

ANEXO 23

ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO

SE INCLUYE:

- IBIC-RET-664-GE-001: ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA
- IBIC-RET-674-GE-001: ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO ACOPIO DE ARENAS



LUMINA COPPER CHILE S.A.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVES PROYECTO
CASERONES**

INFORME TÉCNICO N° IBIC-RET-664-GE-001

**ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO DEPÓSITO DE
LAMAS LA BREA**

AKER SOLUTIONS	
<input type="checkbox"/>	APROBADO
<input type="checkbox"/>	APROBADO EXCEPTO NOTAS
<input type="checkbox"/>	CORREGIR Y REEMITIR EN NUEVA VERSIÓN
_____	_____
Firma Revisor	Fecha

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCION
A	Nombre	RMA	JCZ	SBV	Coordinación Interna
	Firma				
	Fecha	05.10.09	05.10.09	05.10.09	
B	Nombre	RMA	JCZ	SBV	Revisión y Aprobación Aker Solutions
	Firma				
	Fecha	07.10.09	07.10.09	07.10.09	
	Nombre	JCZ	JCZ	SBV	Revisión y Aprobación Aker Solutions. Incluye comentarios Lumina
	Firma				
	Fecha	21.10.09	21.10.09	21.10.09	

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVES PROYECTO CASERONES**

**ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO
DEPÓSITO DE LAMAS LA BREA**

CONTENIDO

1	INTRODUCCION	3
2	ALCANCE	3
3	EXCLUSIONES	3
4	REFERENCIAS	4
5	METODOLOGÍA.....	4
6	GEOMETRIA	5
7	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	7
8	RESULTADOS	10
9	CONCLUSIONES	14

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A Salidas programa SEEP/W

1 INTRODUCCION

Minera Lumina Copper Chile S.A., en adelante MLCC, ha solicitado a **ARCADIS Geotécnica** el desarrollo de la Ingeniería Básica del proyecto Caserones, que contempla, entre otros aspectos, la disposición de 1.000 millones de toneladas de relaves. La solución adoptada considera, por una parte, un depósito de arenas el cual se ha proyectado inmediatamente aguas abajo de la planta concentradora en el sector denominado Caserones Bajo, y, por otra parte, un depósito de lamas proyectado en la quebrada denominada La Brea.

El objetivo de este estudio es determinar el potencial caudal que se infiltraría en el acuífero natural producto de la acumulación de agua de proceso en la laguna de clarificación. Para simular esta filtración se ha desarrollado un modelo simplificado que considera los aspectos geológicos e hidrogeológicos, suponiendo condiciones favorables para el drenaje (condición conservadora).

El diseño del depósito de lamas considera la instalación de un potente sistema de drenaje basal, impermeabilización del talud de aguas arriba del muro, captación y desvío de aguas superficiales, control de la laguna de aguas claras, monitoreo sistemático, etc. todo lo cual en su conjunto, minimizará al máximo los eventuales aportes de aguas de proceso a los acuíferos naturales. En este contexto, el modelamiento que se realizó, permitió cuantificar los “eventuales” aportes al acuífero por efectos de filtraciones, bajo distintos escenarios conservadores.

Para confeccionar el modelo de análisis para la estimación de filtraciones en el depósito de lamas se cuenta con los antecedentes geológicos-geotécnicos y parámetros geo-hidráulicos determinados en las exploraciones existentes, además de datos asociados a la geometría del depósito, ubicación y dimensiones de la laguna de clarificación para distintos años de operación. Asimismo, se cuenta con mediciones del nivel de agua al interior de los sondajes ejecutados en este sector.

2 ALCANCE

El alcance del presente documento es:

- Evaluar las potenciales filtraciones que escurrirán hacia el acuífero, debido a la presencia de la laguna de clarificación, resultante de la depositación de las lamas.

3 EXCLUSIONES

No forma parte del alcance de este documento lo siguiente:

- Estudio hidrogeológico del sector
- Identificación del nivel estático y dinámico de las aguas subterráneas
- Modelo hidrogeológico de la cuenca

4 REFERENCIAS

- Ref. 1 Informe Análisis Estabilidad Seudo Estático 2D Muro Contención Depósito Lamas. (IBMR-RET-664-GE-001 Rev. C) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 2 Informe Estimación de Filtraciones Depósito de Lamas La Brea. (IBGG-RET-664-GE-001 Rev. C) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 3 Informe Caracterización Geotécnica de Lamas. (IBMR-RET-664-GE-005 Rev. B2) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 4 Informe de Prospecciones y Ensayos. (IBMR-RET-664-GE-003) preparado por ARCADIS Geotécnica, 2009.
- Ref. 5 Informe Geológico-Geotécnico Depositación de Lamas La Brea. (IBMR-RET-664-GE-002) preparado por ARCADIS Geotécnica, 2009.

5 METODOLOGÍA

Con el fin de estimar el potencial volumen de infiltraciones que escurrirán desde la laguna de clarificación hacia el acuífero natural, se generó un modelo de elementos finitos en el cual se ingresaron las propiedades hidráulicas de los distintos materiales que intervienen en el problema. Cabe señalar que los estudios hidrogeológicos desarrollados por terceros, ubican el nivel freático bajo el depósito aluvial, en la zona de contacto con la roca, donde ésta se presenta fracturada.

A partir de los ensayos de infiltración realizados en los sondajes (Ref. 2, 4 y 5) fue posible definir un perfil de permeabilidades el cual reflejó que existen 3 unidades hidrogeológicas (distintas permeabilidades) sobreyaciendo a la roca impermeable. La primera unidad corresponde a un material aluvial de alta permeabilidad, bajo el cual se encuentra un nivel de depósitos aluviales de permeabilidad ligeramente más baja. Bajo los depósitos aluviales, se encuentra un estrato de roca fracturada con conductividad hidráulica mayor a la de este último. Como ya se mencionó, el nivel freático natural de la quebrada fue modelado en el contacto suelo-roca fracturada. Los espesores y permeabilidades de las distintas unidades se detallan más adelante en este informe. Las lamas fueron modeladas adoptando los valores de permeabilidad reportados en los ensayos específicos efectuados (ref. 3). Adicionalmente, el dren correspondiente al muro de enrocado fue modelado con una sección y con una permeabilidad acorde a obras de similares características.

El modelo abarca desde 1700 m aguas arriba del coronamiento del muro de enrocado hasta el pie del talud de aguas abajo del muro del depósito, donde afloran las soluciones transportadas a través de los drenes en una piscina recolectora. No ha sido considerado el depósito completo hacia aguas arriba, debido a que tal como se mencionó precedentemente, el objetivo del modelo ejecutado es estimar las potenciales filtraciones que se producirán

desde la laguna de clarificación hacia la roca fracturada, por lo que se consideró sólo la zona por donde se desarrollarían estos flujos.

Para evaluar distintos períodos de crecimiento del muro se analizaron 4 diferentes altura del depósito de lamas. Para estos 4 casos se consideró conservadoramente que la laguna de clarificación posee una profundidad máxima de 9.0 m. A su vez, las lamas se modelaron depositadas con una pendiente de 2.25%.

Finalmente, se definieron 6 secciones de control de tal forma de medir los caudales que el modelo entrega. Una de estas secciones registra el caudal base en la roca fracturada producto del acuífero natural y otra registra el caudal total en la roca fracturada producto de las infiltraciones de la laguna de clarificación y el caudal base. Por lo tanto, el caudal que se infiltra al acuífero desde la laguna, se calcula como la diferencia entre ambos registros.

6 GEOMETRIA

Tal como se mencionó precedentemente, el modelo se extiende desde el pie del talud de aguas abajo del muro, hasta 1700 m agua arriba del coronamiento del muro del depósito, tal como se indica en la Figura N° 6-1.

El nivel freático se ubicó de acuerdo lo indicado en el Informe de Estimación de Filtraciones Depósito de Lamas La Brea (Ref. 2), esto es, en el contacto entre el material aluvial y la roca fracturada.

Las cotas del punto superficial de las lamas en el contacto con el muro, se indican para los 4 casos analizados en la siguiente tabla:

Tabla N° 6-1 Cotas de casos analizados

Caso	Cota superficie lamas en contacto con muro (msnm)	Altura c/r a punto más bajo de lamas (m)
1	2923	50
2	2973	100
3	3023	150
4	3084	211

La geometría del modelo, donde se observan los 4 casos analizados, se presenta en la Figura N° 6-1:

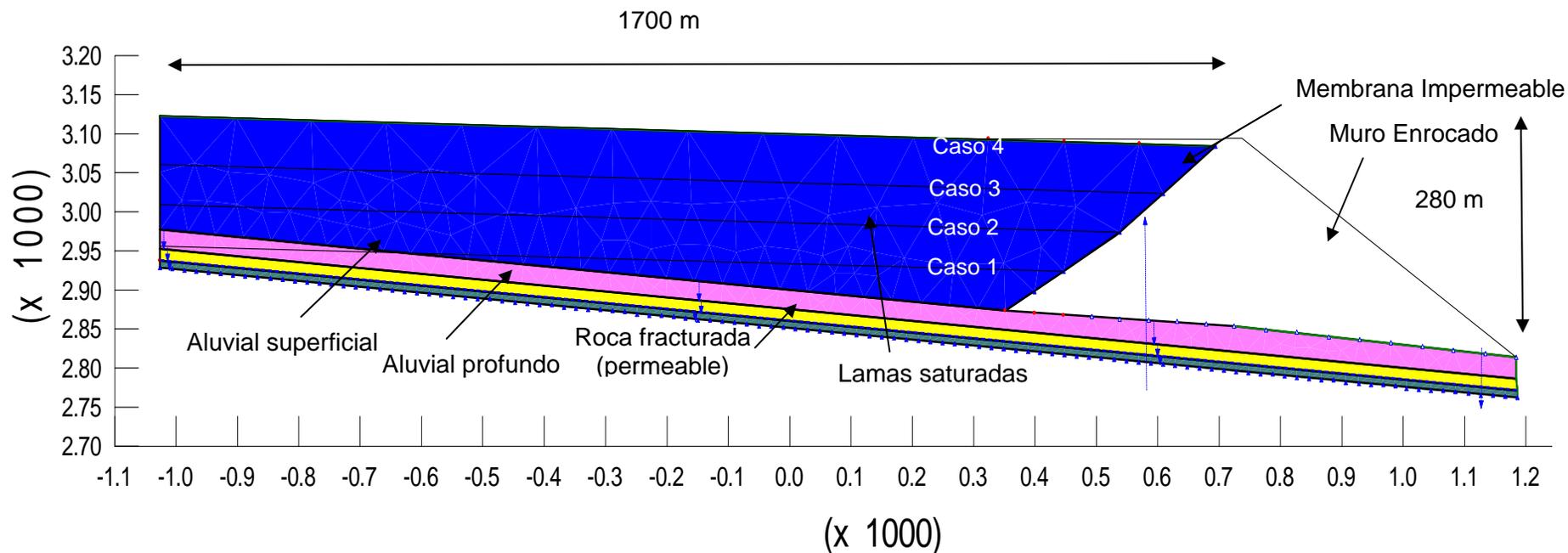


Figura N° 6-1 Geometría modelo y casos analizados.

7 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Analizando los distintos ensayos de permeabilidad y conductividad hidráulica realizados en los sondajes, fue posible construir un perfil de permeabilidades para la zona de análisis (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Este perfil muestra que existe un material aluvial de alta permeabilidad, el cual se encuentra sobreyaciendo bolsones de materiales de menor permeabilidad. Estos materiales se encuentran sobre una unidad de roca fracturada, la que posee una permeabilidad mayor a la de los bolsones mencionados. Para modelar esta situación y teniendo en consideración lo descrito en el Informe de Estimación de Filtraciones Depósito de Lamas La Brea (Ref. 2), se asumieron 3 unidades hidrogeológicas sobre la roca impermeable, las cuales tienen las propiedades que se indican en la Tabla N° 7-1.

Tabla N° 7-1 Propiedades de materiales terreno de fundación

Material	Espesor (m)	Permeabilidad vertical k_v (cm/s)	Permeabilidad horizontal k_h (cm/s)
Aluvial Superficial	25	6.0×10^{-3}	6.0×10^{-2}
Aluvial Profundo	15	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-3}
Roca Fracturada	10	8.0×10^{-4}	8.0×10^{-3}

Estas propiedades fueron definidas conservadoramente de tal forma de obtener la mayor infiltración de caudales hacia el acuífero a través de la roca fracturada.

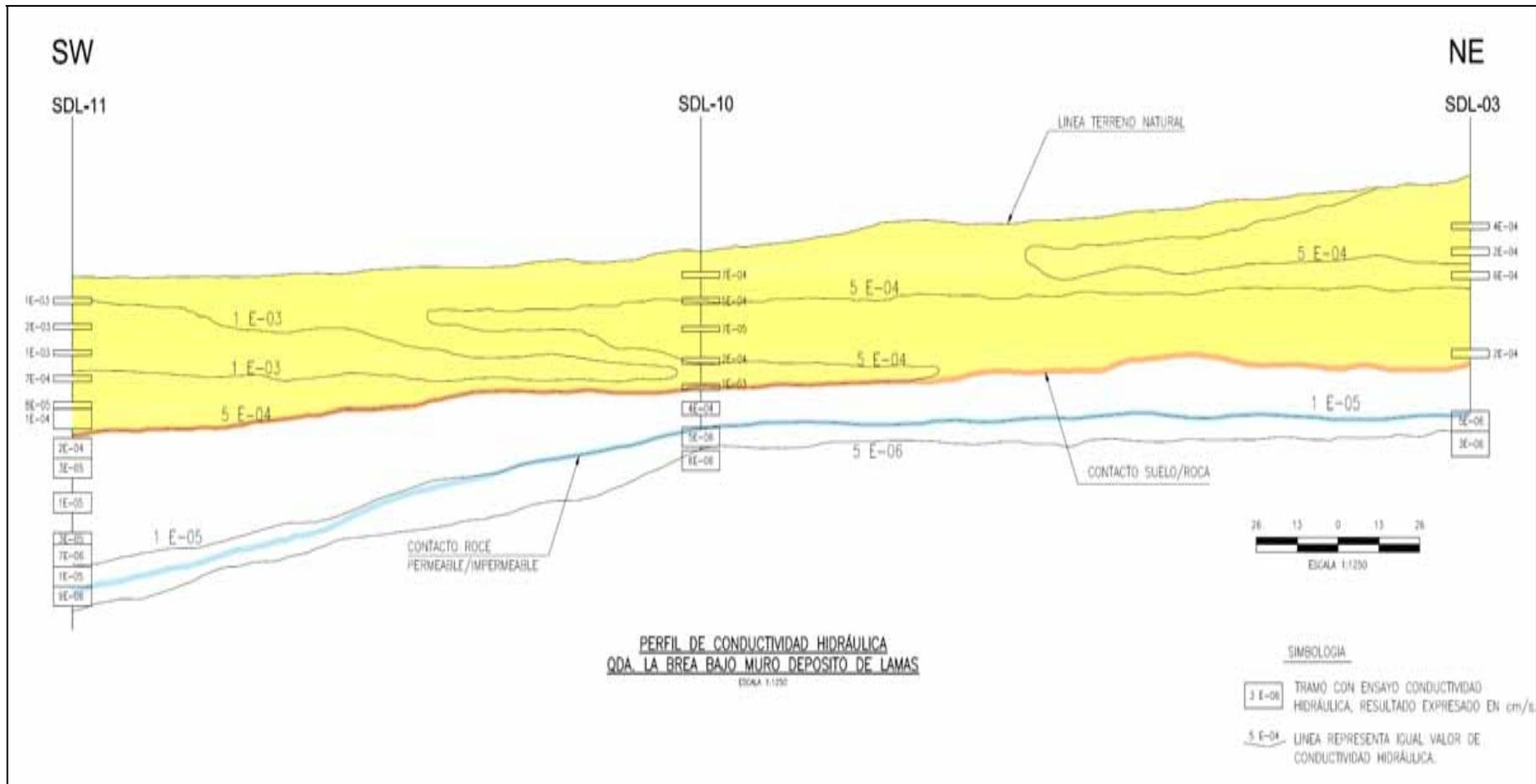


Figura N° 7-1 Perfil de permeabilidades

Junto con las propiedades recién mencionadas, el software SEEP/W requiere la definición de funciones hidráulicas, las cuales modelan la variación de la conductividad hidráulica (o permeabilidad) y la variación del contenido de agua, en función de la presión de succión. Para ambas funciones se utilizaron modelos incorporados en el software, los cuales consideran el tipo de material que se está analizando (gravas bien graduadas, limos, roca fracturada, etc.). A modo de ejemplo, para el caso del aluvial superficial, la función de conductividad hidráulica se presenta en la Figura N° 7-2. Cabe destacar que para la definición de esta función sólo es necesario el ingreso de la permeabilidad saturada (ver Tabla N° 7-1).

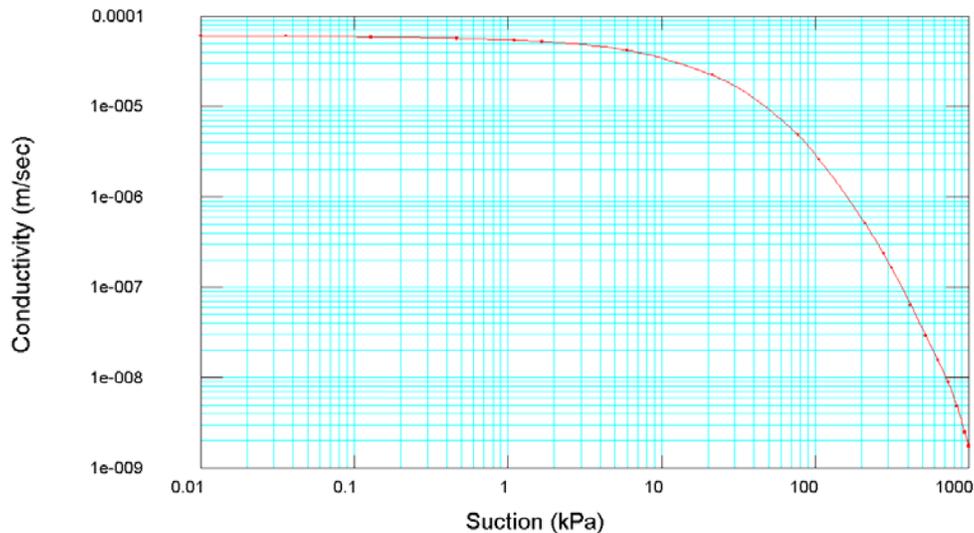


Figura N° 7-2 Función de conductividad hidráulica – Material Aluvial Superficial

Para la definición de la función que representa la variación del volumen de agua con la succión, el programa requiere el ingreso de 2 parámetros: el contenido de agua en la saturación (Φ_w) y el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v). Estos parámetros se calculan de la siguiente forma:

$$\Phi_w = nS$$

Donde:

n = porosidad del suelo
S = grado de saturación

$$m_v = \frac{C_c}{1 + e_0} .$$

Donde:

C_c = Coeficiente de consolidación obtenido del ensayo edométrico
 e_0 = Índice de vacíos inicial en el ensayo edométrico.

A partir de estas relaciones y los resultados de laboratorio realizados a los materiales del terreno de fundación y las lamas, se definió una función para cada uno éstos:

Función 1 – Terreno de fundación: $\Phi_{\omega} = 0.23$
 $m_v = 0$

Función 2 – Lamas: $\Phi_{\omega} = 0.51$
 $m_v = 3.90 \times 10^{-4} \text{ 1/kPa}$

A modo de ejemplo, en la Figura N° 7-3 se muestra la Función 1:

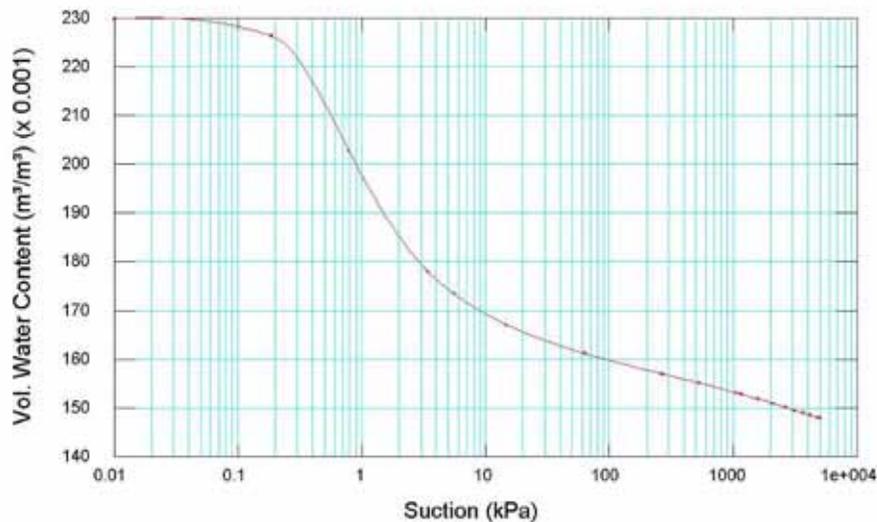


Figura N° 7-3 Función de contenido de agua – Función 1: Terreno de Fundación

8 RESULTADOS

Mediante distintas secciones de control ubicadas en distintas regiones del modelo fue posible determinar los caudales que fluían a través de éstas. Así se definieron 7 secciones de control las cuales tenían los siguientes objetivos:

Tabla N° 8-1 Ubicación y objetivos secciones de control

Sección de control	Estrato	Ubicación	Objetivo
SC 1	Roca Fracturada	Aguas arriba de laguna clarificación	Determinar el caudal base que fluye debido al acuífero
SC 2	Sección completa	Bajo el dren, medición aguas arriba	Determinar el caudal total que fluye debido al acuífero y a la infiltración del agua externa
SC 3	Dren	Dren	Determinar el caudal en el dren debido al acuífero y a la infiltración del agua externa
SC 4	Aluvial Superficial	Bajo el dren, medición aguas arriba	Determinar el caudal en el estrato debido al acuífero y a la infiltración del agua externa
SC 5	Aluvial Profundo	Bajo el dren, medición aguas arriba	Determinar el caudal en el estrato debido al acuífero y a la infiltración del agua externa
SC 6	Roca Fracturada	Bajo el dren, medición aguas arriba	Determinar el caudal en el estrato debido al acuífero y a la infiltración del agua externa
SC 7	Sección completa	Bajo el dren, medición aguas abajo	Chequear que el caudal medido sea menor que en SC2 debido al efecto de los drenes

Los distintos caudales entregados por el modelo (por unidad de ancho) se resumen en la Tabla N° 8-2. Así mismo, considerando un ancho de cuenca de 200 m, los caudales por unidad de ancho entregados por el modelo pueden ser traspasados a caudales totales. Éstos se presentan en la Tabla N° 8-3.

A modo de ejemplo la Figura N° 8-1 presenta las secciones de control y los resultados para el Caso 4.

El resto de las salidas del programa SEEP/W se muestran en el Anexo A de este informe.

Tabla N° 8-2 Potenciales caudales estimados por unidad de ancho y por unidad hidrogeológica

Caso	Cota lamas (msnm)	Caudales medidos (por unidad de ancho)														
		SC1			SC2			SC3		SC4		SC5		SC6		SC7
		Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	%	Q (m ³ /s)	
1	2923	2.12E-06	4.62E-05	100	2.93E-05	63	1.32E-05	29	9.71E-07	2	2.65E-06	6	4.54E-05			
2	2973	2.32E-06	4.63E-05	100	2.93E-05	63	1.32E-05	29	9.73E-07	2	2.66E-06	6	4.52E-05			
3	3023	2.60E-06	4.42E-05	100	2.71E-05	61	1.34E-05	30	9.88E-07	2	2.69E-06	6	4.41E-05			
4	3084	2.61E-06	4.32E-05	100	2.61E-05	60	1.33E-05	31	9.91E-07	2	2.78E-06	6	4.32E-05			

SC1 : Sección base
 SC2 : Sección total
 SC3 : Dren
 SC4 : Aluvial Superficial
 SC5 : Aluvial Profundo
 SC6 : Roca permeable
 SC7 : Roca aguas abajo

Tabla N° 8-3 Potenciales Caudales totales por unidad hidrogeológica (ancho = 200 m)

Caso	Caudales en la quebrada (200 m ancho)						
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7
	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)	Q (l/s)
1	0.42	9.24	5.86	2.64	0.19	0.53	9.08
2	0.46	9.26	5.86	2.64	0.19	0.53	9.04
3	0.52	8.84	5.42	2.68	0.20	0.54	8.82
4	0.52	8.64	5.22	2.66	0.20	0.56	8.64

Nota: Observando los resultados de la Tabla N° 8-2, se observa un “error de cierre” en la estimación de los potenciales caudales. En efecto, al comparar la sección SC2 y SC7, la diferencia es del orden de un 2%, el cual no tiene mayor influencia en los resultados finales.

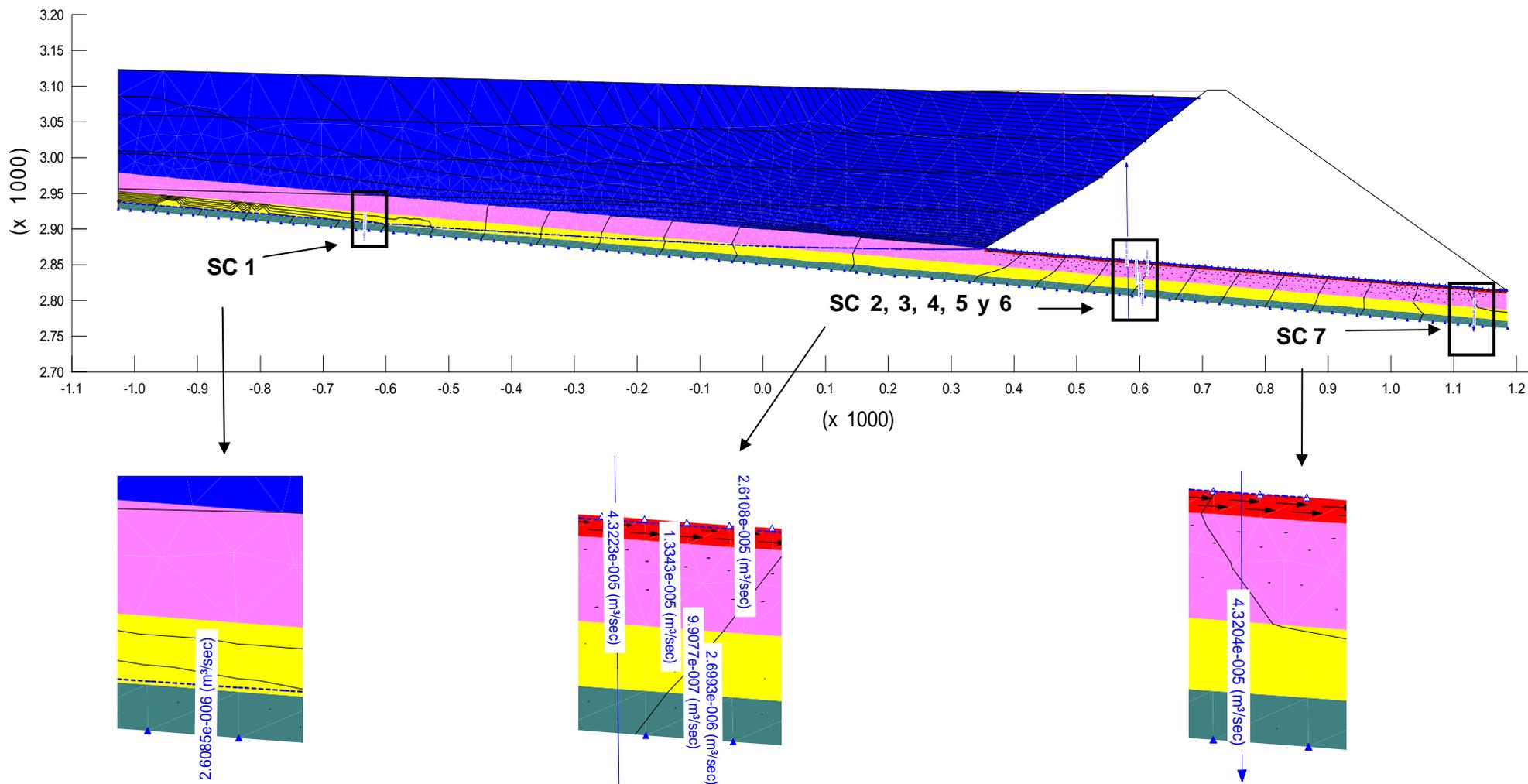


Figura N° 8-1 Secciones de control y resultados Caso 4

9 CONCLUSIONES

- El diseño del depósito de lamas considera la instalación de un potente sistema de drenaje basal, impermeabilización del talud de aguas arriba del muro, captación y desvío de aguas superficiales, control de la laguna de aguas claras, monitoreo sistemático, etc. todo lo cual en su conjunto, minimizará al máximo los eventuales aportes de aguas de proceso a los acuíferos naturales. En este contexto, el modelamiento que se realizó, permitió cuantificar los “eventuales” aportes al acuífero por efectos de filtraciones, bajo distintos escenarios conservadores.
- El objetivo del estudio fue determinar el potencial caudal que se infiltraría en el acuífero natural producto de la acumulación de agua de proceso en la laguna de clarificación. Para simular esta filtración se desarrolló un modelo simplificado que considera los aspectos geológicos e hidrogeológicos, suponiendo condiciones favorables para el drenaje (condición conservadora).
- El modelo generado considera la variación de permeabilidad en profundidad y el aporte de la laguna de clarificación con altura de agua máxima de 9 m. Esto último es una hipótesis conservadora.
- Se ha considerado como base que el nivel freático se ubica en la zona de contacto de la roca fracturada.
- Por el origen y forma de depositación del material aluvial se ha considerado una anisotropía en las propiedades geo-hidráulicas ($k_h = 10k_v$)
- De los resultados del modelo se obtiene:
 - La altura del nivel freático permanece constante a lo largo del contacto suelo-roca hasta una distancia dada, cercana al comienzo del dren. En este punto el agua comienza a embalsarse y el nivel freático se levanta alcanzando la cota del dren.
 - El agua de la laguna de clarificación define un nivel freático ubicado bajo ella. Estos flujos son conducidos hasta el punto donde comienza el dren y luego evacuados por éste.
 - Al observar la longitud de los vectores de velocidad de flujo bajo el muro, y considerando que la longitud de estos es proporcional a su magnitud, se verifica que las mayores velocidades se encuentran en el dren y disminuyen con la profundidad.
- El caudal medido en la sección de control ubicada en la roca fracturada bajo el muro (SC6) es del orden de $Q_{SC6} = 0.53$ l/s. Este caudal es producto de las infiltraciones producidas por la laguna de clarificación y por el caudal base producto del acuífero natural que fluye por la roca fracturada. De esta forma, para cuantificar el caudal externo aportado únicamente por la laguna de clarificación (Q_E), es necesario restar el caudal base medido en SC1 (Q_{SC1}), es decir:

$$Q_E = Q_{SC6} - Q_{SC1} = 0.53 - 0.42 = 0.11 \text{ l/s}$$

- Aproximadamente el 98% del potencial total de filtraciones escurriría por los materiales presentes sobre el nivel freático natural. De este volumen aproximadamente el 60% escurriría por el dren, lo que es consistente con el diseño y objeto de éste.
- Así, el potencial caudal externo, infiltrado al acuífero por efecto de la laguna de clarificación sería del orden 0.11 l/s. Este valor corresponde aproximadamente a un 2% de las filtraciones totales que produciría el depósito de lamas. Para efectos de análisis, se recomienda considerar conservadoramente que las filtraciones pudieran alcanzar hasta 1 l/s.

ANEXOS

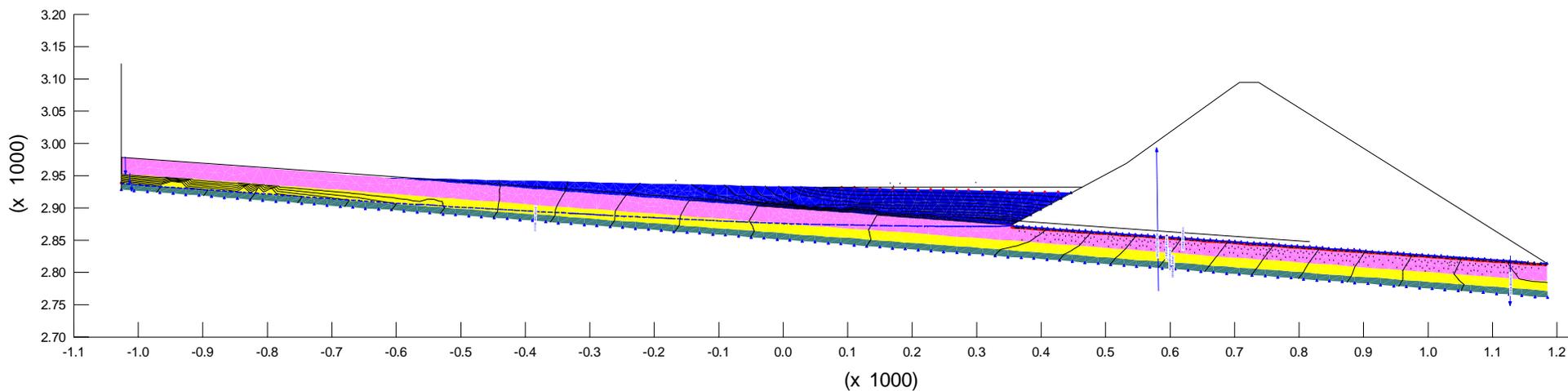


Figura A- 1 Caso 1 - Altura lamas h = 2923 msnm

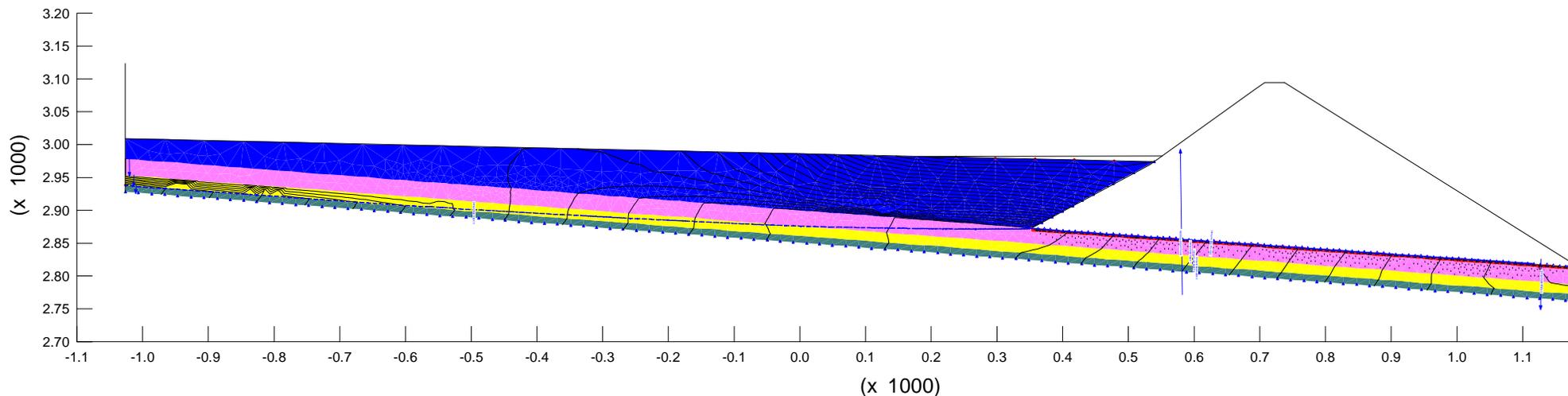


Figura A- 2 Resultados Modelo Caso 2 - Altura lamas $h = 2973$ msnm. Se observan las curvas equipotenciales y las líneas de flujo.

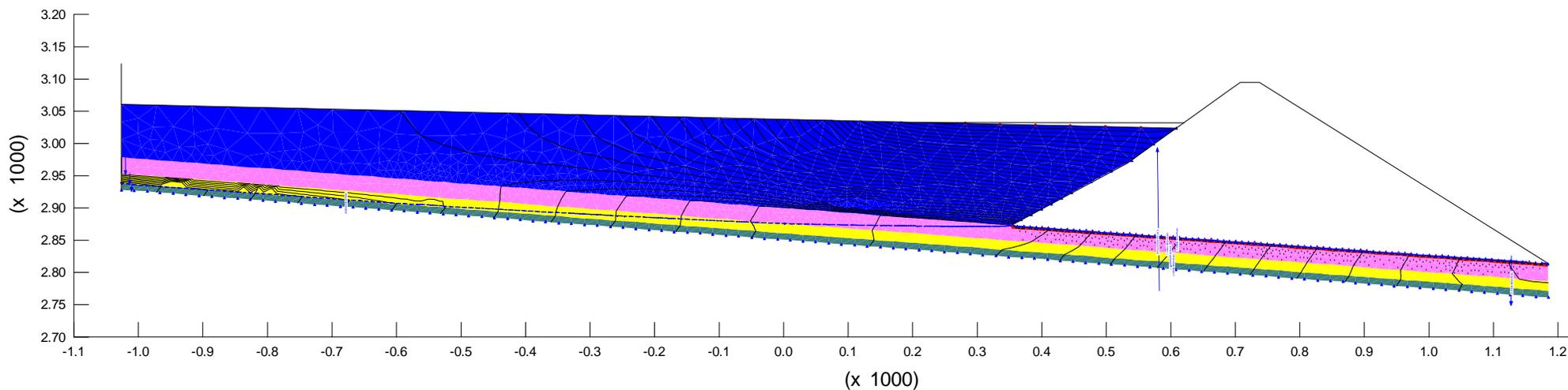


Figura A- 3 Resultados Modelo Caso 3 Altura lamas $h = 3023$ msnm. Se observan las curvas equipotenciales y las líneas de flujo.

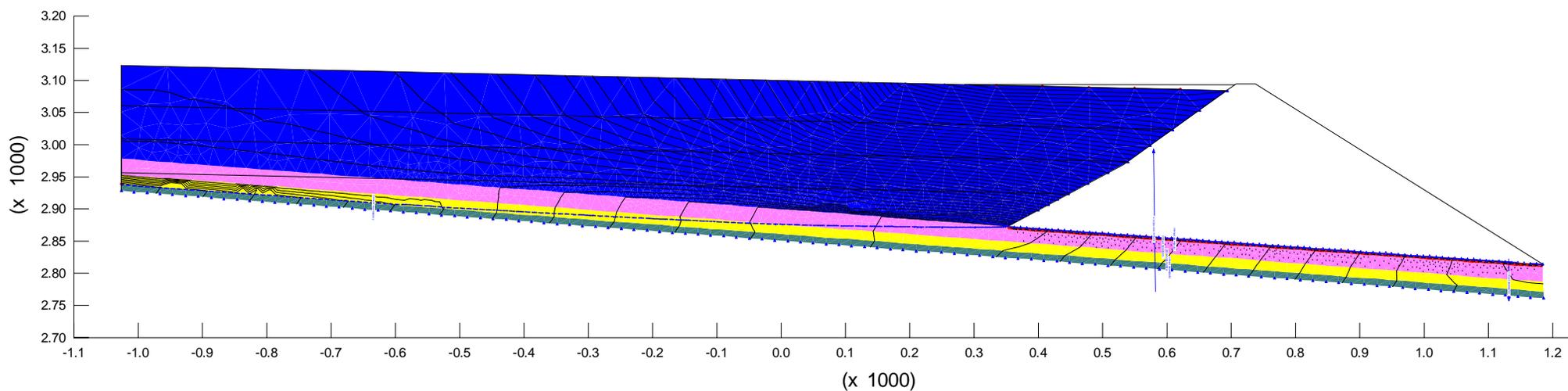


Figura A- 4 Resultados Modelo Caso 4 - Altura lamas $h = 3084$ msnm. Se observan las curvas equipotenciales y las líneas de flujo.

LUMINA COPPER CHILE S.A.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVES PROYECTO
CASERONES**

INFORME TÉCNICO N° IBIC-RET-674-GE-001

**ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUÍFERO ACOPIO DE
ARENAS**

AKER SOLUTIONS	
<input type="checkbox"/>	APROBADO
<input type="checkbox"/>	APROBADO EXCEPTO NOTAS
<input type="checkbox"/>	CORREGIR Y REEMITIR EN NUEVA VERSIÓN
_____	_____
Firma Revisor	Fecha

REV.		Ejecutor	Revisor	Aprobador	DESCRIPCION
A	Nombre Firma	SMA/JLZ	JCZ	SBV	Coordinación Interna
	Fecha	05.10.09	05.10.09	05.10.09	
B	Nombre Firma	SMA/JLZ	JCZ	SBV	Revisión y Aprobación Aker Solutions
	Fecha	07.10.09	07.10.09	07.10.09	
	Nombre Firma	JCZ	JCZ	SBV	
	Fecha	21.10.09	21.10.09	21.10.09	

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD
MANEJO Y DEPOSITACIÓN DE RELAVES PROYECTO CASERONES
ESTIMACIÓN DE FILTRACIONES AL ACUIFERO ACOPIO DE ARENAS**

1	INTRODUCCION	3
2	ALCANCE	3
3	EXCLUSIONES	3
4	REFERENCIAS	4
5	METODOLOGÍA.....	4
6	GEOMETRIA	5
7	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	8
8	RESULTADOS	10
9	CONCLUSIONES	13

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A Salidas programa SEEP/W

1 INTRODUCCION

Minera Lumina Copper Chile S.A., en adelante MLCC, ha solicitado a **ARCADIS Geotécnica** el desarrollo de la Ingeniería Básica del proyecto Caserones, que contempla, entre otros aspectos, la disposición de 1.000 millones de toneladas de relaves. La solución adoptada considera, por una parte, un depósito de arenas el cual se ha proyectado inmediatamente aguas abajo de la planta concentradora en el sector denominado Caserones Bajo, y, por otra parte, un depósito de lamas proyectado en la quebrada denominada La Brea.

El objetivo de este estudio es determinar el potencial caudal que se infiltraría en el acuífero natural producto del escurrimiento del agua liberada durante la construcción del acopio de arenas. Para simular esta filtración se ha desarrollado un modelo simplificado que considera los aspectos geológicos e hidrogeológicos, suponiendo condiciones favorables para el drenaje (condición conservadora).

El diseño del acopio de arenas considera la instalación de un potente sistema de drenaje basal, captación y desvío de aguas superficiales, colocación controlada de las arenas, monitoreo sistemático, etc. todo lo cual en su conjunto, minimizará al máximo los eventuales aportes de aguas de proceso a los acuíferos naturales. En este contexto, el modelamiento que se realizó, permitió cuantificar los “eventuales” aportes al acuífero por efectos de filtraciones, bajo distintos escenarios conservadores.

Para confeccionar el modelo de análisis para la estimación de filtraciones en el acopio de arenas se cuenta con los antecedentes geológicos-geotécnicos y parámetros geo-hidráulicos determinados en las exploraciones existentes, además de datos asociados a la ubicación del sistema de drenaje basal y a la geometría del acopio para distintas etapas de operación. Asimismo, se cuenta con mediciones del nivel de agua al interior de los sondeos ejecutados en este sector.

2 ALCANCE

El alcance del presente documento es:

- Evaluar las potenciales filtraciones que escurrirán hacia el acuífero, debido al caudal generado por la depositación de las arenas.

3 EXCLUSIONES

No forma parte del alcance de este documento lo siguiente:

- Estudio hidrogeológico del sector
- Identificación del nivel estático y dinámico de las aguas subterráneas
- Modelo hidrogeológico de la cuenca

4 REFERENCIAS

- Ref. 1 Informe Estimación de Filtraciones Acopio de Arenas. (IBGG-RET-674-GE-001 Rev. C) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 2 Informe Caracterización Geotécnica de las Arenas. (IBMR-RET-674-GE-001 Rev. B3) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 3 Informe de Prospecciones y Ensayos. (IBMR-RET-674-GE-003 Rev. 0) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 4 Informe Geológico-Geotécnico Acopio de Arenas. (IBMR-RET-674-GE-003 Rev. 0) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.
- Ref. 5 Informe de Balance de Agua Acopio de Arenas. (IBMR-RET-674-HE-002 Rev. C) preparado por **ARCADIS Geotécnica**, 2009.

5 METODOLOGÍA

Con el fin de estimar el potencial volumen de infiltraciones que escurrirán hacia el acuífero natural, se generó un modelo de elementos finitos en el cual se ingresaron las propiedades hidráulicas de los distintos materiales que intervienen en el problema.

De acuerdo a lo indicado en el Informe de Filtraciones Acopio de Arenas (Ref. 1), el sistema de drenaje está diseñado para que no se generen niveles freáticos al interior del acopio.

A partir de los ensayos de infiltración realizados en los sondajes (Ref. 1, 3 y 4) fue posible definir un perfil de permeabilidades y/o conductividades hidráulicas, el cual reflejó que existen 2 unidades hidrogeológicas (distintas permeabilidades) sobreyaciendo a la roca impermeable. La primera unidad corresponde a un material aluvial de alta permeabilidad, que sobreyace a un estrato de roca fracturada con conductividad hidráulica menor en aproximadamente un orden de magnitud a la del nivel aluvial superior. Los espesores y permeabilidades de las distintas unidades se detallan más adelante en este informe. Las arenas fueron modeladas adoptando los valores de permeabilidad reportados en los ensayos geotécnicos efectuados (Ref. 2).

No se consideró una sección de análisis a lo largo del cauce de la quebrada, ya que en dicha modelación la existencia de un dren basal a lo largo del depósito, recogería la totalidad del caudal infiltrado a través de las arenas, con lo cual no se producirían infiltraciones hacia el acuífero natural. Luego, utilizando un criterio conservador, se definió una sección transversal al dren central, lo cual permite estimar los flujos que se producirán desde las arenas acopiadas, hacia los depósitos de suelo naturales existentes en las laderas y el cauce, esto con el fin de determinar el aporte de estos flujos al acuífero natural. La ubicación en planta de la sección analizada se presenta en la Figura N° 5.1.

En el informe de Balance de Agua (Ref. 5), se reporta que el caudal medio recuperado de las arenas depositadas corresponde a 230 l/s, obtenido a partir de una producción de relave de 125 ktpd considerando una concentración de sólidos en peso entre 68% y 72%, y una humedad retenida de las arenas de 11%. Este caudal se desarrollaría en 1 día y estaría

asociado a un área de escurrimiento aproximada de 180000 m². De está forma, se determinó un caudal de agua liberada por las arenas, por unidad de área, a partir del cual se estimó el caudal que se infiltraría en función del área de influencia de ésta. El valor de este caudal corresponde a 1.3×10^{-6} m³/seg

Para evaluar distintos períodos de crecimiento del acopio, se analizaron 3 diferentes etapas de crecimiento de este.

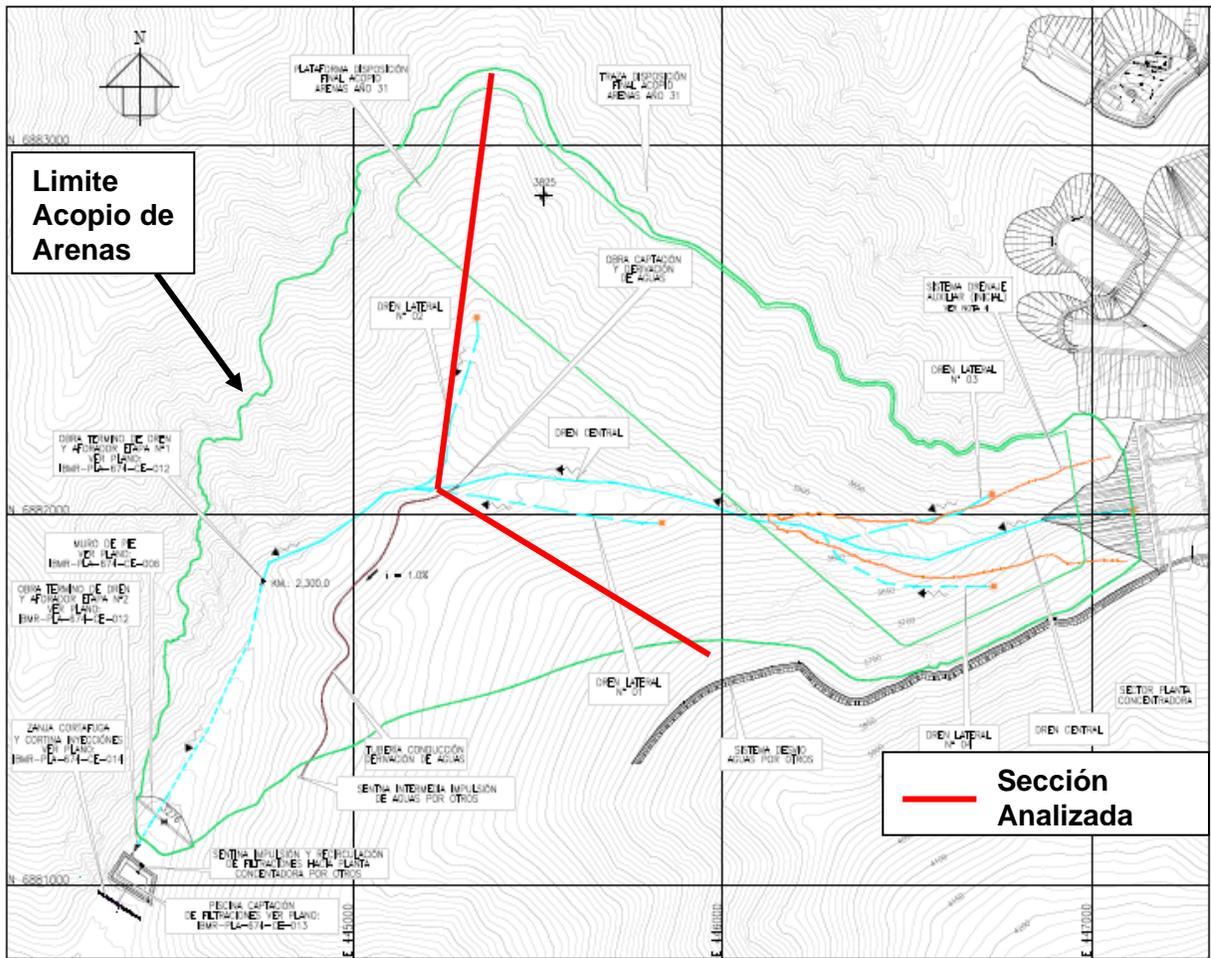


Figura N° 5-1 Ubicación en Planta Sección Analizada.

Finalmente, se definieron 2 secciones de control, de tal forma de cuantificar los caudales que que escurren por esas secciones y en particular, el modelo entrega. Estas secciones registran el caudal en la roca fracturada que se infiltra al acuífero natural desde cada una laderas.

6 GEOMETRIA

Tal como se mencionó precedentemente, el modelo considera una sección transversal al dren central, con lo cual se pueden determinar los flujos a través de los depósitos de suelo de las laderas que convergen al dren central y al acuífero natural ubicado en el cauce de la quebrada, tal como se indica en la Figura N° 6-1.

Como ya se mencionó anteriormente, para evaluar distintos períodos de crecimiento del acopio, se analizaron 3 diferentes etapas de crecimiento del acopio. La cota máxima del acopio de arena de cada caso, se indican en la siguiente tabla:

Tabla N° 6-1 Cota máxima de los casos analizados

Caso	Cota máxima del acopio (msnm)	Altura con respecto al cauce (m)
1	3828	419
2	3586	177
3	3505	96

La geometría del modelo, donde se observan los 3 casos analizados, se presenta en la Figura N° 6-1:

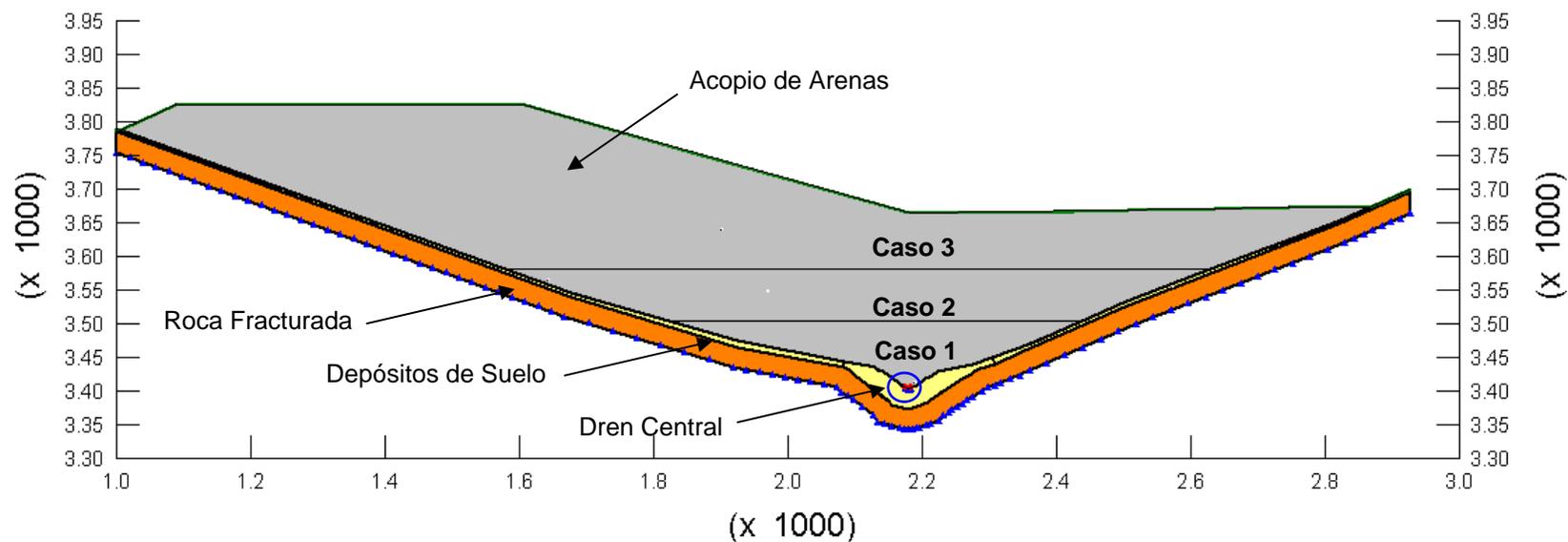


Figura N° 6-1 Geometría modelo y casos analizados.

7 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

De acuerdo a lo observado en los resultados de las prospecciones geotécnicas realizadas y conforme a lo descrito en el Informe de Estimación de Filtraciones Acopio de Arenas (Ref. 2), se adoptaron las siguientes propiedades geohidráulicas para los materiales que conforman el terreno de fundación del acopio:

Tabla N° 7-1 Propiedades de materiales terreno de fundación

Material	Espesor (m)	Permeabilidad Vertical K_v (cm/s)	Permeabilidad horizontal k_h (cm/s)
Coluvial – Aluvial	5 - 30	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-3}
Roca Fracturada	30	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-4}
Arenas	Variable	1.36×10^{-4}	1.36×10^{-3}

Estas propiedades fueron definidas conservadoramente de tal forma de obtener la mayor infiltración de caudales hacía el acuífero a través de la roca fracturada.

Junto con las propiedades recién mencionadas, el software SEEP/W requiere la definición de funciones hidráulicas, las cuales modelan la variación de la conductividad hidráulica (o permeabilidad) y la variación del contenido de agua, en función de la presión de succión. Para ambas funciones se utilizaron modelos incorporados en el software, los cuales consideran el tipo de material que se está analizando (gravas bien graduadas, limos, roca fracturada, etc.). A modo de ejemplo, para el caso del aluvial, la función de conductividad hidráulica se presenta en la Figura N° 7-1. Cabe destacar que para la definición de esta función sólo es necesario el ingreso de la permeabilidad saturada (ver Tabla N° 7-1).

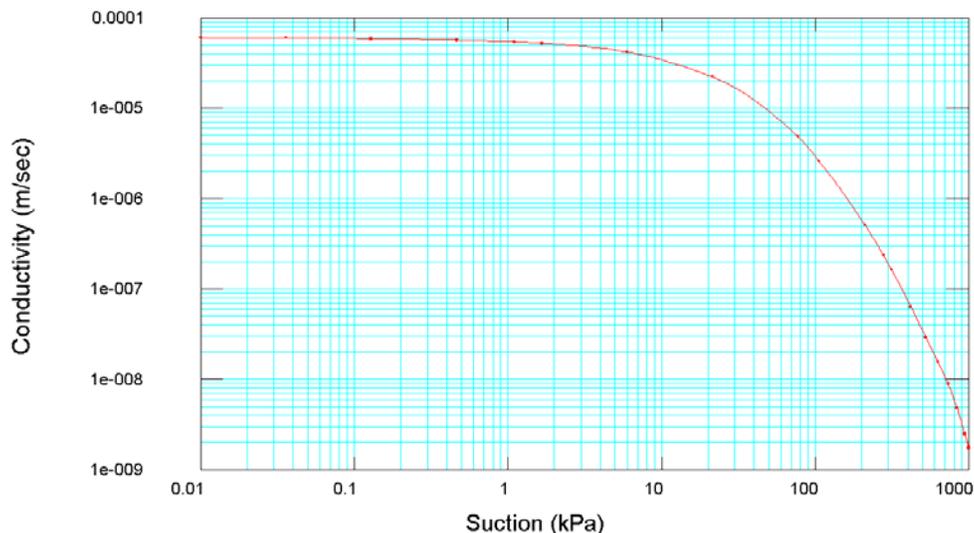


Figura N° 7-1 Función de conductividad hidráulica – Material Aluvial Superficial

Para la definición de la función que representa la variación del volumen de agua con la succión, el programa requiere el ingreso de 2 parámetros: el contenido de agua en la

saturación (Φ_w) y el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v). Estos parámetros se calculan de la siguiente forma:

$$\Phi_w = nS$$

Donde:

n = porosidad del suelo
S = grado de saturación

$$m_v = \frac{C_c}{1 + e_0} .$$

Donde:

C_c = Coeficiente de consolidación obtenido del ensayo edométrico
 e_0 = Índice de vacíos inicial en el ensayo edométrico.

A partir de estas relaciones y los resultados de laboratorio realizados a los materiales del terreno de fundación, se definió:

Función 1 – Terreno de fundación: $\Phi_w = 0.31$
 $m_v = 0$

A modo de ejemplo, en la Figura N° 7-2 se muestra la Función 1:

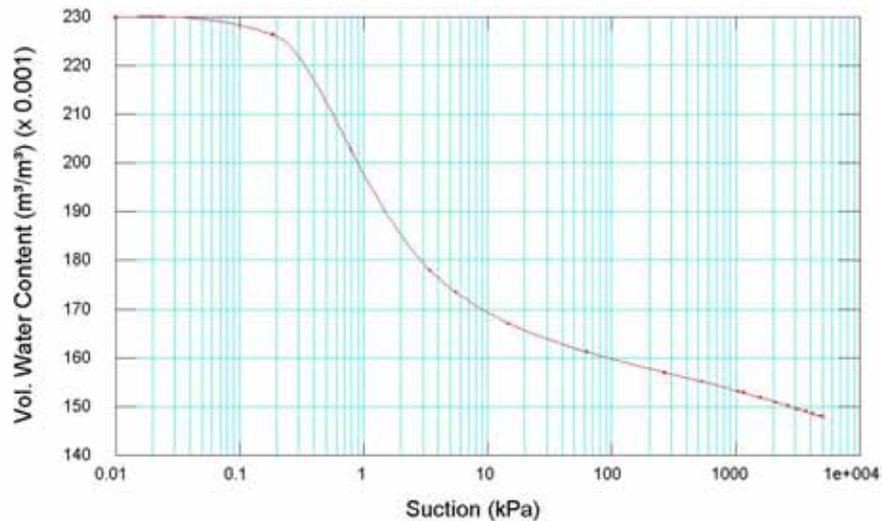


Figura N° 7-2 Función de contenido de agua – Función 1: Terreno de Fundación

8 RESULTADOS

Mediante distintas secciones de control ubicadas en diferentes regiones del modelo fue posible determinar los caudales que fluían a través de éstas. Así se definieron 2 secciones de control las cuales tenían los siguientes objetivos:

Tabla N° 8-1 Ubicación y objetivos secciones de control

Sección de Control	Estrato	Ubicación	Objetivo
SC1	Roca Fracturada	Ladera izquierda	Determinación del caudal en el estrato debido a la infiltraciones desde las arenas acopiadas.
SC2	Roca Fracturada	Ladera derecha	Determinación del caudal en el estrato debido a la infiltración desde las arenas acopiadas.

Los distintos caudales entregados por el modelo (por unidad de ancho) se resumen en la Tabla N° 8-2. A modo de ejemplo la Figura N° 8-1 presenta las secciones de control.

El resto de las salidas del programa SEEP/W se muestran en el Anexo A de este informe.

Como se mencionó anteriormente, el análisis se realizó en función del caudal generado por el agua liberada de las arenas, a partir de la producción diaria de relave, humedad residual, etc. Por esta razón el caudal infiltrado en el acuífero natural se expresa finalmente como un porcentaje de éste.

Tabla N° 8-2 Potenciales caudales estimados por unidad de ancho y por unidad hidrogeológica

Caso	Cota Arenas (msnm)	Caudales medidos		Caudal Total Infiltrado al acuífero en la sección Q_T (m ³ /s)
		SC1	SC2	
		Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	
1	3828	8.06E-07	7.18E-07	1.6E-06
2	3586	1.22E-06	1.38E-06	2.6E-06
3	3505	1.56E-06	2.02E-06	3.6E-06

Tabla N° 8-3 Potenciales Caudales totales por unidad hidrogeológica (Porcentaje del caudal total liberado por las arenas igual a 230 m³/s)

Caso	Caudal entrante Q_E (m ³ /s)	Caudal Total Infiltrado al acuífero Q_T (m ³ /s)	%	Caudal Total Infiltrado al acuífero Q_T (l/s)
1	3.6E-4	1.6E-06	0.44	1.00
2	6.4E-4	2.6E-06	0.41	0.94
3	8.9E-4	3.6E-06	0.40	0.93

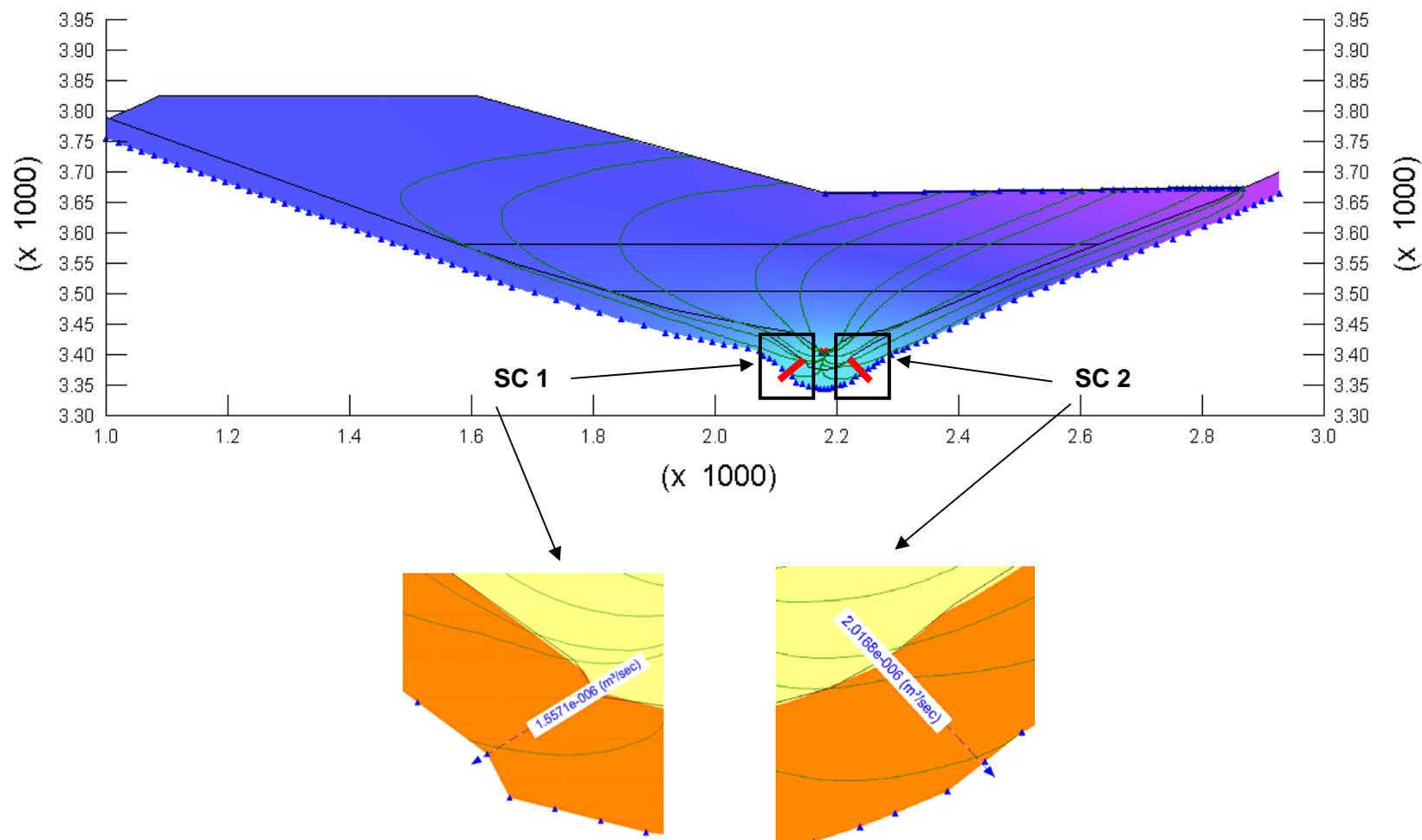


Figura N° 8-1 Secciones de control y resultados Caso 3

9 CONCLUSIONES

A partir de los resultados del modelo es posible concluir lo siguiente:

- El diseño del acopio de arenas considera la instalación de un potente sistema de drenaje basal, captación y desvío de aguas superficiales, control de la colocación de las arenas, monitoreo sistemático, etc. todo lo cual en su conjunto, minimizará al máximo los eventuales aportes de aguas de proceso a los acuíferos naturales. En este contexto, el modelamiento que se realizó, permitió cuantificar los “eventuales” aportes al acuífero por efectos de filtraciones, bajo distintos escenarios conservadores.
- El objetivo de este estudio es determinar el potencial caudal que se infiltraría en el acuífero natural producto del escurrimiento del agua liberada durante la construcción del acopio de arenas. Para simular esta filtración se ha desarrollado un modelo simplificado que considera los aspectos geológicos e hidrogeológicos, suponiendo condiciones favorables para el drenaje (condición conservadora).
- La sección analizada fue ubicada con el fin de determinar los flujos que se producen preferentemente por los depósitos de suelo de las laderas y cuantificar que porcentaje de éstos se infiltraría al acuífero natural.
- El modelo generado considera un caudal producto del escurrimiento del agua liberada desde las arenas, según el balance de aguas del proyecto.
- Por el origen y forma de depositación del material aluvial se ha considerado una anisotropía en las propiedades geo-hidráulicas ($k_h = 10k_v$)
- Por las características de los materiales, y el diseño del dren basal, no se ha considerado que se formará nivel freático al interior del acopio de arenas.
- El modelo generado no considera una sección a lo largo del cauce de la quebrada, debido que dicha modelación daría como resultado que todo el caudal infiltrado sería recogido por el dren basal ubicado a lo largo del depósito.
- Las líneas de flujos indican, como es de esperar, que la mayor cantidad del caudal es recogido por dren basal.
- En general los caudales que infiltran al acuífero natural, corresponden a menos del 1% del caudal total que ingresa debido al escurrimiento del agua liberada de las arenas.
- El caudal total infiltrado al acuífero natural ubicado en la zona del cauce de la quebrada, corresponde a la suma de los caudales aportados desde cada ladera, siendo estos menores a 1 l/s en los casos analizados.
- Así el potencial caudal que se infiltraría al acuífero por efecto de la depositación de las arenas, sería inferior a 1 l/s. Este valor corresponde aproximadamente al 0.4% del valor medio estimado que liberaran las arenas (230 l/s)

ANEXOS

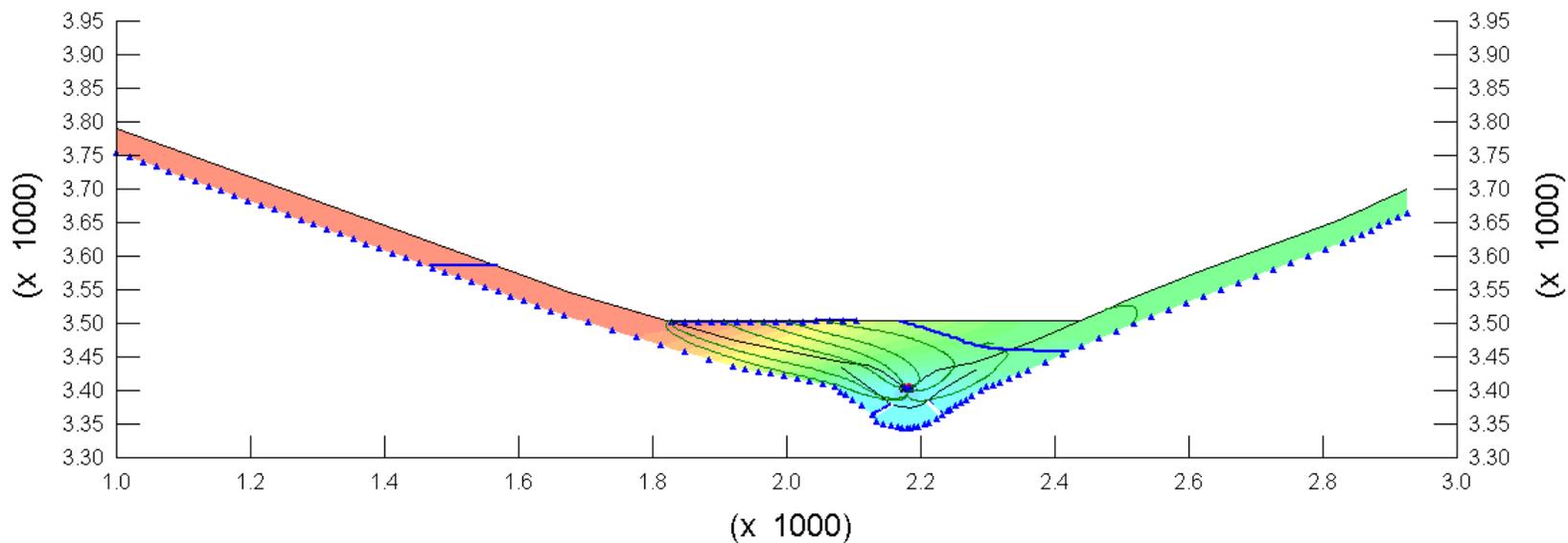


Figura A- 1 Resultado Modelo Caso 1, en donde se observan las líneas de flujo dirigidas hacia el dren.

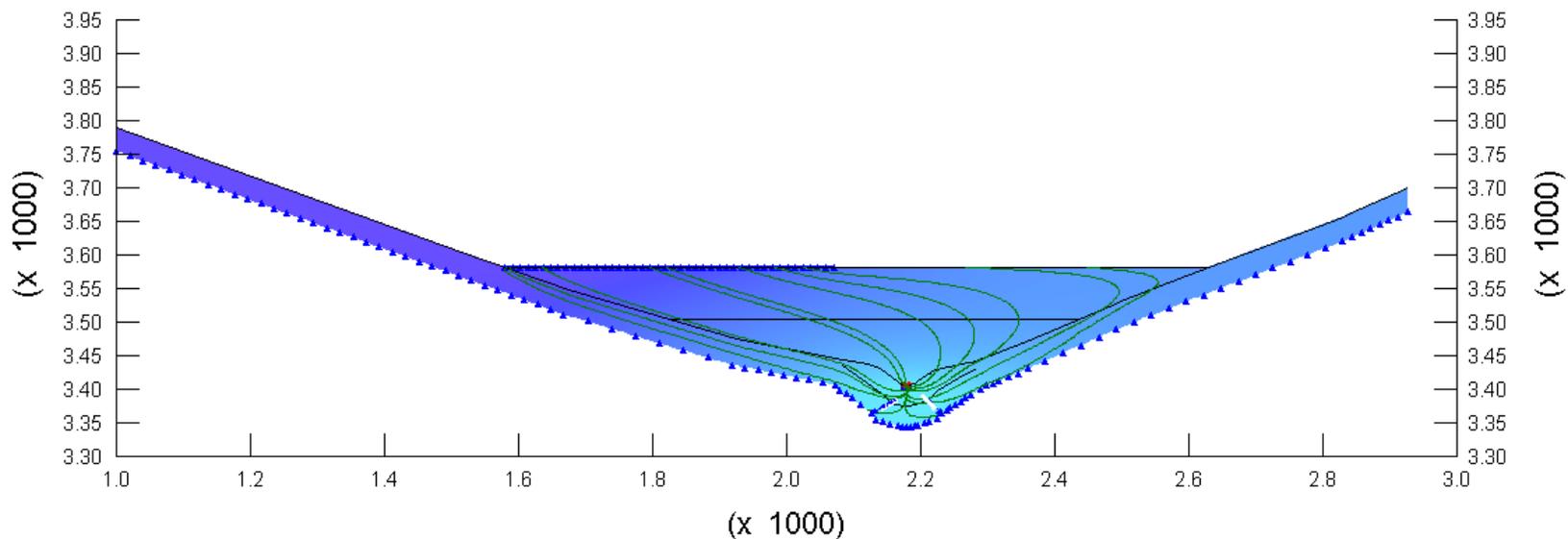


Figura A- 2 Resultado Modelo Caso 2, en donde se observan las líneas de flujo dirigidas hacia el dren.

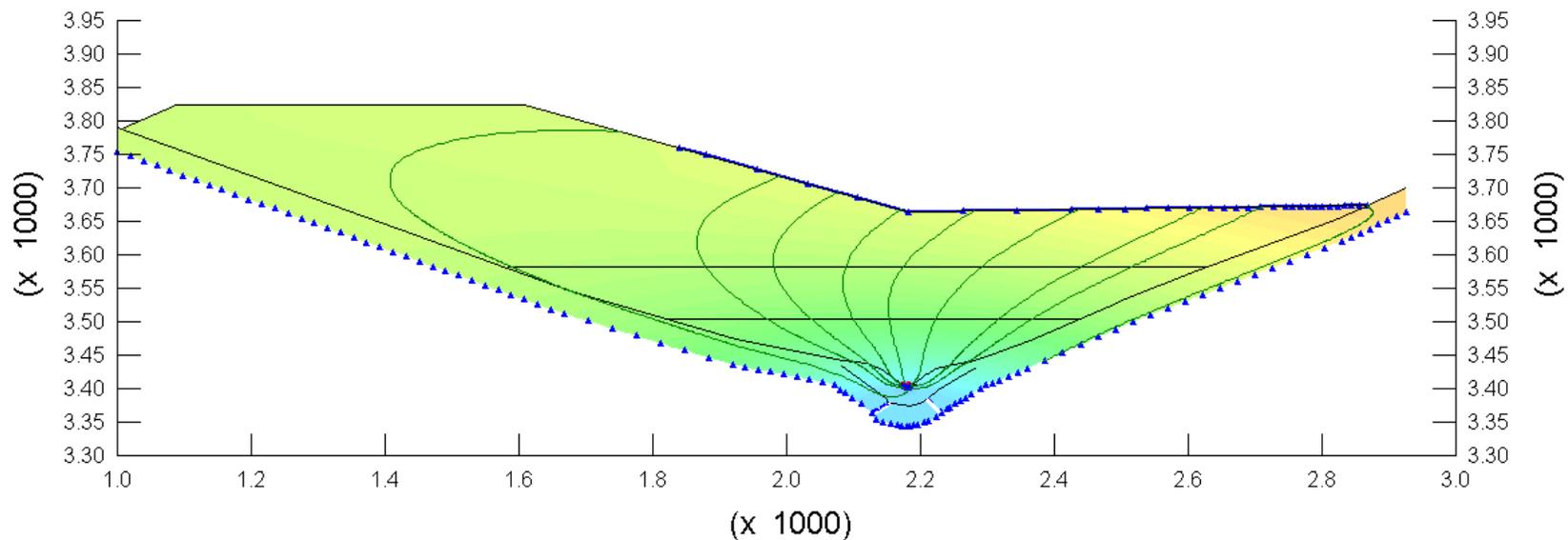


Figura A- 3 Resultado Modelo Caso 3, en donde se observan las líneas de flujo dirigidas hacia el dren.