poder plantear modelos hidrogeológicos que pretendan representar los mecanismos de generación. Resulta de suma importancia que exista acceso a la información sobre las características y condiciones de los eventos ocurridos en pos de estudiar el fenómeno de forma más eficiente y poder obtener recomendaciones operativas tangibles para minimizar su ocurrencia. El desafío más importante, corresponde a aclarar cuál es el mecanismo más probable de generación de los bombeos, de forma de poder establecer los modelos para estudiarlos con mayor precisión.

# Bibliografía

- Ahmed, H. M., Eberhardt, E., & Dunbar, W. S. (2014). Interaction between block caving and rock slope deformation kinematics as a function of cave position and orientation of discontinuities. *Mining Technology*, 123(3), 140–148.
- Basaure, K. A. (2014). *Caracterización geotécnica de mineral saturado de Mina Diablo Regimiento, Codelco, División el Teniente*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York: American Elsevier Publishing Company.
- Bear, J., & Cheng, A. H.-D. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Netherlands: Springer.
- Beavers, G. S., & Joseph, D. D. (1967). Boundary conditions at a naturally permeable wall. *Journal of Fluid Mechanics*, 30 (part 1), 197-207.
- Brown, E. T. (2002). *Block caving geomechanics*. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Center.
- Butcher, R., Joughin, W., & Stacey, T. R. (2000). An investigation of methods to combat mudrushes in diamond and base metal mines. South Africa: Safety in Mines Research Advisory Committee.
- Butcher, R., Stacey, T. R., & Joughin, W. C. (2005). Mud rushes and methods of combating them. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105, 817–824.
- Castro, R. L., Fuenzalida, M. A., & Lund, F. (2014). Experimental study of gravity flow under confined conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 164–169.
- Chan, H. C., Huang, W. C., Leu, J. M., & Lai, C. J. (2007). Macroscopic modeling of turbulent flow over a porous medium. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(5), 1157–1166.
- COMSOL Multiphysics. (2013). Comsol Multiphysics Reference Manual. *Manual*, 1–1262.
- Drouin, M., Grégoire, O., & Simonin, O. (2013). A consistent methodology for the derivation and calibration of a macroscopic turbulence model for flows in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 401–413.
- Durlofsky, L., & Brady, J. F. (1987). Analysis of the Brinkman equation as a model for flow in porous media. *Phys. Fluids*, 30, 281–294.
- Kvapil, R. (1965). Gravity flow of granular materials in hoppers and bins. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2, 25–41.
- Laptev, V. (2003). *Numerical solution of coupled flow in plain and porous media*. Ph.D. thesis.

Technical University of Kaiserslautern. Germany.

- Laubscher, D. (2000). A Practical Manual On Block Caving - International Caving Study (1997 - 2000).
- Marušić-Paloka, E., Pažanin, I., & Marušić, S. (2012). Comparison between Darcy and Brinkman laws in a fracture. *Applied Mathematics and Computation*, 218, 7538–7545.
- Melo, F., Vivanco, F., & Fuentes, C. (2009). Calculated isolated extracted and movement zones compared to scaled models for block caving. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(4), 731–737.
- Melo, F., Vivanco, F., Fuentes, C., & Apablaza, V. (2008). Kinematic model for quasi static granular displacements in block caving: Dilatancy effects on drawbody shapes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2), 248–259.
- Montecino, N. (2011). *Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de Block/Panel Caving*. Tesis para optar al grado de Magíster en Minería. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile.
- Nedderman, R. M., & Tüzün, U. (1979). A kinematic model for the flow of granular materials. *Powder Technology*, 22(2), 243–253.
- Nield, D. a, & Bejan, A. (2006). *Convection in Porous Media, 3rd ed.* New York: Springer.
- Popov, P., Qin, G., Bi, L., Efendiev, Y., Ewing, R., & Li, J. (2009). Multiscale methods for modeling fluid flow through naturally fractured carbonate karst reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 12, 218–231.
- Rashidi-Nejad, F., Suorineni F. T., & Asi, B. (2014). Open pit or block caving? A numerical ranking method for selection. *2014 SOMP Annual Meeting*, 183-199.
- Sánchez, K. (2017). *Modelamiento numérico de flujo de agua subterránea en la operación de Block/Panel Caving*. Tesis para optar al grado de Magíster en Minería. Departamento de Ingeniería de Minas. Universidad de Chile.
- Servicio de Evaluacion Ambiental SEA. (2012). *Guia para el uso de modelos de aguas subterranas en el SEIA*.
- Shi, Z., & Wang, X. (2007). Comparison of Darcy's Law, the Brinkman Equation, the Modified N-S Equation and the Pure Diffusion Equation in PEM Fuel Cell Modeling. *Proceeding of the COMSOL Conference, Boston*.
- Soulaine, C. (2015). Direct numerical simulation in fully saturated porous media. *Stanford University*. Retrieved from [http://web.stanford.edu/~csoulain/PORE\\_SCALE/Chap2.pdf](http://web.stanford.edu/~csoulain/PORE_SCALE/Chap2.pdf)
- Trueman, R., Castro, R., & Halim, A. (2007). Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(7), 1044–1051.

- Vyazmensky, A., Elmo, D., & Stead, D. (2010). Role of rock mass fabric and faulting in the development of block caving induced surface subsidence. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(5), 533–556.
- Woo K., Eberhardt, E., Elmo, D., Stead, D. (2013). Empirical investigation and characterization of surface subsidence related to block cave mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 31–42.

## **Anexos**

# Anexo A

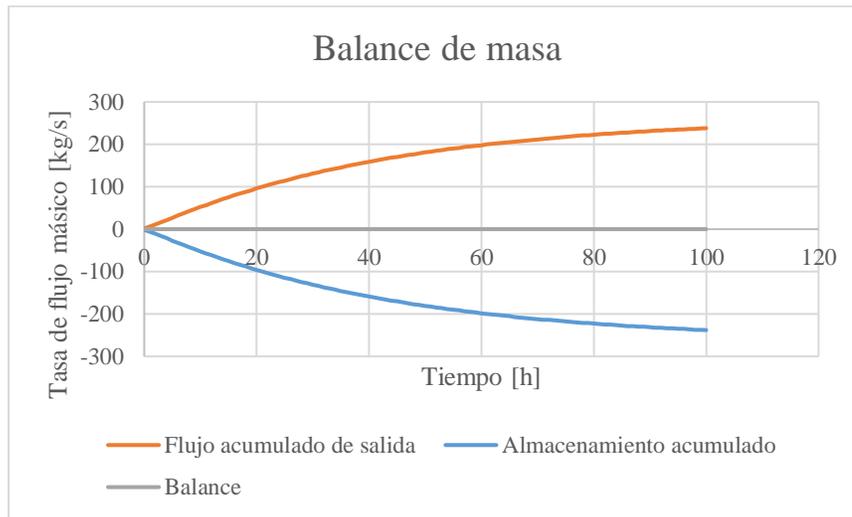


Gráfico A.1: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-7}$  m/s,  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

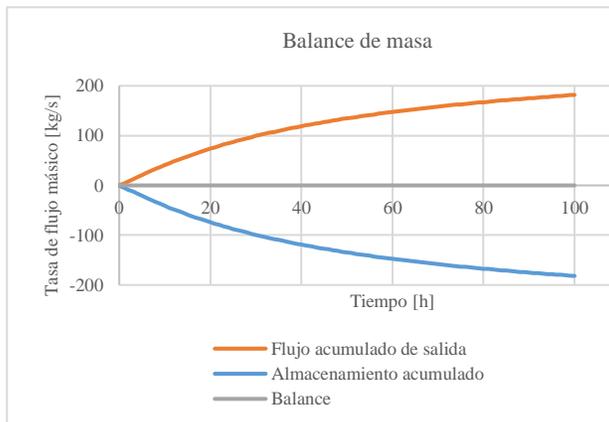


Gráfico A.2: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-8}$  m/s,  $K_{elipse}=1.4 \times 10^{-5}$  m/s.

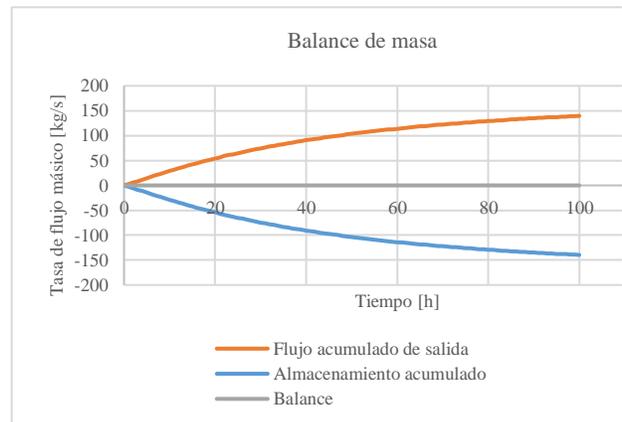


Gráfico A.3: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1 \times 10^{-5}$  m/s.

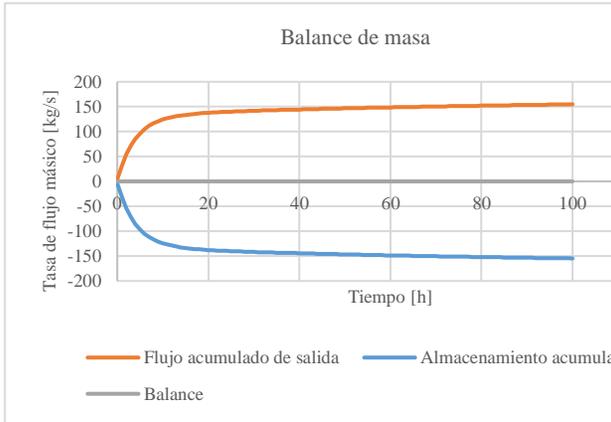


Gráfico A.4: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1 \times 10^{-4}$  m/s.

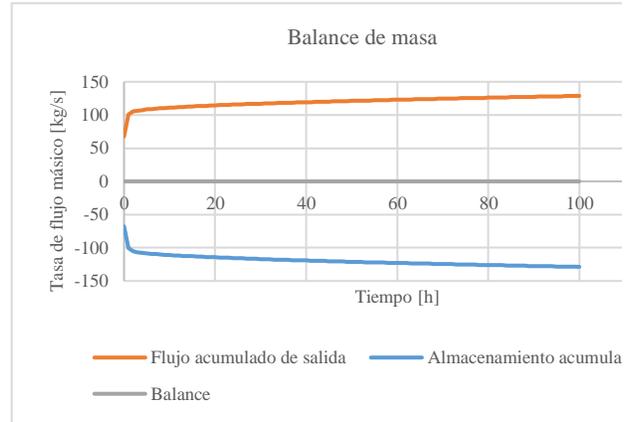


Gráfico A.5: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación.  $K_{granular}=1 \times 10^{-9}$  m/s,  $K_{elipse}=1 \times 10^{-3}$  m/s.

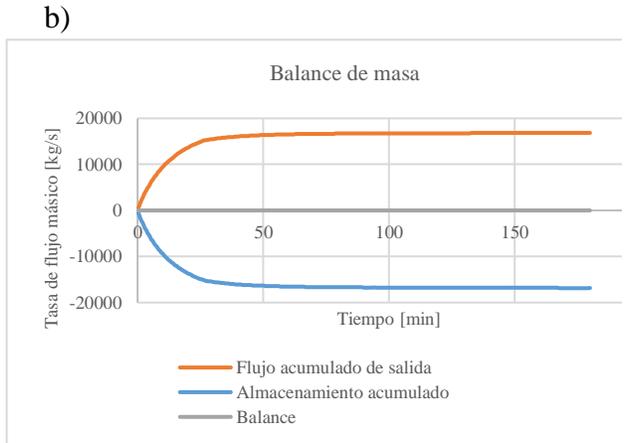
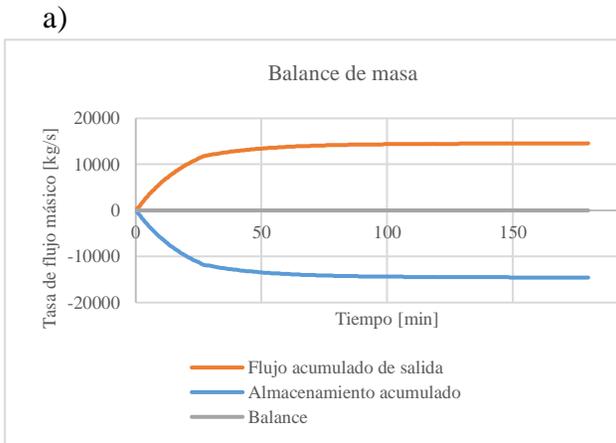
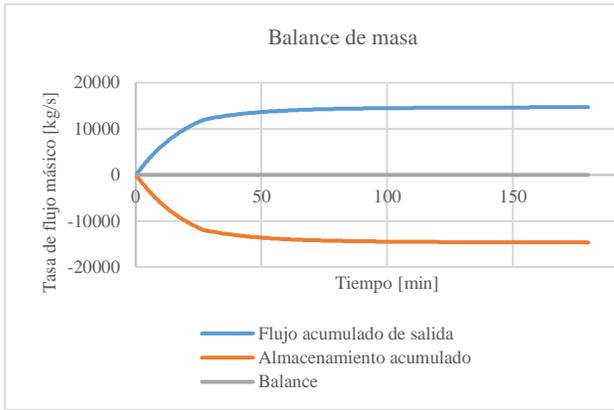


Gráfico A.6:  $L=100$  Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación. Longitud de la vía preferencial de flujo: 100 m. a)  $K(VPF.)=1 \times 10^{-2}$  m/s. b)  $K(VPF.)=1 \times 10^{-1}$  m/s.

a)



b)

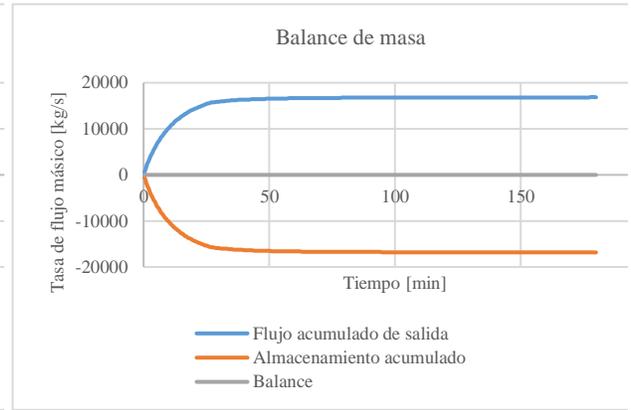
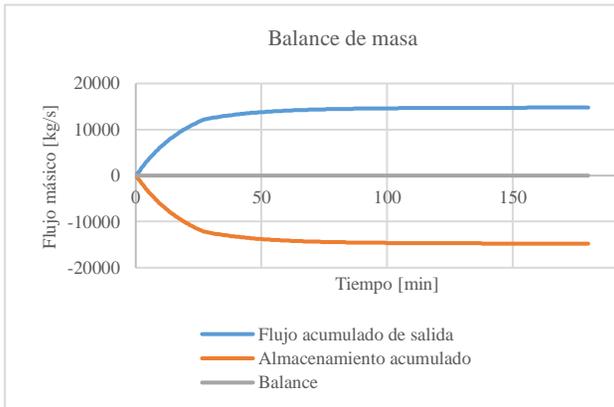


Gráfico A.7: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación. Longitud de la vía de flujo preferencial: 106.5 m. a)  $K(VPF)=1 \times 10^{-2}$  m/s. b)  $K(VPF)=1 \times 10^{-1}$  m/s.

a)



b)

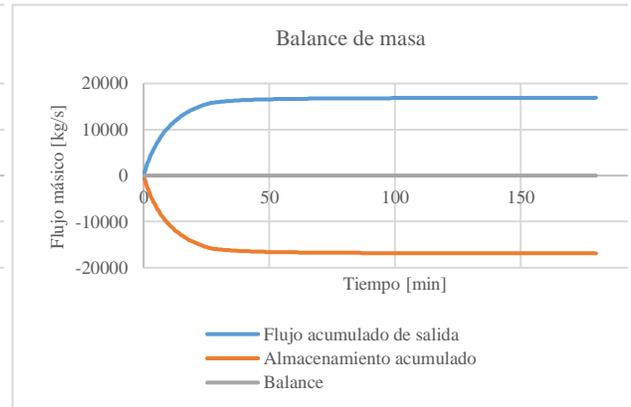
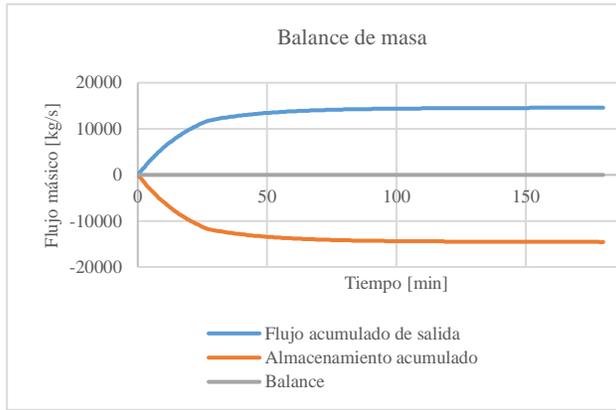


Gráfico A.8: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación. Longitud de la vía de flujo preferencial: 117.5 m. a)  $K(VPF)=1 \times 10^{-2}$  m/s. b)  $K(VPF)=1 \times 10^{-1}$  m/s.

a)



b)

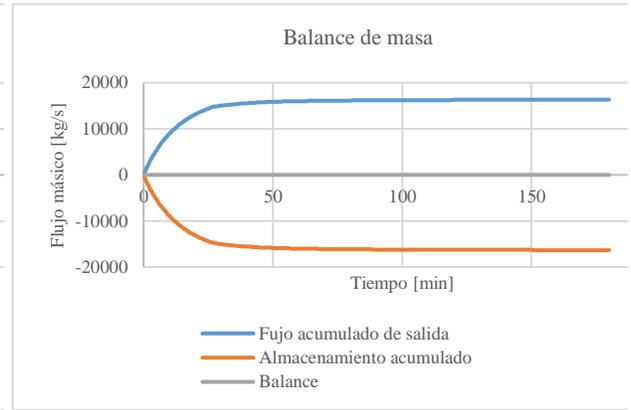
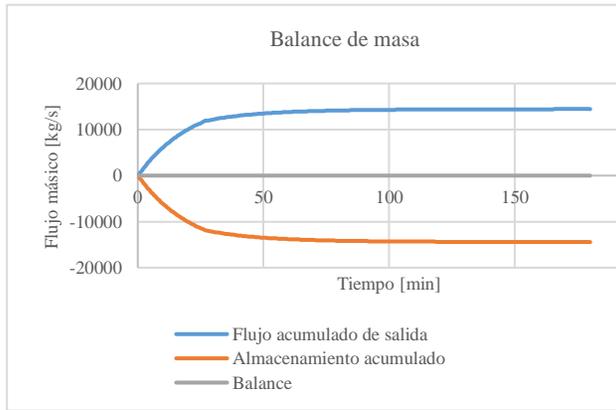


Gráfico A.9: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación. Longitud de la vía de flujo preferencial: 132.3 m. a)  $K(VPF)=1 \times 10^{-2}$  m/s. b)  $K(VPF)=1 \times 10^{-1}$  m/s.

a)



b)

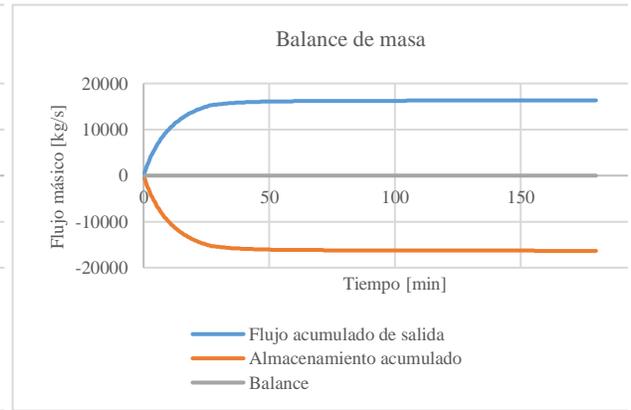


Gráfico A.10: Tasa de flujo másico en función del tiempo de simulación. Longitud de la vía de flujo preferencial: 142.5 m. a)  $K(VPF)=1 \times 10^{-2}$  m/s. b)  $K(VPF)=1 \times 10^{-1}$  m/s.

## Anexo B

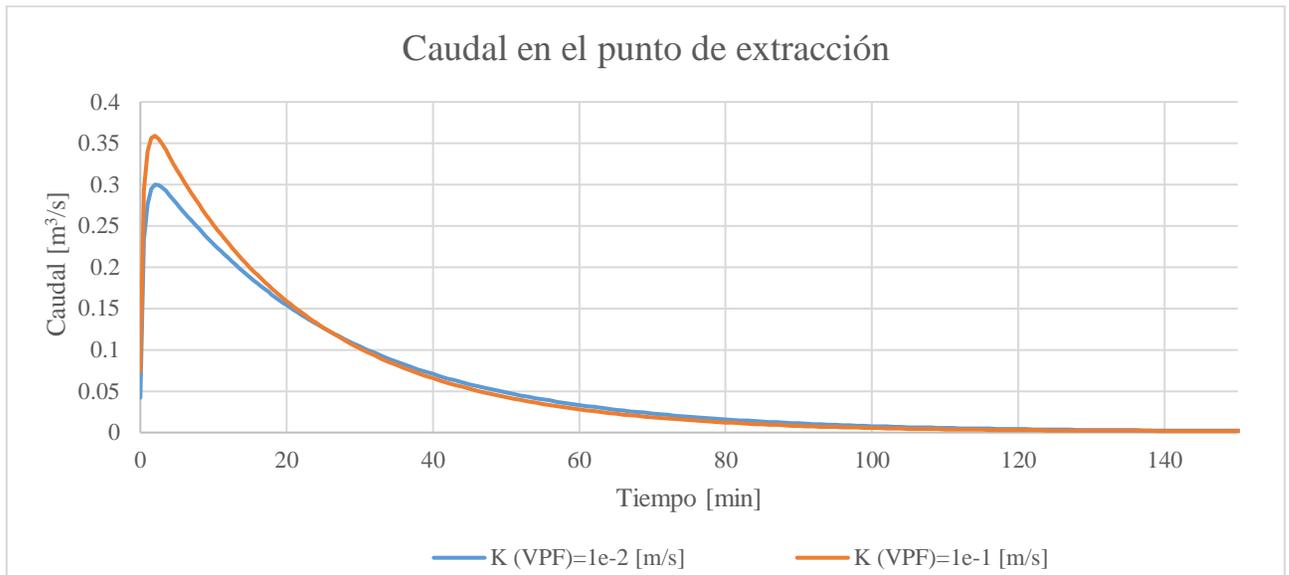


Gráfico B.11: Evolución temporal del caudal en el punto de extracción para vía preferencial de flujo de 100 m.

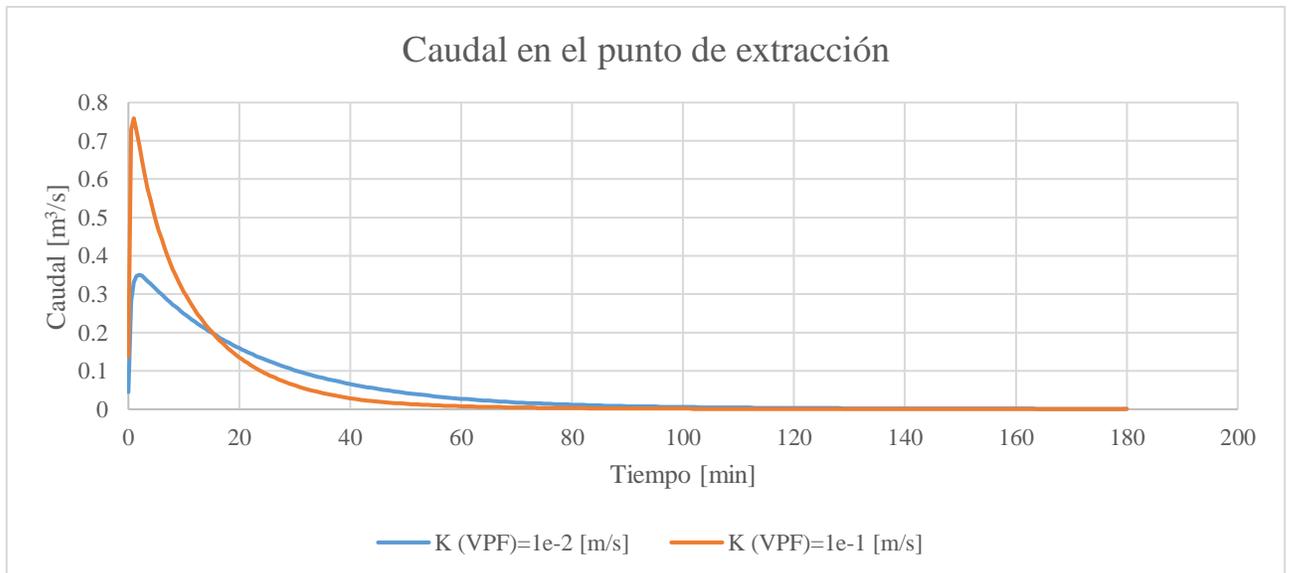


Gráfico B.12: Evolución temporal del caudal en el punto de extracción para vía preferencial de flujo de 106.5 m.

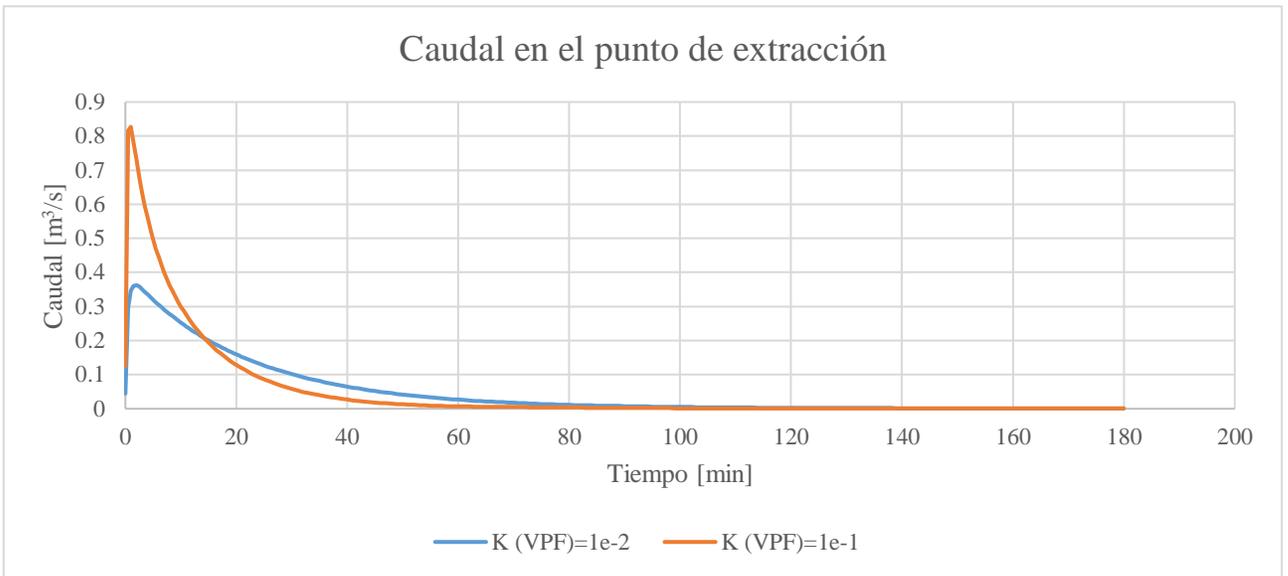


Gráfico B.13: Evolución temporal del caudal en el punto de extracción para vía preferencial de flujo de 117.5 m.

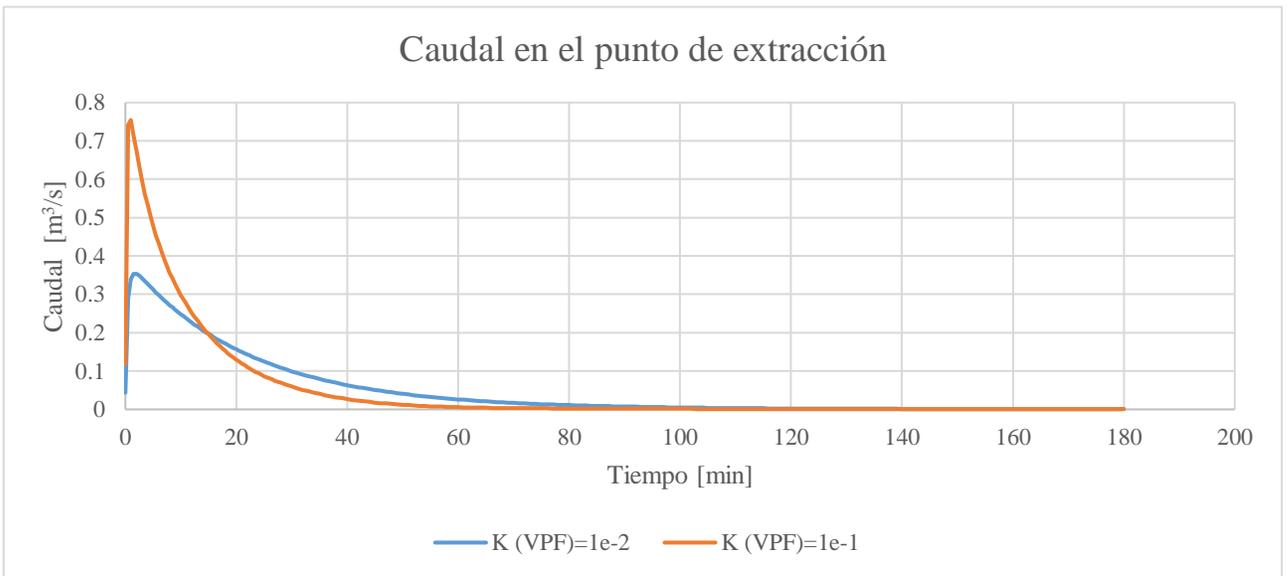


Gráfico B.14: Evolución temporal del caudal en el punto de extracción para vía preferencial de flujo de 142.5 m.