



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

**ANÁLISIS NUMÉRICO DEL IMPACTO FÍSICO EN LAS AGUAS  
SUBTERRÁNEAS DEBIDO AL DRENAJE DE MINAS A CIELO ABIERTO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN  
RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

**ALEXANDRA CUÉLLAR PEREIRA**

PROFESOR GUÍA:  
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISION:  
ANA MARÍA SANCHA FERNÁNDEZ  
JULIO CORNEJO MORALES

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2011

## RESUMEN

La actividad minera puede producir diversos problemas o efectos en las aguas subterráneas de los acuíferos que la rodean a escala local y regional, tanto en lo que respecta a la calidad como a la cantidad del agua. Estos problemas ocurren cuando en las inmediaciones del proyecto minero existe un nivel de agua subterránea que interfiere con la preparación del rajo y se necesita reducirlo para hacer posible la extracción del mineral.

Cuando se realiza la depresión de los niveles de agua subterránea en el sector del rajo, la mina (desde el punto de vista hidrodinámico) actúa como un sumidero del sistema acuífero, el que induce un flujo de agua subterránea hacia el sector. La magnitud del drenaje, tanto en términos del caudal de drenaje, de los efectos de reducción de niveles en pozos cercanos y del tiempo en que ocurrirá, son aspectos que requieren del uso de herramientas numéricas para su adecuada evaluación.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el impacto físico causado en las aguas subterráneas, cercanas al rajo minero, por el drenaje del mismo en la etapa de operación. Para analizar los efectos que el drenaje del rajo ocasiona en los niveles del acuífero, se utilizan los softwares comerciales Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT.

El estudio del impacto físico en las aguas subterráneas ocasionadas por el drenaje de minas a cielo abierto, se realiza por medio de casos hipotéticos y casos reales de la minería chilena, en los cuales se analiza la influencia de la representación del rajo minero; para ello se utilizan diferentes softwares y condiciones de bordes de carga constante, dren y pozos de bombeo.

De la revisión bibliográfica y diversos análisis realizados en la presente tesis, se concluye que en la resolución de las ecuaciones del flujo subterráneo, el MODFLOW-SURFACT utiliza un procedimiento más apropiado y físicamente más consistente que el Visual MODFLOW.

El programa Visual MODFLOW durante las simulaciones convierte las celdas de carga variable desaturadas en celdas sin flujo, resultando en una exclusión permanente de estas celdas del dominio de flujo del modelo de simulación. El programa MODFLOW – SURFACT resuelve el problema de la exclusión permanente de las celdas desaturadas por medio de una formulación que incorpora funciones de retención de agua

Respecto a las condiciones de borde de carga constante y dren, la diferencia que existe entre ambas, es que la condición de borde de tipo dren limita la salida de agua debido al valor del parámetro Conductancia, mientras que la condición de borde de carga constante no tiene un límite para extraer agua del sistema acuífero. Además, la extracción de agua a través del dren se realiza de manera gradual, hasta que la carga en el acuífero es menor a la elevación fijada del dren (cota de fondo del rajo), al contrario de la carga constante, que extrae agua desde el inicio de la simulación del nivel constante de agua fijado (cota de fondo del rajo).

La simulación del drenaje de rajos mineros en acuíferos de muy baja permeabilidad y áreas extensas, no es factible realizarla a través de pozos de bombeo, debido a que éstos producen conos de depresión estrechos y profundos. En estos casos, el radio de influencia del pozo es muy pequeño, ocasionando una depresión del nivel del agua subterránea muy localizada.

De los diversos análisis realizados en la presente tesis, se concluye que para la simulación de rajos mineros en sistemas acuíferos de baja permeabilidad, se logra una mejor representación del mismo, utilizando la condición de borde de dren y el programa MODFLOW – SURFACT.

## **AGRADECIMIENTOS**

Son muchas las personas a las que quiero agradecer, las cuales a lo largo de mi vida me han dado su apoyo y fuerzas para tener logros como este proyecto.

A mi familia, por su confianza y esfuerzo, y por darme la oportunidad de educarme.

Al profesor Carlos Espinoza, una gran persona, cuya dedicación y colaboración se ve reflejada en la materialización de este trabajo.

A los integrantes de mi comisión, la profesora Ana María Sancha y el profesor Julio Cornejo, quienes colaboraron en la elaboración de este trabajo.

Al equipo docente de la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile, por haber contribuido a mi formación con sus valiosos conocimientos y experiencias.

A mis amigos y compañeros por su incondicional compañía y ayuda.

## INDICE DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Drenaje de minas .....	3
2.2	Impactos ocasionados por la actividad minera.....	5
2.3	Mecanismos internacionales para regular el impacto en las aguas subterráneas .....	11
2.3.1	Normativa Chilena.....	11
2.3.2	Normativa Boliviana .....	13
2.3.3	Normativa Peruana .....	14
2.4	Procedimientos para mitigar los impactos en el medio ambiente hídrico .....	15
3.	PROGRAMAS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL DRENAJE DE MINAS..	18
3.1	Introducción.....	18
3.2	MODFLOW (Modular Finite Difference Groundwater Flow Model).....	18
3.2.1	Descripción del MODFLOW .....	18
3.2.2	Entradas y salidas del MODFLOW .....	19
3.2.3	Modelo matemático del MODFLOW.....	19
3.2.4	Evolución del MODFLOW .....	22
3.3	Visual MODFLOW .....	24
3.3.1	Descripción del Visual MODFLOW .....	24
3.3.2	Evolución del Visual MODFLOW.....	24
3.3.3	Fortalezas y debilidades del Visual MODFLOW.....	26
3.4	MODFLOW – SURFACT .....	26
3.4.1	Descripción del MODFLOW – SURFACT .....	26
3.4.2	Evolución del MODFLOW – SURFACT .....	31
3.4.3	Beneficios del MODFLOW – SURFACT.....	31
4.	MODELACIÓN NUMÉRICA DE CASOS HIPOTÉTICOS .....	33
4.1	Introducción.....	33
4.2	Validación del Visual MODFLOW.....	33
4.2.1	Descripción del caso hipotético “A” .....	33
4.2.2	Resultados de la validación del Visual MODFLOW .....	36
4.3	Análisis comparativo de los algoritmos de cálculo (“solvers”).....	40
4.3.1	Descripción de los algoritmos de cálculo (“solvers”) .....	41
4.3.2	Descripción del caso hipotético “B”.....	41
4.3.3	Resultados del análisis comparativo de los algoritmos de cálculo (“solvers”) .....	43
4.4	Modelación numérica utilizando programas de diferencias finitas.....	52
4.4.1	Descripción del caso hipotético “C”.....	52
4.4.2	Representación del rajo minero con diferentes condiciones de borde.....	55
4.4.2.1	Condición de borde de carga constante .....	55
4.4.2.2	Condición de borde de dren.....	71
4.4.2.3	Condición de borde de pozos de extracción (Caso hipotético “D”).....	87
5.	APLICACIÓN A CASOS REALES .....	98
5.1	Introducción.....	98
5.2	Caso mina Andacollo .....	99
5.2.1	Descripción general de la zona.....	99
5.2.1.1	Geología y geomorfología.....	100
5.2.1.2	Hidrogeología .....	102
5.2.2	Modelo conceptual adoptado para la cuenca de Andacollo .....	104
5.2.3	Modelo numérico de la cuenca de Andacollo .....	105

5.2.3.1	Descripción del modelo numérico .....	105
5.2.3.2	Calibración .....	108
5.2.3.3	Validación.....	113
5.2.3.4	Análisis de sensibilidad .....	116
5.2.3.5	Operación del modelo de simulación .....	120
5.3	Caso mina “LC” .....	131
5.3.1	Descripción general de la zona.....	131
5.3.1.1	Geología y geomorfología .....	132
5.3.1.2	Hidrogeología.....	134
5.3.2	Modelo conceptual adoptado.....	135
5.3.3	Modelo numérico de la cuenca “LC” .....	136
5.3.3.1	Descripción del modelo numérico.....	136
5.3.3.2	Calibración .....	139
5.3.3.3	Validación.....	144
5.3.3.4	Análisis de sensibilidad .....	145
5.3.3.5	Operación del modelo de simulación .....	149
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	162
6.1	Conclusiones.....	162
6.2	Recomendaciones.....	165
	BIBLIOGRAFÍA.....	167

## ANEXOS

- A. DESCRIPCIÓN DE ALGORITMOS DE CÁLCULO (“SOLVERS”)
- AX. ANEXO DIGITAL

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Efectos del Descenso de Niveles Ocasionado por el Drenaje de Minas .....	9
Figura 3.1	Discretización Espacial de un Sistema Acuífero .....	20
Figura 3.2	Sistema de Celda de Bloque Centrado .....	20
Figura 3.3	Flujo Entrando a la Celda i, j, k desde la Celda i, j-1, k.....	21
Figura 3.4	Celda i, j, k e Índices Utilizados para sus Seis Celdas Vecinas .....	22
Figura 3.5	Esquema del Refinamiento Local de Grillas de Diferencias Finitas.....	23
Figura 3.6	Celdas Adyacentes de la Media Armónica de las Transmisibilidades.....	29
Figura 4.1	Vista en Planta del Caso Hipotético “A” en Visual MODFLOW .....	35
Figura 4.2	Vista en Corte del Caso Hipotético “A” .....	35
Figura 4.3	Análisis de Sensibilidad del Tamaño de las Celdas .....	38
Figura 4.4	Descenso vs. Tiempo en los Pozos de Observación .....	39
Figura 4.5	Vista en Planta del Caso Hipotético “B”.....	42
Figura 4.6	Vista en Planta de las Conductividades Hidráulicas.....	43
Figura 4.7	Vista en Planta de los Coeficientes de Almacenamientos y Porosidades .....	43
Figura 4.8	Resultados Pozos Observación Primer Período de Simulación (1 año).....	47
Figura 4.9	Resultados Pozos Observación Segundo Período de Simulación (5 años).....	48
Figura 4.10	Resultados Pozos Observación Tercer Período de Simulación (10 años).....	48
Figura 4.11	Resultados Pozos Observación Cuarto Período de Simulación (25 años).....	48
Figura 4.12	Comparación del Tiempo de Convergencia para los “Solvers” SAMG, WHS y el PCG .....	52
Figura 4.13	Vista en Planta del Dominio del Caso Hipotético “C” .....	53
Figura 4.14	Vista en Corte del Dominio del Caso Hipotético “C”.....	53
Figura 4.15	Vista en Corte del Rajo para Diferentes Tiempos de Simulación Caso Hipotético “C” .....	54
Figura 4.16	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante (Visual MODFLOW).....	57
Figura 4.17	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante (MODFLOW-SURFACT).....	57
Figura 4.18	Caudal de Salida del Rajo Minero – Carga Constante.....	58
Figura 4.19	Vista en Planta de la Ubicación de los Pozos de Observación .....	59
Figura 4.20	Niveles en los Pozos de Observación – Carga Constante.....	60
Figura 4.21	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante – Nuevas Conductividades (Visual MODFLOW).....	62
Figura 4.22	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante – Nuevas Conductividades (MODFLOW - SURFACT).....	62
Figura 4.23	Comparación de los Conos de Depresión en Acuíferos.....	63
Figura 4.24	Caudal de Salida del Rajo Minero Nuevas Conductividades – Carga Constante..	64
Figura 4.25	Niveles en Pozos de Observación Nuevas Conductividades – Carga Constante...	65
Figura 4.26	Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral – Carga Constante ...	67
Figura 4.27	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante – Filtración Lateral (Visual MODFLOW).....	68
Figura 4.28	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Carga Constante – Filtración Lateral (MODFLOW - SURFACT).....	68
Figura 4.29	Caudal de Salida del Rajo Minero Filtración Lateral – Carga Constante.....	69
Figura 4.30	Niveles en Pozos de Observación Filtración Lateral – Carga Constante.....	70
Figura 4.31	Esquema Gráfico de la Condición de Borde de Dren .....	71

Figura 4.32	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Dren (Visual MODFLOW)	74
Figura 4.33	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Dren (MODFLOW-SURFACT)	74
Figura 4.34	Caudal de Salida del Rajo Minero – Dren	76
Figura 4.35	Caudal de Salida del Rajo para Diferentes Conductancias	77
Figura 4.36	Niveles en Pozos de Observación – Dren	79
Figura 4.37	Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral - Dren	81
Figura 4.38	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Dren – Filtración Lateral (Visual MODFLOW)	82
Figura 4.39	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Dren – Filtración Lateral (MODFLOW - SURFACT)	82
Figura 4.40	Caudal de Salida del Rajo Minero Filtración Lateral – Dren	83
Figura 4.41	Niveles en Pozos de Observación Filtración Lateral – Dren	84
Figura 4.42	Caudal de Salida del Rajo Minero con Conductividades Hidráulicas Iguales (Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT)	85
Figura 4.43	Caudales de Salida del Rajo Minero	87
Figura 4.44	Vista en Planta del Dominio del Caso Hipotético “D”	89
Figura 4.45	Vista en Planta del Sector del Rajo Minero	90
Figura 4.46	Vista en Corte del Rajo para Diferentes Tiempos de Simulación - Caso Hipotético “D”	90
Figura 4.47	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t1 con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)	93
Figura 4.48	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t1 con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)	93
Figura 4.49	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t2 con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)	94
Figura 4.50	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t2 con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)	94
Figura 4.51	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)	95
Figura 4.52	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período t3 con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)	95
Figura 4.53	Análisis de los Caudales de Salida de los Pozos de Bombeo del Visual MODFLOW	97
Figura 4.54	Análisis de los Caudales de Salida de los Pozos de Bombeo del MODFLOW - SURFACT	97
Figura 5.1	Mapa Geológico del Sector de Andacollo	101
Figura 5.2	Vista en Planta del Modelo Hidrogeológico Cuenca de Andacollo	106
Figura 5.3	Vista en Corte del Modelo Hidrogeológico Cuenca de Andacollo	106
Figura 5.4	Condiciones de Borde – Situación Año 1975	107
Figura 5.5	Condiciones de Borde – Situación Año 2005	108
Figura 5.6	Ubicación de Puntos con Datos para la Calibración (1975)	109
Figura 5.7	Distribución Final de Conductividades Hidráulicas – Andacollo	110
Figura 5.8	Indicadores de Ajuste en el Proceso de Calibración – Andacollo	111
Figura 5.9	Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo (1975) – Andacollo	112
Figura 5.10	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea (1975) – Andacollo	112

Figura 5.11	Ubicación de Puntos con Datos para la Validación (2005) – Andacollo.....	113
Figura 5.12	Indicadores de Ajuste en Proceso de Validación – Andacollo .....	114
Figura 5.13	Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo (2005) ....	115
Figura 5.14	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea (2005).....	115
Figura 5.15	Posición Inicial Partículas de Seguimiento - Andacollo.....	117
Figura 5.16	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 1000 m <sup>2</sup> /d - Andacollo .....	118
Figura 5.17	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 10 m <sup>2</sup> /d - Andacollo .....	118
Figura 5.18	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.1 m <sup>2</sup> /d - Andacollo .....	119
Figura 5.19	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.001 m <sup>2</sup> /d - Andacollo .....	119
Figura 5.20	Condiciones de Borde en la Fase de Operación.....	120
Figura 5.21	Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral.....	121
Figura 5.22	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t <sub>1</sub> – Andacollo (Visual MODFLOW).....	122
Figura 5.23	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t <sub>1</sub> – Andacollo (MODFLOW - SURFACT) .....	123
Figura 5.24	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t <sub>6</sub> – Andacollo (Visual MODFLOW).....	124
Figura 5.25	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t <sub>6</sub> – Andacollo (MODFLOW - SURFACT) .....	125
Figura 5.26	Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente (Visual MODFLOW).....	126
Figura 5.27	Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente (MODFLOW - SURFACT).....	127
Figura 5.28	Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente y Transiente .....	128
Figura 5.29	Evolución Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Observación	129
Figura 5.30	Caudal de Salida del Rajo Minero .....	130
Figura 5.31	Esquema de la Cuenca “LC”.....	132
Figura 5.32	Vista en Planta del Modelo Hidrogeológico Cuenca “LC” .....	137
Figura 5.33	Vista en Corte del Modelo Hidrogeológico Cuenca de “LC”.....	137
Figura 5.34	Red Fluviométrica Cuenca de “LC” .....	138
Figura 5.35	Propiedades Hidrogeológicas Cuenca “LC”.....	140
Figura 5.36	Ubicación de Puntos con Datos para la Calibración “LC” .....	140
Figura 5.37	Distribución Final de Conductividades Hidráulicas – “LC”.....	141
Figura 5.38	Indicadores de Ajuste en el Proceso de Calibración – “LC” .....	142
Figura 5.39	Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo - Calibración .....	143
Figura 5.40	Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea – Calibración	143
Figura 5.41	Ubicación de Puntos con Datos para la Validación – “LC”.....	144
Figura 5.42	Indicadores de Ajuste en Proceso de Validación – “LC” .....	145
Figura 5.43	Posición Inicial Partículas de Seguimiento –“LC” .....	147
Figura 5.44	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 100 m <sup>2</sup> /d –“LC” ....	147
Figura 5.45	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.01 m <sup>2</sup> /d –“LC” ...	148
Figura 5.46	Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.00001 m <sup>2</sup> /d –“LC” .....	148
Figura 5.47	Condiciones de Borde en la Fase de Operación – “LC”.....	149

Figura 5.48	Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral – “LC” .....	150
Figura 5.49	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t2 – “LC” (Visual MODFLOW).....	152
Figura 5.50	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t2 – “LC” (MODFLOW - SURFACT).....	153
Figura 5.51	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t4 – “LC” (Visual MODFLOW).....	154
Figura 5.52	Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período t4 – “LC” (MODFLOW - SURFACT).....	155
Figura 5.53	Niveles Aguas Subterráneas en los Períodos de Simulación –“LC”.....	156
Figura 5.54	Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente - “LC” (Visual MODFLOW).....	157
Figura 5.55	Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente - “LC” (MODFLOW - SURFACT).....	158
Figura 5.56	Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente y Transiente - “LC” .....	159
Figura 5.57	Caudal de Salida del Rajo Minero -“LC” .....	160

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Concentración Parámetros Monitoreados - “Pit Lake” Mina Island Cooper .....	11
Tabla 2.2	Impactos Negativos en Medio Ambiente Hídrico .....	17
Tabla 4.1	Ubicación Pozo de Bombeo y Pozos de Observación en el Caso Hipotético “A” ..	34
Tabla 4.2	Propiedades Hidrogeológicas del Acuífero .....	36
Tabla 4.3	Coordenadas Pozos de Observación.....	42
Tabla 4.4	Valores Cargas Constantes (Cota de Fondo).....	44
Tabla 4.5	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG del Visual MODFLOW .....	44
Tabla 4.6	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SAMG del Visual MODFLOW .....	45
Tabla 4.7	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SIP del Visual MODFLOW .....	45
Tabla 4.8	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SOR del Visual MODFLOW .....	45
Tabla 4.9	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo WHS del Visual MODFLOW .....	45
Tabla 4.10	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo GMG del Visual MODFLOW .....	46
Tabla 4.11	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG del MODFLOW -SURFACT .....	46
Tabla 4.12	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG4 del MODFLOW -SURFACT .....	46
Tabla 4.13	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SIP del MODFLOW -SURFACT ..	46
Tabla 4.14	Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SOR del MODFLOW -SURFACT ..	47
Tabla 4.15	Caudal de Salida del Rajo Minero en los Cuatro Períodos de Simulación .....	50
Tabla 4.16	Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos del Caso Hipotético “C” .....	54
Tabla 4.17	Características Geológicas de los Estratos del Caso Hipotético “C” .....	55
Tabla 4.18	Valores de la Condición de Borde de Carga Constante .....	56
Tabla 4.19	Datos de los Pozos de Observación.....	59
Tabla 4.20	Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos – Conductividades Mayores.....	61
Tabla 4.21	Valores de la Condición de Borde de Tipo Dren .....	73
Tabla 4.22	Volúmenes de Extracción de Agua para Diferentes Conductancias .....	78
Tabla 4.23	Nuevas Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos.....	85
Tabla 4.24	Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos del Caso Hipotético “D” .....	91
Tabla 4.25	Tiempo de Simulación, Profundidad del Rajo y Caudales de Bombeo .....	91
Tabla 4.26	Niveles de Agua Subterránea en los Pozos de Observación .....	96
Tabla 5.1	Propiedades Hidrogeológicas Cuenca de Andacollo.....	109
Tabla 5.2	Balance Hídrico de la Cuenca de Andacollo (1975) .....	113
Tabla 5.3	Balance Hídrico de la Cuenca de Andacollo (2005) .....	114
Tabla 5.4	Balance Hídrico para Diferentes Conductancias - Andacollo .....	116
Tabla 5.5	Valores de la Condición de Borde de Dren en la Fase de Operación.....	121
Tabla 5.6	Balance Hídrico Cuenca de Andacollo – Régimen Transiente .....	130
Tabla 5.7	Balance Hídrico Cuenca de Andacollo – Régimen Permanente .....	131
Tabla 5.8	Balance Hídrico de la Cuenca “LC” .....	143
Tabla 5.9	Balance Hídrico para Diferentes Conductancias.....	146
Tabla 5.10	Valores de la Condición de Borde de Dren en la Fase de Operación –“LC” .....	150
Tabla 5.11	Balance Hídrico Cuenca “LC” – Régimen Transiente.....	160
Tabla 5.12	Balance Hídrico Cuenca “LC” – Régimen Permanente.....	161

## 1. INTRODUCCIÓN

La actividad minera puede producir diversos problemas o efectos en las aguas subterráneas de los acuíferos que la rodean a escala local y regional, tanto en lo que respecta a la calidad como a la cantidad de esta agua. Estos problemas ocurren, por ejemplo, cuando en las inmediaciones del proyecto minero existe un nivel de agua subterránea que interfiere con la preparación del rajo y se necesita reducirlo para hacer posible la extracción del mineral. Cuando se realiza esta depresión de los niveles de agua subterránea en el sector del rajo, la mina (desde el punto de vista hidrodinámico) actuará como un sumidero del sistema acuífero, el que provocará o inducirá un flujo del agua subterránea hacia el sector. La magnitud de ese drenaje, tanto en términos del caudal de drenaje, los efectos de reducción de niveles en pozos cercanos y el tiempo en que ocurrirá, son aspectos que requieren del uso de herramientas numéricas para su correcta evaluación.

Entre los efectos o impactos asociados a la cantidad de agua subterránea que se producen al drenar el agua de la zona de la mina están el descenso de niveles en pozos cercanos (los que pueden ser utilizados para diversos fines como consumo humano o agrícola), decrecimiento en el caudal de descarga natural del agua subterránea, así como el descenso de niveles de agua y caudales en cauces superficiales. El grado de los impactos depende de las propiedades hidrogeológicas del suelo de la zona y de la duración e intensidad del drenaje.

Una de las principales motivaciones de esta tesis, es evaluar el impacto físico causado en las aguas subterráneas, cercanas al rajo minero, por el drenaje del mismo en la etapa de operación, para lo cual se utilizan softwares comerciales (Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT) y una adecuada representación del rajo y de los efectos que éste provoca en los niveles de agua del acuífero.

En esta tesis se utilizan herramientas computacionales de uso común en hidrogeología como el Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, softwares comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones, tanto en medios porosos tradicionales como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas. Esto último es muy común en el caso de muchas minas a cielo abierto.

El objetivo principal de la presente tesis, es obtener un documento que pueda ser usado como guía o de consulta, en el cual se encuentre recopilada toda la información necesaria para evaluar el impacto físico en las aguas subterráneas causado por el drenaje de minas, basado en investigaciones serias que puedan ser fundamentadas con documentos e información especializada en el tema de drenaje de minas a cielo abierto en la etapa de operación.

Los objetivos específicos son:

- Recabar información bibliográfica para comprender el proceso de drenaje de minas.
- Modelación numérica de casos hipotéticos del drenaje del rajo de minas utilizando diferentes condiciones de borde con el fin de aproximarse lo más posible a la realidad.
- Analizar la influencia de la representación adecuada del rajo minero en el drenaje de minas a cielo abierto y sus posibles consecuencias en los niveles de flujo del agua subterránea.
- Análisis comparativos de los resultados de la modelación numérica obtenidos mediante el uso del Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT.

- Aplicación de los resultados obtenidos en los análisis anteriormente mencionados en casos reales de drenajes de minas a cielo abierto de la minería chilena.
- Recomendaciones a seguir para lograr una correcta simulación de un drenaje de mina a cielo abierto.

A continuación, se presenta la estructura utilizada en la presente tesis:

### **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Se presenta la problemática, los objetivos específicos y los resultados esperados.

### **CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se presenta una revisión bibliográfica considerando el proceso de drenajes de minas, los impactos ocasionados por la actividad minera, enfocado principalmente en los impactos ocasionados por el drenaje de minas a cielo abierto en los niveles de agua subterránea, mecanismos internacionales para regular el impacto físico en las aguas subterráneas y procedimientos para mitigar los impactos en el medio ambiente hídrico.

### **CAPÍTULO 3:**

Se presenta una descripción, ventajas y desventajas de las herramientas computacionales Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, que son los programas que se utilizan en esta tesis para la simulación del agua subterránea que fluye a través de los acuíferos y unidades geológicas. El Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT son softwares comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones tanto en medios porosos tradicionales así como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas.

### **CAPÍTULO 4:**

A partir del caso hipotético “A” del bombeo de agua de un acuífero, se validan los resultados obtenidos del programa Visual MODFLOW con los resultados obtenidos con los métodos analíticos de Theis y Jacob. A través del caso hipotético “B” del drenaje de un rajo minero, se realiza un análisis comparativo de los diferentes algoritmos de cálculo que permiten resolver las ecuaciones de flujo subterráneo de los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, para verificar la eficiencia y estabilidad de los mismos. A partir de los casos hipotéticos “C” y “D” del drenaje de una mina a cielo abierto, se analiza la influencia de la correcta representación del rajo minero, para esto se utilizan diferentes condiciones de bordes, tanto artificiales como naturales.

### **CAPÍTULO 5:**

Finalmente, se aplican a modelos de simulación de casos reales de la minería chilena los resultados obtenidos del análisis numérico de las condiciones de borde realizado en la modelación numérica de los casos hipotéticos. Los casos reales analizados en esta tesis corresponden a dos minas a cielo abierto, Andacollo y “LC”.

### **CAPÍTULO 6:**

Se analizan los principales resultados obtenidos dentro de la tesis, se presentan y discuten las conclusiones obtenidas y se hacen recomendaciones.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Drenaje de minas

La extracción y el procesamiento de los minerales es un requisito indispensable para el estilo de vida de todas las sociedades avanzadas, al grado que mantener una oposición total a la minería resulta difícil, inclusive para los grupos antimineros más radicales. La dominante influencia de la minería en la vida urbana se puede apreciar claramente al observar los materiales que nos rodean y al cuestionarse el origen de éstos.

A grandes rasgos la minería se clasifica como subterránea y superficial, esto depende de la forma y ubicación del cuerpo mineralizado. A continuación se realiza una descripción de las minas subterráneas y a cielo abierto.

La definición de minas subterráneas, se refiere a cualquier mina, en la cual los mineros y/o la maquinaria tengan que trabajar bajo una cubierta de suelo o roca. De las diversas actividades involucradas en la minería subterránea, dos de ellas tienen una notoria influencia en el movimiento del agua de mina durante y después de la actividad minera:

- El desarrollo y el mantenimiento de los accesos subterráneos (para humanos, maquinaria, servicios secundarios y ventilación).
- La extracción del mineral, asociada al manejo subterráneo de desechos de rocas (escombros).

La forma en que estas dos actividades son desarrolladas causa consecuencias, a corto y largo plazo, en el comportamiento de los sistemas hidrológicos e hidrogeológicos cercanos a la zona de la actividad minera.

Los accesos a las minas subterráneas se realizan a través de túneles, los cuales varían en su inclinación desde horizontales hasta verticales. Los accesos más comunes son los socavones o galerías, túneles verticales, semi-verticales e inclinados.

En cuanto a las técnicas de extracción del mineral en minas subterráneas, existen dos principales métodos de extracción: cuando la zona productiva es esencialmente estratiforme y existe poca inclinación, se utilizan métodos de extracción horizontal y si la zona productiva se encuentra en un sector considerablemente inclinado (como en venas hidrotermales o depósitos de lodo) o el yacimiento tiene una forma irregular con una extensión vertical considerable, entonces se utilizan métodos de extracción “stopping” (cámaras subterráneas).

La definición de minas superficiales, se refiere a cualquier mina cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie de la tierra. A partir de los años 1940, la fabricación de maquinaria adecuada para la excavación de minas a cielo abierto, como las palas dragalinas y las volquetas, las convirtió en una alternativa de explotación minera bastante más factible. En la actualidad, más del 80% de las explotaciones mineras son realizadas a través de minas superficiales.

En todas las minas superficiales existen tres actividades fundamentales:

- La extracción de la sobrecarga (excavación de los depósitos no económicos que recubren el mineral).
- Extracción del mineral.
- Restauración y/o abandono de la mina superficial.

Las minas superficiales son clasificadas de acuerdo a la realización de estas actividades. La siguiente clasificación de minas superficiales fue dada por Hartman (1987).

**Las minas a cielo abierto**, o también conocidas como minas a rajo o tajo abierto, son minas superficiales, en las cuales la sobrecarga es removida de la zona de explotación y colocada en botaderos. El mineral es extraído a través de bancos horizontales escalonados. Generalmente la explotación de minas a cielo abierto se realiza, cuando la sobrecarga sobre el yacimiento es pequeña.

Debido a la escasez de sobrecarga para rellenar las minas a cielo abierto, muchas de estas minas en la etapa de abandono forman “pit lakes”, exceptuando aquellas que se encuentran en zonas áridas. Los “pit lakes” difieren radicalmente de los lagos naturales, puesto que los primeros se caracterizan por tener diámetros pequeños en relación a su profundidad (Miller *et al.*, 1996), en cuanto los lagos naturales son muchos más extensos que profundos. Esto tiene consecuencias limnológicas importantes, particularmente en relación a la estratificación estacional (en términos de temperatura, densidad y salinidad), que a su vez afecta la dinámica de la calidad del agua.

**Las explotaciones al descubierto**, se emplean con frecuencia para extraer carbón y lignito. La principal diferencia entre estas minas y las minas a cielo abierto, es que el material de desecho extraído para descubrir el yacimiento, en lugar de transportarse a botaderos, se vuelve a dejar en la cavidad creada por la explotación reciente. Por lo tanto, las minas van avanzando poco a poco, rellenando el terreno y devolviendo a la superficie en la medida de lo posible el aspecto que tenía antes de comenzar la extracción. Al contrario de una mina a cielo abierto, que suele hacerse cada vez más grande, una explotación al descubierto alcanza su tamaño máximo en muy poco tiempo. Cuando se completa la explotación, la cavidad que queda se puede convertir en un lago o rellenarse con el material procedente de la excavación.

**La minería hidráulica**, es una técnica de minería que emplea la presión del agua para desincrustar el material rocoso, o mover sedimentos. Esta técnica fue bastante utilizada en los Estados Unidos, para la explotación de minerales durante la fiebre del oro en California en la segunda mitad del siglo XIX. La minería hidráulica había sido previamente desarrollada por los romanos.

Se estima que más del 70% de todo el material excavado en las operaciones mineras a nivel mundial son desechos mineros (Hartman, 1987). A comienzos del siglo XXI, más del 99% de los desechos mineros estaban siendo generados por minas superficiales, lo cual está fuera de proporción en relación a su nivel de producción de mineral (80%). Estos datos implican que la minería subterránea es más eficiente en el manejo de su producción de desechos.

Todas las minas a cielo abierto y subterráneas que son explotadas por debajo del nivel del agua requieren algún tipo de drenaje. El diseño de cualquier sistema de drenaje requiere la necesidad de estimar el volumen de agua a ser extraído de la mina.

En las minas a cielo abierto de suelos muy permeables y saturados, es muy importante tener en cuenta que se requerirá una fase de bombeo intensivo durante las primeras etapas de la operación, hasta que los niveles de aguas subterráneas se hayan deprimido lo suficiente para permitir el acceso a la mina. El caudal de bombeo durante las primeras etapas removerá agua del almacenamiento subterráneo y en muchos casos este caudal será mayor al requerido para mantener constante los niveles de aguas necesarios para el resto de la etapa de operación de la mina.

La principal forma de ingreso de agua a las minas activas es la infiltración o como se la conoce en inglés “seepage”. Las infiltraciones son áreas de ingreso difuso de agua a través del fondo de las excavaciones o a lo largo de contactos geológicos en las minas a cielo abierto y subterráneas. Los ingresos de agua a través de infiltraciones pueden ser imperceptiblemente lentos, aunque la cantidad total de agua puede ser muy grande en total.

En las minas a cielo abierto, la precipitación directa en el rajo debe ser considerada en la planificación del sistema de drenaje para asegurar su correcto funcionamiento.

En muchas partes del mundo, se encuentran depósitos de minerales valiosos subyaciendo cuerpos de agua, como ríos, lagos, humedales, acuíferos y océanos. En el caso de las minas subterráneas debajo de cuerpos de agua considerables, éstas pueden ser explotadas sin inducir hacia ellas la entrada de agua. Esto no es factible, en el caso de las minas a cielo abierto, puesto que para ser explotadas es necesario drenar el cuerpo de agua. Los siguientes problemas se asocian comúnmente a la presencia de cantidades excesivas de agua en las minas a cielo abierto:

- La incomodidad de los mineros de trabajar en áreas húmedas.
- El costo y la desventaja asociada a conducir el agua al sistema de drenaje principal.
- Los costos de drenaje por bombeo.
- La dificultad de operar equipo automatizado en suelos blandos debido al agua.
- La necesidad de usar explosivos a prueba de agua (mayor costo).
- La desestabilización de los taludes y pisos debido al agua.

## **2.2 Impactos ocasionados por la actividad minera**

A partir de los años 1960, los posibles impactos ambientales de la minería han sido más polémicos, al punto que las desaprobaciones ambientales han sido frecuentemente el principal obstáculo para el desarrollo de nuevas minas o de la ampliación de las existentes (Beynon *et al.*, 2000). El incremento en la polémica sobre los impactos ambientales de la minería es debido a la combinación de varios factores, entre los cuales cabe mencionar los siguientes:

- El incremento de la conciencia medio ambiental en todos los sectores de la sociedad en los años 1980 y 1990.
- El agotamiento de los recursos minerales en zonas mineras, llevando esto a la exploración de nuevas zonas que hasta la fecha eran prístinas, incluyendo áreas de conservación emblemáticas, como bosques nativos o reservas indígenas.
- El incremento de minas a cielo abierto, las cuales se diferencian de las minas subterráneas por tener mayor impacto visual.

- Un sin número de incidentes de contaminación, ocasionados por minas activas o abandonadas, los cuales han ocurrido en todos los continentes (UNEP, 1996; ICOLD, 2001).

En paralelo con el crecimiento de la desaprobación ambiental de la minería, las industrias mineras han desarrollado sistemas de gestión ambiental en sus actividades de operación y restauración para disminuir los posibles impactos ambientales causados por la industria.

Indudablemente, el agua es el principal medio receptor de los contaminantes asociados a la minería, pero no el único. También la actividad minera puede afectar negativamente otros elementos del medio ambiente. Algunos de los posibles impactos no acuáticos se mencionan a seguir:

- Alteraciones directas en el paisaje, ocasionado por las minas a cielo abierto, botaderos y la subsidencia en la superficie de las minas subterráneas.
- Contaminación del aire por la dispersión del polvo, emisión de gases de la maquinaria de las minas y las plantas procesadoras de los minerales.
- Alteración en la vida de los habitantes cercanos debido al ruido y a las vibraciones producidas por las actividades mineras.

Las actividades mineras pueden causar impactos que alteran los flujos de aguas superficiales y subterráneas a escala local y regional. Los impactos negativos causados por la minería están asociados a manejos inadecuados del agua de mina y a infraestructuras inadecuadas.

Es importante recalcar que no todas las aguas de mina tienen mala calidad, alguna de ellas tienen impactos positivos en el medio acuático. A continuación se nombran algunos de estos impactos positivos:

- Un número considerable de aguas de mina tienen una calidad suficientemente buena, que inclusive pueden ser utilizadas para abastecimiento de agua potable (Banks *et al.*, 1996) y muchas más pueden ser usadas para actividades industriales o para riego de cultivos (Reddy *et al.*, 2000).
- La descarga de agua de mina en los cauces superficiales produce dilución de las aguas servidas descargadas en éstos, que de no ser así se encontrarían considerablemente contaminadas.
- Existen aguas de minas que contienen metales disueltos en concentraciones que permiten la extracción de los mismos como un beneficio.

Dejando de lado los impactos positivos de las aguas de mina, la minería puede producir impactos positivos en las aguas de acuíferos contiguos. Por ejemplo, se ha demostrado que la minería subterránea puede incrementar la permeabilidad de acuíferos de areniscas (Booth *et al.*, 1998).

Los impactos de la minería en el ambiente hídrico se producen en diferentes etapas de la actividad minera:

- El proceso de la minería por si mismo.
- Las operaciones del proceso del mineral.
- El drenaje de la mina para hacer posible la explotación del mineral

- La filtración de líquido lixiviado contaminado de las pilas de lixiviación y de los relaves.
- La inundación de las áreas de explotación minera, después de que las mismas han cesado.
- La descarga de agua no tratada después de que la inundación fue completada.

*El proceso de la minería por sí mismo*, principalmente afecta al ambiente hídrico debido a la alteración de la hidrología preexistente. A continuación se mencionan los principales impactos ocasionados por las minas subterráneas y las minas a cielo abierto en los recursos hídricos superficiales y subterráneos.

*Impactos en sistemas hídricos superficiales:*

Los impactos en los cursos de aguas superficiales debido a las minas subterráneas se producen, cuando un cauce es directamente interceptado por caserones de minas subterráneas que han sido inadvertidamente conducidos hacia la superficie por debajo de un cauce o por fracturas causadas por la subsidencia de suelos.

A pesar de que las fracturas y caserones se encuentren obstruidos durante muchos años y ya no sean evidentes, éstos seguirán desviando la escorrentía superficial hacia las minas subterráneas por muchas más décadas.

Los impactos de las excavaciones de los rajos de las minas a cielo abierto en los sistemas hídricos superficiales son a menudo menos sutiles que los de las minas subterráneas, siendo los principales impactos: la intercepción de cauces naturales por los rajos mineros y la pérdida de áreas naturales de escorrentía.

Donde los cauces superficiales atraviesan el rajo minero, normalmente los cauces originales serán desviados alrededor del perímetro del rajo durante la explotación minera por las siguientes razones:

- Si los cauces no son desviados, éstos adicionarán agua al rajo que deberá ser drenada. Como los costos del drenaje del rajo pueden representar una gran proporción del total de los costos de operación, tiene sentido prevenir la incorporación de aguas superficiales en el rajo.
- Si las aguas superficiales pasan a través de la zona de explotación del rajo minero, éstas se contaminarán y deberán ser tratadas para cumplir con los requerimientos de las normas de descarga de agua.
- Si se permite el ingreso de agua de los cauces hacia el rajo, la continuidad natural del cauce original será completamente perdida, pudiendo producir graves consecuencias en la flora y fauna del mismo.

*Impactos en recursos hídricos subterráneos:*

Los impactos en las aguas subterráneas ocasionados por la excavación de las minas subterráneas se relacionan concretamente con la deformación de los estratos cercanos a la excavación y los efectos que éstos producen en las propiedades hidráulicas y el comportamiento hidrogeológico del suelo. En algunos casos las permeabilidades del suelo o roca se ven incrementadas y en otros reducidas, permitiendo el mayor o menor ingreso de agua en la excavación, respectivamente.

En términos de sistemas de aguas subterráneas, la explotación de minas subterráneas de considerable profundidad en acuíferos someros, resulta en la disminución del nivel del agua en el

acuífero (Booth y Spande, 1992; Zipper *et al.* 1997). En algunos casos el nivel del agua en el acuífero se recupera al cesar la explotación minera (Booth y Spande, 1992), mientras que en otros casos la disminución del nivel del agua es permanente (Booth *et al.*, 1998).

Las minas a cielo abierto involucran la excavación y manipulación de roca antes intacta, produciendo la pérdida de almacenamiento en la zona no saturada debido a la remoción de roca e impactos del rajo minero sobre las rocas o suelos cercanos al mismo.

Los impactos de las minas a cielo abierto sobre las rocas o suelos cercanos a las mismas, puede ser considerado menos severo que el ocasionado por las minas subterráneas, simplemente porque las minas a cielo abierto son excavadas al lado de los estratos. Sin embargo, las minas a cielo abierto pueden inducir incrementos considerables de la permeabilidad de suelos o rocas situados inmediatamente alrededor del rajo. Esto puede ser atribuido principalmente a dos procesos:

- Incrementos en la permeabilidad debido a los procesos de tronadura, los cuales se realizan para facilitar la excavación del rajo.
- La extracción de bancos (escalones en que usualmente se realizan las labores de excavación), los cuales inducen a fracturamientos en los estratos situados inmediatamente alrededor del rajo minero.

Aunque las zonas de fracturamiento en las paredes del rajo son limitadas, se puede esperar que incrementen la permeabilidad alrededor de la mina a cielo abierto. Resultados de campañas de terreno y modelaciones de una mina en Virginia West sugieren que las conductividades hidráulicas en las zonas de fractura en las paredes del rajo eran dos órdenes de magnitud mayor que las que presentaba el suelo antes de la excavación del rajo (Hawkins, 1994). La presencia de zonas de alta permeabilidad puede contribuir al desarrollo de condiciones de flujo turbulento de aguas subterráneas en los alrededores del rajo (Dudgeon, 1985a, 1985b, 1997). Esto puede causar importantes consecuencias en la evaluación del impacto del drenaje del agua subterránea.

***Los procesos de los minerales***, en general en el ambiente hídrico tienden a ser localizados y de magnitud limitada. La razón para ello, es que tanto el minero como el encargado de los recursos hídricos, comparten el interés en común de evitar que agua fresca ingrese a la zona de la actividad minera, puesto que de ocurrir esto ambas partes se ven afectadas.

***El impacto ocasionado por el drenaje de la minas*** varía desde impactos insignificantes en el caso de minas superficiales pequeñas (Streetley, 1998; Wardrop *et al.*, 2001) hasta grandes disminuciones del nivel del agua subterránea y de aguas superficiales. A continuación se presentan los posibles impactos que el drenaje de minas puede ocasionar.

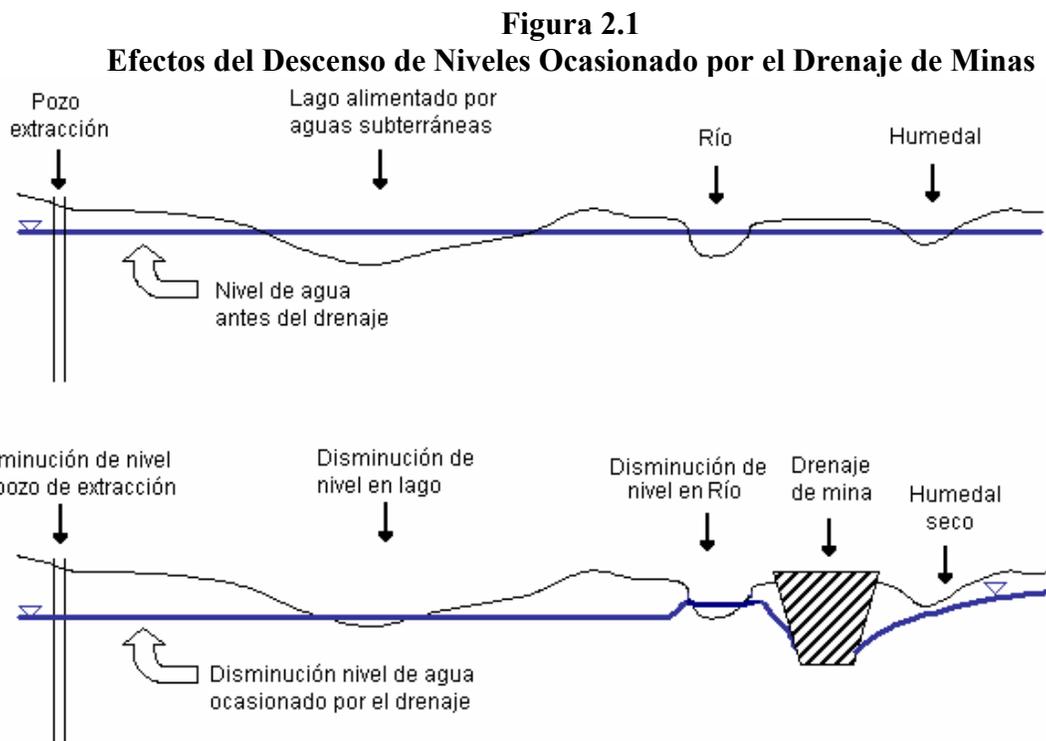
#### *Impactos en la cantidad de agua*

El drenaje de minas inevitablemente ocasiona el descenso del nivel de agua en los alrededores de la mina. Las consecuencias del descenso son conceptualmente los mismos que los ocasionados por el bombeo de aguas subterráneas (p. ej., para abastecimiento de agua potable) y por lo tanto, pueden ser analizados análogamente. Existe bastante literatura de los impactos de pozos de extracción de aguas subterráneas para el abastecimiento de agua potable sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Ninguno de los análisis más recientes ha cambiado los principios básicos enunciado por Theis (1940), quien señaló que cualquier extracción de agua subterránea ocasionará alguna o la combinación de las siguientes consecuencias:

- Decrecimiento en el volumen de almacenamiento natural del agua subterránea.
- Incremento en el caudal de recarga del agua subterránea.
- Decrecimiento en el caudal de descarga natural del agua subterránea.

La particularidad de los sistemas de drenaje de minas está en la maximización deliberada del decrecimiento en el volumen de almacenamiento natural de agua subterránea. Los decrecimientos en el almacenamiento se manifiestan en el descenso del nivel de agua. El descenso del nivel de agua provoca consecuencias socio-ambientales, las cuales no son todas negativas. Un aspecto negativo del descenso de los niveles de agua es que puede dejar pozos de extracción preexistentes secos. Esto también puede conducir al desecamiento de lagos (Figura 2.1), siendo algunos de alto valor ecológico y por ende, produciendo un grave impacto. Por otro lado, el secado de tierras anegadas puede ser ventajoso para la agricultura.

El descenso de los niveles de agua, en áreas donde anteriormente la escorrentía superficial estaba por encima del suelo saturado, puede inducir a mayor recarga subterránea. El agua también puede ser inducida hacia el subsuelo desde cauces superficiales (Figura 2.1). En casos extremos, el drenaje puede conducir al secado completo o parcial de cauces superficiales durante todo el año o parte de éste.



El decrecimiento en la descarga natural desde los acuíferos, es probablemente el impacto más común ocasionado por el drenaje de minas. El drenaje de minas puede ocasionar el secado de vertientes en acuíferos de roca sedimentaria y también puede reducir los caudales de descarga natural en cauces superficiales (Hobbs y Gunn, 1998). En muchos casos, las reducciones de los niveles en los cauces superficiales son compensadas con descargas de agua extraída de la mina en el proceso de drenaje.

### *Impactos en calidad de agua*

Un impacto positivo del drenaje de minas en la calidad del agua, es la contribución a la dilución de aguas contaminadas (Banks *et al.*, 1996). Sin embargo, cuando los efluentes provenientes del drenaje son aguas de mala calidad, los impactos en los cauces superficiales receptores pueden ser perjudiciales. Por ejemplo, los efluentes de las minas de oro de Zimbaue (Smedley *et al.*, 1996) causan contaminación de arsénico en las aguas superficiales y subterráneas. En la mayoría de los casos de contaminación ocasionada por aguas de mina en países desarrollados, se utilizan sistemas de tratamiento para mitigar los posibles daños medioambientales.

### *Impactos geotécnicos*

El descenso del nivel de agua causado por el drenaje de minas a gran escala algunas veces produce la subsidencia del suelo. Esto ocurre comúnmente en terrenos kársticos, donde es posible que existan grandes vacíos en la zona saturada, el descenso del nivel de agua produce la pérdida de soporte del suelo, resultando en el colapso del mismo y produciendo hoyos en la superficie.

Cuando el drenaje de minas se realiza en estratos que contienen limos y arcillas, el asentamiento del suelo sobre el área afectada por el drenaje es uniforme, por la tanto, se produce un descenso general de la superficie.

**La filtración del líquido lixiviado** desde las pilas de lixiviación y de los tranques de relaves, es una de las causas importantes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en muchas zonas mineras. Numerosos casos de pilas de lixiviación que han sido revegetadas décadas atrás continúan contaminando aguas superficiales y subterráneas (Younger *et al.*, 1997).

**La inundación de minas abandonadas** resulta en un marcado deterioro de las aguas de mina debido a la disolución de ácidos y sales, los cuales durante el proceso de drenaje no se encontraban en contacto con flujos de agua (Cairney y Frost, 1975; Younger, 1993). También pueden existir problemas de reactivación de fallas durante el proceso de inundación de minas subterráneas (Donnelly, 2000), debido al aumento de la presión de poros que reduce la resistencia friccional a los movimientos de las fallas extensionales, conduciendo a un incremento de sismicidad temporario.

Cuando la carga hidráulica en un “pit lake” o una mina subterránea inundada excede la carga hidráulica del acuífero adyacente y existe una conexión hidráulica entre la mina y el acuífero, el agua de mina puede ingresar al acuífero y contaminarlo.

En muchos casos, cuando el agua de mina contamina el acuífero, el impacto percibido no es la contaminación del acuífero, sino el impacto en la calidad del agua de los cauces superficiales donde se descarga el agua subterránea contaminada.

Cabe mencionar, que no toda el agua de mina causa degradación a los cauces superficiales receptores de ella. Por ejemplo, el drenaje desde minas abandonadas en muchas partes del mundo sustenta el desarrollo de ecosistemas fluviales y lacustres. Además, cuando la calidad del agua es apropiada, la formación de “pit lakes” permite usarlos como hábitat de especies acuáticas, para práctica de deportes acuáticos u otros.

A continuación se presenta la calidad del agua que contiene el “pit lake” de la mina Island Cooper localizada al norte de la isla de Vancouver. Esta mina de cobre se mantuvo en operación durante 25 años, luego del cese de operación fue inundada con agua de mar. En la Tabla 2.1 se

presentan las concentraciones mínimas y máximas de los parámetros monitoreados durante 17 meses en el “pit lake”.

**Tabla 2.1**  
**Concentración Parámetros Monitoreados - “Pit Lake” Mina Island Cooper**

Parámetro	Concentración	
	Mínima	Máxima
Temperatura (°)	2.89	21.00
Salinidad (psu)	4.88	24.75
Oxígeno Disuelto (mg/L)	8.29	11.69
pH	6.25	8.68
Alcalinidad (mgCaCo <sup>3</sup> /L)	0.14	1.73
Cobre (mg/L)	0.004	0.054
Zinc (mg/L)	0.002	0.657
Molibdeno (mg/L)	0.020	0.046
Manganeso (mg/L)	0.046	1.180

*La descarga de agua de mina no tratada* después de la inundación puede ocasionar: contaminación de agua superficial y de acuíferos someros. Probablemente, el problema de contaminación más común asociado con las minas abandonadas, son las manchas de color rojo/naranja en los lechos de los cauces superficiales (por ejemplo, hidróxidos férricos). Aunque en muchos casos la coloración es considerada simplemente como un problema estético (percepción humana), el hierro puede causar toxicidad directa e indirecta en los ecosistemas acuáticos.

### **2.3 Mecanismos internacionales para regular el impacto en las aguas subterráneas**

El objetivo de la revisión de mecanismos internacionales que regulan el impacto en las aguas subterráneas ocasionados por el drenaje de minas a cielo abierto, es ver como los Gobiernos de Chile, Bolivia y Perú, abordan la problemática de los cambios cuantitativos en los flujos subterráneos causados por las explotaciones mineras a cielo abierto.

Cabe mencionar, que Chile, Bolivia y Perú no cuentan con normativas específicas para regular los impactos causados por el drenaje de rajos mineros en términos del descenso del nivel de los flujos subterráneos. La regulación de estos impactos se realiza a través de normativas del área ambiental y minera que se encuentran relacionadas a los impactos que causa la explotación de minas a cielo abierto. A continuación, se presentan las Leyes, Reglamentos y Códigos que se encuentran relacionados con la actividad de drenaje de rajos mineros en los países anteriormente nombrados.

#### **2.3.1 Normativa Chilena**

La política ambiental del Gobierno de Chile procura hacer ambientalmente sustentable el proceso de desarrollo, velando por “el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.”

En este contexto, la Ley 19300 – Ley de Bases del Medio Ambiente (1994) establece un marco dentro del cual se ordena la normativa ambiental existente y futura. El Artículo 10 -letra i)- de la Ley establece que:

“Los proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles, así como la extracción industrial de áridos, turba o greda” deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

El Artículo 11 –letra b)- de la Ley 19300 establece que:

“Los proyectos enumerados en el Artículo 10 -letra i) que generen efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire” requerirán la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental.

El Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (2002), el cual es un instrumento de gestión ambiental, en el Artículo 6 –letra n)- establece que:

“A objeto de evaluar si un proyecto genera los efectos adversos significativos a que se refiere el Artículo 11 de la Ley 19300, se considerará el volumen, caudal y/o superficie, según corresponda, de recursos hídricos a intervenir y/o explotar en:

- n.1. Vegas y/o bofedales ubicados en las Regiones I y II, que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas.
- n.2. Áreas o zonas de humedales que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas o superficiales.
- n.3. Cuerpos de aguas subterráneas que contienen aguas milenarias y/o fósiles.
- n.4. Una cuenca o subcuenca hidrográfica transvasada a otra; o
- n.5. Lagos o lagunas en que se generen fluctuaciones de niveles.”

Requiriendo el proyecto la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental.

El Artículo 12 del Reglamento del SEIA establece que:

“Los contenidos mínimos detallados para la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental considerarán las siguientes materias: índice, resumen, descripción del proyecto, plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable, descripción de los efectos que hacen necesarios la presentación de un EIA, línea de base, predicción y evaluación del impacto, plan de medidas de mitigación, reparación y/o compensación, plan de seguimiento, descripción de acciones realizadas previamente a la presentación del EIA en relación a consultas y/o encuentros con organizaciones ciudadanas o con personas naturales y apéndice con información documentada de apoyo.”

El Artículo 92 del Reglamento del SEIA establece que:

“Para ejecutar labores mineras en sitios donde se han alumbrado aguas subterráneas en terrenos particulares o en aquellos lugares cuya explotación pueda afectar el caudal o la calidad natural del agua el EIA deberá señalar las medidas adecuadas para la preservación y/o protección de la fuente o caudal que se afectará, de acuerdo a: definición del uso actual y previsto de las aguas, determinación de la alteración que producirían las labores mineras, en los usos previstos de las aguas y caracterización físico-química y biológica del agua.”

El Reglamento de Seguridad Minera (2002) en el Artículo 489 establece que:

“El Plan de Cierre es una herramienta que permite identificar y cuantificar los impactos ambientales negativos generados en la etapa de cierre de una faena minera, así como, definir medidas de acción presentes y futuras para prevenirlos, minimizarlos y/o mitigarlos y desarrollar un cronograma de ejecución de las medidas proyectadas, de forma de dar cumplimiento al marco jurídico ambiental para la etapa de cierre del sitio,” requiriendo las empresas mineras presentar su proyecto de Plan de Cierre para la aprobación del Servicio.”

El Reglamento de Seguridad Minera (2002) en el Artículo 494 establece que:

“En Minas Subterráneas, Rajo Abierto y Canteras, el Proyecto de Plan de Cierre deberá al menos contemplar los siguientes aspectos: desmantelamiento de instalaciones, si fuere necesario, cierre de accesos, sellado de bocaminas y/o piques a superficie, estabilización de taludes, señalizaciones, cierre de almacenes de explosivos y caracterización de efluentes.”

El Código de Minería (1983) en el Artículo 110 establece que:

“El titular de la concesión minera tiene el derecho de aprovechamiento de las aguas halladas en las labores de su concesión, en la medida en que tales aguas sean necesarias para los trabajos de exploración, de explotación y de beneficio que pueda realizar, según la especie de concesión de que se trate. Estos derechos son inseparables de la concesión minera y se extinguirán con ésta.”

En la actualidad el gobierno de Chile está analizando alternativas para el proyecto de ley que propone que antes de iniciar la explotación, las empresas mineras entreguen al Estado una garantía financiera que cubra los Planes de Cierre de minas.

Cabe mencionar, que en Chile el sector minero fue pionero en el desarrollo de los Estudios de Impacto Ambiental.

### 2.3.2 Normativa Boliviana

La política ambiental del Gobierno de Bolivia tiene un enfoque de protección y conservación del medio ambiente y sus recursos naturales, regulando las acciones del ser humano con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible.

En este contexto, la Ley 1333 – Ley de Medio Ambiente (1992) en el Artículo 20, establece que:

“Se consideran actividades y/o factores susceptibles de degradar el medio ambiente: los que contaminan el aire, las aguas, el suelo, el subsuelo y los que producen alteraciones nocivas de las condiciones hidrológicas, edafológicas, geomorfológicas y climáticas.”

El Código de Minería (1997) en el Artículo 87 establece que:

“Las actividades mineras se realizarán conforme al principio de desarrollo sostenible, en sujeción a la Ley del medio Ambiente, sus Reglamentos y el presente Código, debiendo presentar una licencia ambiental que incluirá en forma integrada todas las autorizaciones, permisos o requerimientos de protección ambiental legalmente establecido para las actividades mineras”

El Reglamento Ambiental para Actividades Mineras – RAAM (1997) en el Artículo 5 establece que:

“La licencia ambiental para la realización de actividades mineras, sea esta el certificado de la Declaratoria de Impacto Ambiental (DIA), o la de la Evaluación del Estudio de Impacto Ambiental (EEIA), incluirá en forma integrada todas las autorizaciones, permisos o requerimientos de protección ambiental legalmente establecidos.”

La Ley de Medio Ambiente (1992) en el Artículo 20, establece que:

“Se entiende por Evaluación del Estudio de Impacto Ambiental (EEIA) al conjunto de estudios y sistemas técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de una determinada obra, actividad o proyecto puedan causar sobre el medio ambiente.”

El Código de Minería (1997) en el Artículo 86 establece que:

“Los concesionarios mineros están obligados a mitigar los daños ambientales que se originen en sus concesiones y actividades mineras. Las responsabilidades del concesionario minero por daños al medio ambiente subsisten aún después de la reversión de la concesión minera al dominio originario del Estado. Las acciones por daños al medio ambiente originados en actividades mineras prescriben en el plazo de tres años.”

El Reglamento Ambiental para Actividades Mineras – RAAM (1997) en el Artículo 67 establece que:

“El cierre y rehabilitación del área de actividades mineras debe efectuarse de acuerdo con el Plan de Cierre y Rehabilitación del Área aprobado en la licencia ambiental.”

El Código de Minería (1997) en el Artículo 36 establece que:

“Los concesionarios mineros, para la realización de sus actividades, pueden usar y aprovechar las aguas de dominio público y las que se alumbren o discurren por sus concesiones, con la obligación de protegerlas y restituir las a su cauce o cuenca natural, cumpliendo con lo establecido en el presente Código, la Ley de Aguas, la Ley del Medio Ambiente, sus reglamentos y otras disposiciones referentes a los recursos hídricos.”

### 2.3.3 Normativa Peruana

El objetivo de la política Ambiental del Gobierno Peruano es el mejoramiento continuo de la calidad de vida de las personas, mediante la protección y recuperación del ambiente y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, garantizando la existencia de ecosistemas viables y funcionales en el largo plazo.

En este contexto, el Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero - Metalúrgica (1993) en el Artículo 7, establece que:

“Los titulares de concesiones mineras que, habiendo completado la etapa de exploración, proyecten iniciar la etapa de explotación, deberán presentar al Ministerio de Energía y Minas un Estudio de Impacto Ambiental del correspondiente proyecto.”

El Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero - Metalúrgica (1993) en el Artículo 10, establece que:

“El PAMA de las actividades de exploración y/o explotación en las operaciones de minado subterráneo y a cielo abierto deben identificar y contemplar el tratamiento de: emisiones de partículas, gases y ruido, calidad y flujo de aguas superficiales y subterráneas, alteración de acuíferos, estabilidad de los taludes, fracturas e inestabilidad del suelo, remoción del suelo y de la vegetación, disposición adecuada de materiales no utilizables e interrupción de otros usos del suelo y áreas pobladas aledañas durante las actividades mineras.”

La Ley 28611 – Ley General del Ambiente (2005) en el Artículo 25 define los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) como:

“Instrumentos de gestión que contienen una descripción de la actividad propuesta y de los efectos directos o indirectos previsibles de dicha actividad en el medio ambiente físico y social, a corto y largo plazo, así como la evaluación técnica de los mismos. Deben indicar las medidas necesarias para evitar o reducir el daño a niveles tolerables.”

La Ley General del Ambiente (2005) en el Artículo 26 establece que la autoridad competente puede aprobar los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA):

“Para facilitar la adecuación de una actividad económica a obligaciones ambientales nuevas, debiendo asegurar su debido cumplimiento a través de objetivos de desempeño ambiental explícitos y metas, así como las medidas de prevención, control, mitigación, recuperación y eventual compensación que corresponda.”

El Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero - Metalúrgica (1993) en el Artículo 27, establece que:

“El Plan de Cierre para el área objeto de la concesión, para operaciones de minado subterráneo y a cielo abierto, debe contemplar normas relacionadas con: medidas que garanticen la estabilidad del terreno, revegetación, de ser técnica y económicamente viable y medidas para prevenir la contaminación de los cuerpos de agua. Asimismo, deberá indicar el monto y plan de constitución de garantías ambientales exigibles.”

La Ley 28090 – Ley que Regula el Cierre de Minas (2003) en el Artículo 11 establece que:

“El titular minero deberá constituir garantías a favor de la autoridad competente para cubrir los costos de las medidas de rehabilitación para los períodos de operación de Cierre Final y Post Cierre”

La Ley General de Minería (1992) en el Artículo 37 establece que los titulares de las concesiones gozan del atributo de:

“Usar las aguas que sean necesarias para el servicio doméstico del personal de trabajadores y para las operaciones de la concesión, de conformidad con las disposiciones legales sobre la materia.”

#### **2.4 Procedimientos para mitigar los impactos en el medio ambiente hídrico**

Antes de la implementación de una estrategia para mitigar los impactos en el medio ambiente hídrico, será necesario implementar un sistema de monitoreo de aguas superficiales y subterráneas alrededor de la mina (Streetly, 1998). Idealmente, el sistema de monitoreo debería ser implementado varios años antes del comienzo del drenaje. En muchos casos, puede ser necesario construir modelos numéricos para interpretar y predecir los impactos y poder evaluar razonablemente las estrategias de mitigación (Dottridge y Keeble, 1998).

##### ***Mitigación de problemas de flujos: compensación de agua***

El agua drenada de las minas requiere un lugar para ser descargada, en la mayoría de los casos, el agua será descargada en el cauce superficial más cercano. Si este cauce superficial presenta una pérdida de caudal debido al drenaje de la mina, la descarga del agua bombeada tendrá un efecto positivo, proporcionándole una “compensación de agua”. Es importante hacer notar, que las descargas relativamente constantes hacia los cauces superficiales, alterarán el régimen hidrológico natural del cauce. En muchos casos, esta alteración será de poca importancia, pero en algunos casos podrá ser ecológicamente perjudicial. En algunas circunstancias, es necesario almacenar el agua del drenaje en reservorios artificiales y descargar el agua a los cauces superficiales de una forma más compatible con los requerimientos ecológicos locales.

En algunos casos, la faena minera se encuentra inconvenientemente ubicada con respecto a los cauces superficiales afectados por el drenaje de la mina, siendo no factible la compensación directa de agua. En estos casos, el balance costo-beneficio favorece al desarrollo de fuentes externas a la mina para compensar el descenso del caudal en los cauces.

Cabe mencionar, que cuando es necesaria la desviación de un cauce superficial que pasa por el sector de un rajo minero, inevitablemente la desviación del cauce produce impactos en la vida acuática de éste. La desviación del cauce a través de tuberías enterradas o conductos subterráneos es la solución menos apropiada desde el punto de vista ecológico y debe ser evitado.

#### ***Mitigación de los efectos de los niveles de agua subterránea***

El descenso de los niveles de aguas subterráneas alrededor de las minas puede impactar a otros usuarios de esta fuente de agua debido al descenso del nivel de agua en sus pozos, resultando en un mayor costo de bombeo e inclusive en algunos casos secando el pozo. En la práctica, es casi imposible demostrar si el descenso del nivel observado en un pozo es atribuible al drenaje, alguna otra actividad de bombeo local o inclusive a un cambio climático (Dudgeon, 1997). En vez de perder dinero en litigaciones infructuosas, las compañías mineras prefieren compensar a los usuarios perjudicados a través de fuentes de agua alternativas, como pozos más profundos u otras alternativas (Wardrop *et al.*, 2001).

Las consecuencias ecológicas del descenso del nivel de agua pueden ser menos fácil de mitigar. En algunos casos, puede ser necesario instalar paredes impermeables o inyectar agua en áreas sensibles para mantener niveles de agua apropiados (Cliff y Smart, 1998).

#### ***Mitigación de problemas de calidad de agua***

El manejo de la calidad de agua en las minas activas depende del tipo de mina, obviamente el esfuerzo requerido para mitigar los potenciales impactos de la descarga de agua de mina varía drásticamente. En los casos más extremos, es común que las minas desarrollen e implementen una política de “cero descargas”. En los casos menos extremos, el agua drenada puede ser descargada directamente hacia cauces superficiales. En la mayor parte de los casos intermedios, será necesario aplicar algún tipo de tratamiento al agua antes de descargarla a un cauce.

En la etapa de abandono de una mina a cielo abierto, una de las medidas de prevención de la formación de “pit lakes” de aguas ácidas, es el llenado rápido de los rajos mineros con agua, para inhibir la actividad de las bacterias oxidantes de azufre y promover condiciones anóxicas al fondo del “pit lake”, minimizando de este modo la formación de ácidos y metales disueltos.

En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de los posibles impactos negativos ocasionados por la actividad minera en el medio ambiente hídrico superficial y subterráneo y las alternativas de mitigación de éstos impactos.

**Tabla 2.2**  
**Impactos Negativos en Medio Ambiente Hídrico**

<b>Etapa Actividad Minera</b>	<b>Impacto</b>	<b>Mitigación</b>
Proceso de la minería por sí mismo	Desviación escorrentía superficial hacia las minas subterráneas a través de caserones.	Construir estructuras de derivación de aguas (reservorios, canales, tuberías enterradas).
	Intercepción de cauces naturales por rajos mineros y pérdida de áreas de escorrentía.	
Drenaje de la mina	Decrecimiento en el volumen de almacenamiento del agua subterránea, el cual se manifiesta en el descenso del nivel del agua en los alrededores de la mina.	Fuentes alternativas de agua.
		Construir pozos más profundos.
	Decrecimiento en el caudal de descarga natural del agua subterránea, pudiendo ocasionar secado de vertientes y reducción de caudales de descarga natural en cauces superficiales.	Construir paredes impermeables.
		Inyección de agua en áreas sensibles para mantener niveles de agua apropiados.
La descarga en cauces superficiales de efluentes de mala calidad provenientes del drenaje, pueden ser perjudiciales para los cauces receptores.	La reducción del nivel en cauces superficiales es compensada con descarga de agua extraída de la mina en el proceso de drenaje.	
		Inyección de agua en áreas sensibles para mantener niveles de agua apropiados.
		Tratamiento del agua antes de descargarla a un cauce superficial.
Filtración líquido lixiviado	Desde pilas de lixiviación y tranques de relaves produce contaminación de aguas superficiales y subterráneas en zonas mineras.	Construcción de sistemas de impermeabilización del suelo.
		Construcción de sistemas de colección de filtraciones.
Inundación minas (etapa cierre)	Deterioro del agua de mina debido a la disolución de ácidos y sales, los cuales durante el proceso de drenaje no se encontraban en contacto con flujos de agua.	Una medida de prevención de la formación de “pit lakes” y minas subterráneas de aguas ácidas, es el llenado rápido de los éstos con agua, minimizando la formación de ácidos y metales disueltos.
	Agua de mina de mala calidad puede contaminar acuíferos y cauces superficiales.	

### **3. PROGRAMAS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DEL DRENAJE DE MINAS**

#### **3.1 Introducción**

La simulación del agua subterránea que fluye a través de los acuíferos y unidades geológicas es una herramienta clave para la predicción, manejo y control de los recursos hídricos. En la actualidad, existen diversos programas comerciales que permiten realizar la modelación de los flujos subterráneos.

El objetivo fundamental de la modelación numérica del drenaje de un rajo minero es evaluar el impacto físico causado en las aguas subterráneas cercanas debido al drenaje del rajo, para lo cual se utilizan softwares comerciales y una adecuada representación del rajo y de los efectos que éste provoca en los niveles de agua del acuífero.

Para lograr los objetivos anteriormente mencionados se utilizan herramientas computacionales de uso común en hidrogeología como el Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, softwares comerciales basados en diferencias finitas, mundialmente utilizados para la simulación del flujo de agua subterránea en tres dimensiones tanto en medios porosos tradicionales como en medios porosos no tradicionales como rocas fracturadas. Esto último es muy común en el caso de muchas minas a cielo abierto. Estas herramientas computacionales están diseñadas para el uso de hidrogeólogos experimentados y requieren de información que debe provenir de estudios hidrogeológicos tradicionales. A continuación, se presenta una descripción, ventajas y desventajas de los programas anteriormente mencionados.

#### **3.2 MODFLOW (Modular Finite Difference Groundwater Flow Model)**

##### **3.2.1 Descripción del MODFLOW**

El modelo MODFLOW simula en tres dimensiones el flujo subterráneo en medios porosos y utiliza una estructura modular que permite entender mejor el modelo y modificarlo si es necesario.

Fue desarrollado por el Servicio Geológico de los EE.UU. a mediados de la década del 70 y está escrito en FORTRAN. Utiliza el método de diferencias finitas para resolver un sistema de ecuaciones basadas en la fórmula de Darcy, que explica el movimiento de un fluido en un medio poroso saturado (McDonald M. y Harbaugh W., 1988). Simula también las condiciones estacionarias. Los ejes principales de conductividad hidráulica se alinean con las coordenadas direccionales asumiendo que el agua tiene densidad constante. Se evalúa la derivada temporal utilizando la aproximación diferencial. Los pozos, los ríos, los drenes, la evapotranspiración y la recarga son simulados como condiciones de borde y son representados como elementos donde se conoce el nivel de energía o nivel de agua. Los acuíferos se representan por aproximación tridimensional. Los nodos de esta aproximación pueden cambiar de confinados a no confinados y recíprocamente, en el desarrollo del proceso informático.

La estructura modular consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes llamadas módulos. Los módulos están agrupados en paquetes. Cada paquete se encarga de una característica específica del sistema hidrológico que será simulado, como flujos de ríos o flujos hacia drenajes, o de un método específico de resolución de la ecuación lineal que describe el flujo del sistema. La división del programa en módulos permite al usuario examinar características

específicas del modelo independientemente. También se facilita el desarrollo de nuevas capacidades, ya que los nuevos paquetes pueden ser añadidos al programa sin modificar los paquetes existentes.

### 3.2.2 Entradas y salidas del MODFLOW

Los datos de entradas del programa son los parámetros hidrogeológicos del acuífero, las condiciones de borde y las condiciones iniciales. El ingreso es realizado desde archivos de texto con los datos en un orden predefinido. La entrada de datos corresponde con la estructura de la malla. Muchos usuarios utilizan programas separados para discretizar los datos en la forma requerida. Sin embargo, estos programas no se incluyen como parte del MODFLOW.

La salida primaria del modelo es el nivel de agua en cada nodo. En adición, se calcula un balance hídrico y el flujo en cada celda del modelo se almacena en un archivo. Los programas soporte que se utilizan para analizar y presentar la salida no están incluidos en el MODFLOW.

### 3.2.3 Modelo matemático del MODFLOW

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un material de medio poroso puede describirse por la ecuación diferencial parcial Ec. 3.1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

- $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  : conductividad hidráulica [L/T]
- $W$  : excitaciones adicionales del sistema, como la recarga o los bombeos [ $L^3/T$ ]
- $S_s$  : almacenamiento específico [ $L^{-1}$ ]
- $h$  : carga hidráulica o nivel de agua [L]

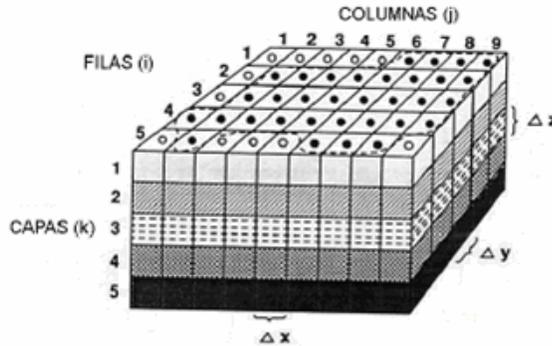
En general  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  pueden ser funciones del espacio y  $W$  puede ser función del tiempo y del espacio. La ecuación describe el flujo de agua subterránea en condiciones de no-equilibrio, en un medio heterogéneo y anisotrópico, siempre que los ejes de coordenadas estén alineados con los ejes principales de la conductividad hidráulica.

La ecuación 3.1 junto con las condiciones de borde de flujo y/o niveles de agua y las condiciones iniciales de borde, constituyen la representación matemática del sistema de flujo de aguas subterráneas. Para resolver esta ecuación, el MODFLOW utiliza el método de diferencias finitas, donde el sistema continuo descrito por la ecuación es reemplazado por un set finito de puntos discretos en el espacio y en el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por términos calculados de la diferencia en valores de carga hidráulica en esos puntos. El proceso lleva a sistemas simultáneos de ecuaciones de diferencias algebraicas lineales; su solución entrega valores de carga en puntos y tiempos específicos. Estos valores constituyen una aproximación a la distribución continua de cargas hidráulicas variando en el tiempo que entregaría una solución analítica de la ecuación diferencial parcial de flujo.

**Discretización temporal y espacial**

Un sistema acuífero real es representado por medio de un arreglo de bloques llamados celdas, cuyas ubicaciones se describen en términos de filas, columnas y capas como se puede observar en la Figura 3.1.

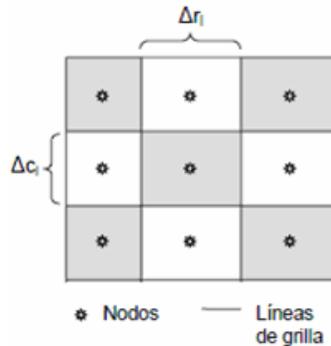
**Figura 3.1**  
**Discretización Espacial de un Sistema Acuífero**



(Fuente: USGS)

Dentro de cada celda hay un punto llamado nodo, en el cual se calcula la carga (h). El MODFLOW define la configuración de celdas respecto a la ubicación de los nodos (bloque centrado).

**Figura 3.2**  
**Sistema de Celda de Bloque Centrado**



(Fuente: USGS)

El tiempo es discretizado en períodos de tiempos definidos por el usuario, los que a la vez se subdividen en pasos de tiempo de longitud creciente, definidos según una progresión geométrica en la que el usuario también define el factor multiplicador.

**Ecuaciones de diferencias finitas**

La ecuación de flujo del agua subterránea en la forma de diferencias finitas se obtiene al aplicar la ecuación de continuidad en una celda. Considerando que la densidad del agua se mantiene constante se obtiene la ecuación 3.2, la cual es análoga a la ecuación 3.1:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h_t}{\Delta t} \Delta V_C \tag{Ec. 3.2}$$

Donde:

$Q_i$  : tasas de flujo entrando y/o saliendo de la celda [ $L^3T^{-1}$ ]

$S_S$  : almacenamiento específico en la formulación de diferencias finitas [ $L^{-1}$ ]

$\Delta V_c$  : volumen de la celda [ $L^3$ ]

$\Delta h_t$  : variación de la carga en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  [L]

En el caso del flujo entrando en la celda  $i, j, k$  en la dirección de la fila, desde la celda  $i, j-1, k$  (Figura 3.3), éste se expresa según se muestra en las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$q_{i,j-1/2,k} = CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$CR_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

$h_{i,j,k}$  : carga hidráulica o nivel de agua en el nodo  $i, j, k$  [L]

$q_{i,j-1/2,k}$  : descarga volumétrica entre las caras  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [ $L^3T^{-1}$ ]

$KR_{i,j-1/2,k}$  : permeabilidad en la dirección de la fila entre los nodos  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [ $LT^{-1}$ ]

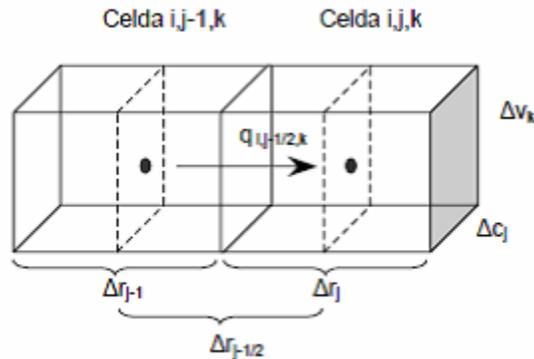
$\Delta c_i \Delta v_k$  : área de la cara de la celda normal a la dirección de flujo [ $L^2$ ]

$\Delta r_{j-1/2}$  : distancia entre los nodos  $i, j, k$  e  $i, j-1, k$  [L]

$CR_{i,j-1/2,k}$  : conductancia en la fila  $i$  y estrato  $k$  entre los nodos  $i, j-1, k$  e  $i, j, k$  [L]

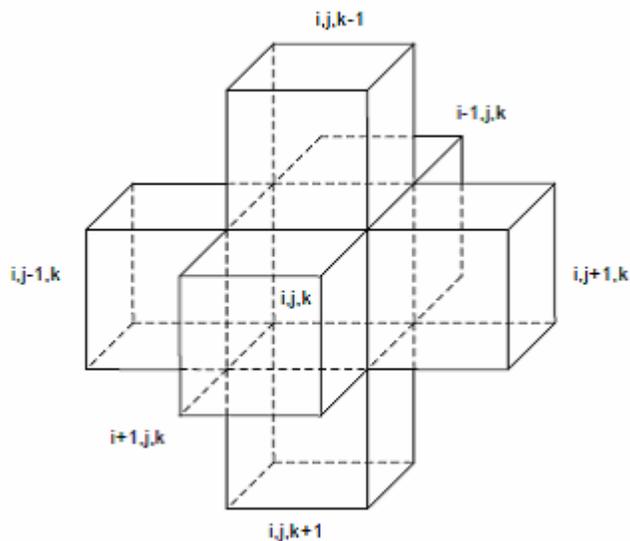
En la Figura 3.4 se muestra un esquema de una celda de diferencias finitas y los índices utilizados para identificar a sus seis celdas vecinas.

**Figura 3.3**  
**Flujo Entrando a la Celda  $i, j, k$  desde la Celda  $i, j-1, k$**



(Fuente: USGS)

**Figura 3.4**  
**Celda  $i, j, k$  e Índices Utilizados para sus Seis Celdas Vecinas**



(Fuente: USGS)

### 3.2.4 Evolución del MODFLOW

El programa de modelación de flujos subterráneos MODFLOW desde su creación ha ido evolucionando con el tiempo, a continuación se presentan algunas de las principales modificaciones e incorporaciones de nuevos paquetes que se le han realizado al programa para mejorar su funcionamiento.

#### ***MODFLOW 88***

El flujo subterráneo es simulado utilizando una aproximación de diferencias finitas de bloque centrado. Las capas pueden ser simuladas como confinadas, no confinadas o una combinación de confinadas y no confinadas. Las ecuaciones de diferencias finitas pueden ser resueltas utilizando los algoritmos de cálculo Strongly Implicit Procedure (SIP) o Slice-Successive Overrelaxation (SOR).

#### ***MODFLOW 96***

Los cálculos del balance fueron modificados para duplicar la precisión. La inexactitud de estos cálculos eran a veces sensibles en el modelo original, cuando una grilla de 100.000 o más celdas era utilizada o también cuando se utilizaba una conductancia grande.

#### ***MODFLOW 2000***

Además de simular el flujo de agua subterránea, el alcance de MODFLOW-2000 fue ampliado para incorporar capacidades relacionadas como el transporte de contaminantes y la estimación de parámetros.

Para incorporar la solución de múltiples ecuaciones relacionadas, una cuarta entidad de modularización se añadió y se la llamo proceso. Un proceso es una parte del código que soluciona una ecuación fundamental por un método numérico especificado. Por ejemplo, la solución de la ecuación del flujo subterráneo usando el método de diferencia finita, ahora se la llama proceso Ground Water Flow (GWF). El Proceso de GWF incluye todos los aspectos de

solucionar la ecuación de flujo, incluyendo la formulación de las ecuaciones de diferencia finita, la entrada de datos, solución de las ecuaciones simultáneas resultantes y la salida de datos.

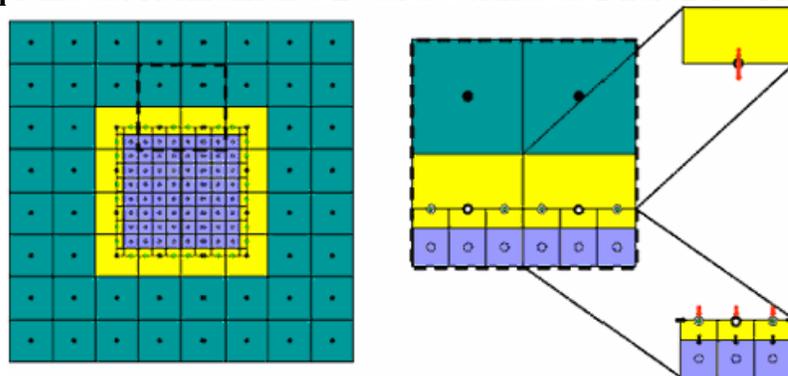
### **MODFLOW 2005**

El principal cambio de MODFLOW-2005, fue la incorporación de una aproximación diferente para manejar datos internos. Los módulos de FORTRAN son usados para declarar los datos que pueden ser compartidos entre subrutinas. Esto permite que los datos puedan ser compartidos sin usar argumentos de subrutina. Como consecuencia de la utilización de módulos FORTRAN, un cambio en la terminología de MODFLOW ha sido realizado. A las subrutinas de MODFLOW al principio se las llamaba módulos, en el MODFLOW 2005 el término módulo ha sido eliminado y substituido por el termino de subrutina.

MODFLOW-2005 emplea módulos de FORTRAN para almacenar y compartir datos. Cada paquete incluye uno o varios módulos de FORTRAN que declaran los datos compartidos para ese paquete. Los módulos son diseñados de modo que los datos de múltiples grillas puedan ser simultáneamente definidos. El soporte de múltiples grillas hace posible incorporar el refinamiento de la grilla local en el MODFLOW (Mehl y Hill, 2004).

Se introdujo una nueva complejidad, cuando la posibilidad de refinamiento de grilla local (LGR, Local Grid Refinement) se añadió a MODFLOW. El LGR requiere que los datos sean definidos para múltiples grillas, al menos una grilla regional para el área entera modelada y una grilla refinada que contiene un subconjunto del área modelada. Las grillas regionales y refinadas deben tener datos definidos.

**Figura 3.5**  
**Esquema del Refinamiento Local de Grillas de Diferencias Finitas**



(Fuente: USGS)

La utilización de una grilla en la zona refinada puede ser computacionalmente menos intensiva que otros métodos. El LGR une dos o más grillas de diferencia finita diferentes: una grilla gruesa que cubre un área grande que incorpora condiciones regionales de borde, y una grilla fina que cubre un área más pequeña de mayor interés, como se puede observar en la Figura 3.5. A las grillas gruesas se las llama padres y a las grillas refinadas se las llama hijos. El refinamiento de grilla puede ser vertical así como horizontal. El enlace entre las grillas padres e hijos puede ser logrado como un acoplamiento de dirección única, en el cual las condiciones simuladas por la grilla padre son impuestas como condición de borde de la grilla hijo. O bien, el enlace puede ser logrado en ambas direcciones, es decir, que también incluye la retroalimentación de la grilla hijo a la grilla padre.

### 3.3 Visual MODFLOW

#### 3.3.1 Descripción del Visual MODFLOW

Es uno de los modelos de aguas subterráneas más ampliamente utilizado en todo el mundo. El Visual MODFLOW es una interfaz gráfica desarrollada por Waterloo Hydrogeologic Inc., que facilita y permite visualizar el ingreso de datos y los resultados del procesamiento de los mismos en el MODFLOW.

Su interfaz gráfica se divide en tres módulos separados: Input, Run y Output, asociados a las opciones de ingreso de parámetros, de ejecutar el programa y de desplegar los resultados de simulación, respectivamente.

El módulo de Input permite el ingreso de información para la construcción del modelo. Se representa el área de interés en un arreglo de celdas rectangulares horizontales (filas y columnas) y estratos verticales (capas o estratos), pudiendo ajustar las dimensiones de filas y columnas. A cada celda, en las distintas capas, se le puede definir como activa o inactiva (permeable o impermeable), asignar valores de propiedades de flujo y/o transporte, condiciones de borde (río, dren, carga constante, carga general, recarga, evapotranspiración y barreras horizontales de flujo) y condiciones iniciales (carga inicial, concentraciones iniciales). Es posible importar superficies, tanto aquellas que definen la geometría del acuífero como las condiciones iniciales, desde distintos formatos (ASCII, GRID). Considera también el ingreso de pozos de extracción, inyección y observación, y el cálculo de balances en zonas definidas por el usuario. La discretización temporal se realiza en períodos de tiempo, los que a su vez se dividen en pasos de tiempo definidos según una progresión geométrica.

El módulo de Run permite escoger entre distintas estimaciones de carga inicial, definir el número de pasos de tiempo dentro de un período de tiempo y su razón geométrica (multiplicador de paso de tiempo), elegir entre distintos algoritmos de cálculo y ajustar los criterios de convergencia, definir tipos de estrato (confinado, no confinado) y distintas condiciones de anisotropía.

El módulo Output permite la visualización de los resultados de la simulación como series de tiempo de los niveles calculados y de la superficie freática (altitud y/o profundidad) para distintos períodos de tiempo. Entrega la serie de balances hídricos en los sectores predefinidos (Zone Budget) y dispone de distintas herramientas para controlar la calibración manual del modelo (gráficos de series de tiempo y dispersión de cargas calculadas vs. observadas, parámetros estadísticos de calibración, entre otros).

Los archivos creados por MODFLOW son almacenados en formato ASCII para permitir a usuarios avanzados generar su propia base de datos usando sus propios programas. Si se intenta esto, se recomienda hacer un respaldo de los datos de los archivos generados por Visual MODFLOW antes de reemplazarlos o modificarlos manualmente.

#### 3.3.2 Evolución del Visual MODFLOW

El programa Visual MODFLOW se ha ido actualizando con el objetivo de brindar a los usuarios instrumentos más eficientes para la construcción y el análisis de los modelos de aguas subterráneas. A continuación se presentan algunas de las actualizaciones más importantes en las últimas versiones del Visual MODFLOW.

### ***Visual MODFLOW 3.0***

Soporta la nueva versión del MODFLOW 2000, para controlar las simulaciones de flujo de aguas subterráneas, pero aún no soporta todas las nuevas capacidades de análisis del MODFLOW 2000, como el proceso de observación, sensibilidad y estimación de parámetro. Sin embargo, si soporta el PEST, que es un programa de estimación de parámetro más robusto.

También soporta el algoritmo de cálculo AMG (Algebraic Multigrid Solver Package) incorporado en el MODFLOW 2000. El AMG cuenta con algunas ventajas que otros algoritmos de cálculo disponibles para MODFLOW 2000 no cuentan, por ejemplo, puede resolver problemas con grillas grandes (mayor a 40.000 celdas) y/o un campo de conductividad hidráulica sumamente variable. El solucionador AMG es de 2 a 25 veces más rápido que el PCG2 (Preconditioned Conjugate-Gradient Package) del MODFLOW, pero requiere de 3 a 8 veces mayor capacidad de memoria que el PCG2.

### ***Visual MODFLOW 3.1***

Soporta el paquete MODFLOW-SURFACT, el cual es una poderosa herramienta que ha sido desarrollada para resolver muchas de las limitaciones del código estándar del MODFLOW del USGS. MODFLOW-SURFACT utiliza métodos numéricos especiales y poderosos algoritmos de cálculo para evitar los problemas de convergencia causados por las celdas secas.

El Visual MODFLOW 3.1 permite asignar nombres descriptivos a cada zona de recarga y asignar flujo de recarga a las celdas en cualquier estrato del modelo. Esto permite usar la condición de borde de recarga como una condición de borde de flujo específica en otros estratos que no sea el estrato superior o el primer estrato activo superior.

### ***Visual MODFLOW 4.0***

Incorpora la optimización de pozos de bombeo utilizando el programa MGO (Modular Groundwater Optimizer). El MGO se utiliza para optimizar la ubicación de pozos de bombeo y/o inyección y su respectivo caudal, buscando minimizar o maximizar algún criterio específico.

Esta nueva versión del Visual MODFLOW incorpora el análisis predictivo usando el PEST-ASP, el cual es similar al Goal Programming. El usuario puede pedir al programa que minimice o maximice una respuesta específica del sistema (p. ej., el nivel de agua en el acuífero o la concentración de aguas subterráneas) a través del ajuste de parámetros del modelo, seleccionados dentro de los límites dados. Usando el análisis predictivo, el modelador es capaz de sustituir el análisis de sensibilidad tradicional de ensayo y error a través de preguntas como:

- ¿Cual es la máxima filtración de una sección del río debido al bombeo cercano?
- ¿Cual es el máximo ascenso del nivel freático en una cierta posición seleccionada debido a la irrigación?

### ***Visual MODFLOW 4.1***

Implementa el SEAWAT del USGS, el cual permite la modelación de flujo de densidad variable, como la modelación de problemas de intrusión de agua de mar. SEAWAT combina un código de flujo (MODFLOW) con un código de transporte de contaminantes (MT3DMS) para formar un solo programa que soluciona las ecuaciones de flujo y transporte de contaminantes. El programa formula ecuaciones de flujo que usan la conservación de masa, en vez de la conservación de volumen (MODFLOW-2000).

El Visual MODFLOW 4.1 incluye el algoritmo de cálculo SAMG (Algebraic Multigrid Methods for Systems Package) desarrollado por el Instituto de SCAI FRAUHOFFER en Alemania. Este algoritmo de cálculo demostró ser de 3 a 11 veces más rápido que el tradicional PCG para modelos de tamaño medio, y aún más rápido para modelos grandes que contienen un millón de celdas o más.

En la nueva versión del Visual MODFLOW, el algoritmo de cálculo GMG (Geometric Multigrid Solver Package) del USGS ha sido integrado con el MODFLOW 2000 y el SEAWAT 2000. En contraste con el algoritmo de cálculo AMG, el precondicionamiento en GMG está basado en el método de la multigrilla geométrica. El GMG ha demostrado que reduce enormemente el tiempo de ejecución del modelo, comparado con otros algoritmos de cálculo que utilizan una cantidad similar de memoria.

### ***Visual MODFLOW 4.2***

Incorpora el paquete MIKE 11, el cual es una herramienta versátil para la modelación de las condiciones de borde de ríos, lagos o embalses, irrigación de canales y otros sistemas hídricos, permitiendo la interconexión de flujo superficial – flujo subterráneo.

#### **3.3.3 Fortalezas y debilidades del Visual MODFLOW**

La representación gráfica de la modelación facilita el ingreso de los datos y la visualización de resultados de los mismos. Al ser un modelo cuasi tridimensional, Visual MODFLOW está capacitado para representar de una manera más realista los problemas modelados.

Una de las más grandes debilidades del Visual MODFLOW, producto de su formulación numérica, es la imposibilidad de resaturar celdas secas, las que se secan durante el proceso de cálculo. Esto lleva a cometer errores de cálculo, al momento de cuantificar caudales de extracción o direcciones de flujos.

La resolución numérica al utilizar el método de diferencias finitas trabaja mejor con acuíferos rectangulares o prismáticos y de composición uniforme, por lo que la modelación de acuíferos irregulares o curvos, con propiedades de anisotropía y heterogeneidad es difícil de resolver mediante esta metodología.

## **3.4 MODFLOW – SURFACT**

### **3.4.1 Descripción del MODFLOW – SURFACT**

El programa MODFLOW – SURFACT es una poderosa herramienta que ha sido desarrollada para resolver muchas de las limitaciones del código estándar del MODFLOW del USGS. El MODFLOW-SURFACT contiene nuevos paquetes que complementan la versión original del MODFLOW. Los paquetes relacionados con la modelación del flujo del agua subterránea reciben el nombre de SURF y los paquetes ACT están asociados a la modelación del transporte de contaminantes.

La sigla SURFACT significa:

S, esquemas para modelación robusta y eficiente (Schemes)

U, tratamiento riguroso del flujo no saturado (Unsaturated)

R, condiciones de borde de recarga y de filtraciones laterales (Recharge)

F, representación de fracturas en el pozo (Fracture)

ACT, análisis de transporte de contaminante (Analysis of Contaminant Transport)

En este estudio se analizarán solamente los paquetes relacionados con la modelación del flujo de agua subterránea.

#### ***Paquete de flujo centrado por bloque (BCF4)***

El código de MODFLOW utiliza una aproximación de diferencia finita por bloque centrado para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas. El dominio de flujo es discretizado en filas, columnas y capas, tal que cada nodo representa un bloque rectangular de material poroso que se denomina como una celda. Un nodo en la grilla de diferencia finita representa ya sea una celda sin flujo, una celda de carga variable, o una celda de carga constante, y cualquier propiedad hidráulica asociada con una celda es especificada al nodo correspondiente.

Para simulaciones de flujo no confinado, el paquete BCF1 del código original de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) convierte una celda de carga variable desaturada en una celda sin flujo. Esto resulta en la exclusión permanente de partes del dominio de flujo del modelo de simulación. La incapacidad de MODFLOW para volver estas celdas a celdas de carga variable en caso de cualquier recuperación de niveles, puede hacer que el código produzca resultados de simulación erróneos.

Una tentativa fue hecha por McDonald et al. (1991) para convertir nuevamente celdas sin flujo en celdas de carga variable para permitir la nueva saturación de las celdas de ser necesario. El esquema de rehumedecimiento fue puesto en práctica en el Paquete BCF2. El esquema utiliza cargas en las celdas vecinas para determinar si hay que convertir de nuevo una celda sin flujo en una celda de carga variable.

Lamentablemente, la opción de rehumedecimiento del BCF2 es propensa a problemas de convergencia y de estabilidad durante el rehumedecimiento o cuando las celdas secas son retiradas (McDonald et al., 1991). Esto es porque el procedimiento ad hoc de reactivar celdas secas puede violar seriamente los principios de flujo y conservación de masa. Además, el esquema del promedio armónico de transmisibilidad usado en el código se hace físicamente incoherente cuando la carga dependiente de la transmisibilidad de una celda vecina se reduce a cero. Debido a los problemas asociados con la opción de rehumedecimiento del BCF2, se añadió al MODFLOW el paquete BCF3 para proporcionar procedimientos alternativos para hacer un promedio de transmisibilidades.

En vista de las dificultades encontradas con los procedimientos de rehumedecimiento, era necesario el desarrollo de una aproximación rigurosa que satisficiera las exigencias de continuidad de flujo y permitiera el libre movimiento de la capa freática en capas no confinadas, sin que cualquier clase de conversión forzada sea necesaria. HydroGeologic, Inc. desarrolló una aproximación innovadora que usa una formulación de flujo saturado variable en 3-D con funciones de retención de agua de pseudo suelo automáticamente generadas para reducir el problema de flujo no saturado a uno de buscar el nivel de la capa freática (por ejemplo, la elevación donde la carga de presión es cero o la presión atmosférica) en una celda. La formulación fue diseñada para proporcionar la delineación exacta de la capa freática y capturar la respuesta retrasada de un sistema no confinado al bombeo y recarga.

Los datos requeridos para la simulación son inalterados, ya que las relaciones de pseudo suelo son usadas en vez de las relaciones constitutivas de los verdaderos suelos. Las ventajas claves de la aproximación incluyen:

- Tratamiento riguroso de flujo de 3-D (por ejemplo, sin suposiciones Dupuit) que no requiere celdas de conexión activas e inactivas.
- Esquema numérico robusto con buena convergencia, estabilidad, capacidad de manejar desaturización completa y nueva saturación de celdas.

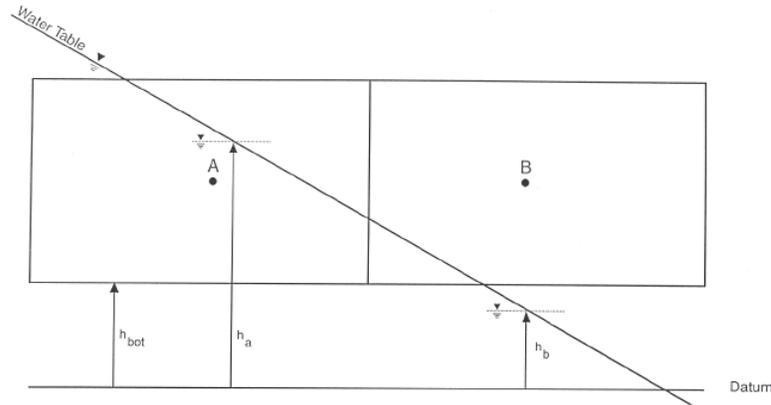
Usando el método de diferencia finita, la formulación de saturación variable con funciones de pseudo suelo es programada en el BCF3 (media armónica de transmisibilidades) y la nueva versión se menciona como el Paquete BCF4. La nueva opción del paquete BCF4 calcula la conductancia de ínter bloque como un producto de la media armónica del bloque de conductividades hidráulicas, la permeabilidad relativa, y el flujo medio del área. El BCF4, también proporciona la opción para realizar un análisis axi-simétrico que usa un sistema de coordenada cilíndrico axialmente simétrico. Esta opción evita el empleo de una formulación totalmente en 3-D vía coordenadas (x, y, z) cartesianas, conduciendo así a ahorros computacionales. La opción de análisis axi-simétrico es apropiado para ciertas situaciones donde una geometría axi-simétrica es aceptable.

Los sistemas de medios porosos tradicionales presentan una amplia gama de heterogeneidad, la cual debe ser considerada en las simulaciones de flujo de aguas subterráneas. La heterogeneidad de las propiedades de los materiales en el modelo de diferencias finitas es representada como valores en los nodos de las celdas. El paquete original de MODFLOW de flujo centrado por bloque BCF1 y BCF2 usa la media armónica de las transmisibilidades de los bloques adyacentes para calcular la transmisibilidad en el bloque. Para sistemas acuíferos, la transmisibilidad de un bloque es calculado como la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor del bloque saturado.

La media armónica de transmisibilidades de un bloque puede causar errores en un sistema acuífero, como se muestra en la Figura 3.6. Donde A y B son celdas en un acuífero no confinado, encontrándose saturada por la izquierda. La situación en un tiempo dado, es tal que la celda A tiene un nivel hidrostático promedio de  $h_a$ , el cual está encima del fondo de la capa y la celda B tiene un nivel hidrostático promedio de  $h_b$ , el cual está debajo del fondo de la capa. La transmisibilidad de la celda A es un valor positivo, ya que  $h_a$  está por encima del fondo. La transmisibilidad de la celda B es cero, debido a que su espesor saturado es cero. La media armónica de la transmisibilidad, por lo tanto es calculada como cero y la celda B nunca se satura, contrariamente a lo que físicamente se esperaría.

Un procedimiento más apropiado y físicamente más consistente es el uso de la media armónica de las conductividades hidráulicas saturadas con la ponderación de un punto medio de las permeabilidades, el cual es relacionado con el espesor saturado de las celdas a través de las funciones de pseudo suelo para el esquema de saturación variable. La media armónica de las conductividades tiende a subestimar la conductividad equivalente, por lo que se recomienda refinar la grilla para evitar este problema (Romeu y Noetinger, 1995).

**Figura 3.6**  
**Celdas Adyacentes de la Media Armónica de las Transmisibilidades**



(Fuente: Manual MODFLOW -SURFACT)

Los datos de entrada para el BCF4 consisten en propiedades para describir la conductividad hidráulica/transmisibilidad horizontal, las elevaciones inferiores y superiores de las celdas y el coeficiente de almacenamiento y/o el almacenamiento específico para una simulación de régimen transiente. Estas propiedades dependen de la entrada de valores para cada capa (LAYCON).

Para activar la opción de flujo de saturación variable, el usuario debe especificar un LAYCON de 40 (si la capa es estrictamente confinada) o 43 (no confinada). Sin conocimiento previo para las condiciones de carga de una capa, se aconseja que el usuario use una entrada LAYCON de 43.

#### ***Paquete de pozo fracturado (FWL4)***

HydroGeolic, Inc., añadió al MODFLOW un nuevo paquete de pozo que simula el pozo como un tubo de fractura de alta conductividad. Este paquete, que es una alternativa al ya existente paquete de pozo WEL1 de MODFLOW, se lo denomina como el paquete de pozo fracturado (FWL4). El FWL4 fue diseñado para vencer varios problemas asociados con el paquete original WEL1.

El FWL4 realmente simula un pozo multicapas, esto es debido a que la representación del pozo como un tubo de fractura permite la conexión de las celdas acuíferas (nodos) que están asociadas con el pozo. Además, el caudal total de salida determinado para el pozo es rigurosamente incorporado. Los flujos volumétricos de cada nodo individual asociado con el pozo fracturado son automáticamente calculados por el código, para sumarse al caudal total de salida del pozo.

Por otra parte, el paquete original WEL1 requiere que el usuario determine la contribución de cada nodo del pozo que penetra dos o más capas. Estas contribuciones de flujo nodales son estimadas de modo que el caudal de salida determinado sea repartido según las transmisibilidades de los nodos de los pozos de contribución. Esta estimación podría ser un serio error. Además, para sistemas no confinados, determinar los flujos nodales según el WEL1 podría causar dificultades computacionales y la distorsión del sistema físico. El FWL4 reparte automáticamente el caudal de salida (introducido por el usuario) a los nodos del pozo. Para cada paso del tiempo, los flujos nodales calculados pueden variar considerablemente, como en el caso de la desaturización y la nueva saturación de capas individuales.

Otra característica del nuevo paquete FWL4, es que para un sistema sobreexplotado no confinado, el caudal total de salida es automáticamente ajustado cuando el nivel del agua en el pozo ha alcanzado el fondo del mismo. El caudal total de salida es calculado para corresponder a la cantidad factible que el pozo puede suministrar en estas condiciones.

Cuando la demanda de caudal extraído es menor que la que el pozo puede suministrar (por ejemplo, si la bomba se cierra durante un período particular o la recarga se aumenta), las cargas hidráulicas en los nodos de los pozos se ajustan para reflejar estas nuevas condiciones, y el pozo proporciona la demanda total extraída. El paquete WEL1 físicamente no ajusta el caudal de bombeo cuando el nivel del agua cae por debajo del fondo del pozo, a pesar de ello, se sigue el cómputo con los valores de carga en los nodos del pozo. En otras ocasiones, el paquete WEL1 hace que el sistema se haga computacionalmente inestable por ir cíclicamente secando y rehumedeciendo las celdas de bombeo durante las iteraciones.

El FWL4 también implementa el almacenamiento del pozo, que es descuidado en las versiones anteriores del MODFLOW. Cabe notar, que el paquete FWL4 requiere de discretización fina alrededor de cada uno de los pozos, en los que se quiera obtener predicciones locales de descenso exactas. Finalmente, este paquete solo se puede usar con la opción de simulación rigurosa de saturación variable (por ejemplo, LAYCON = 40 o 43).

Los datos de entrada para el paquete FWL4 son: ubicación del pozo, nivel superior e inferior de la rejilla, radio del pozo, caudal de bombeo o explotación y el almacenamiento específico del pozo (1/L).

#### ***Paquete de condición de borde de recarga – filtración lateral (RSF4)***

El código de MODFLOW utiliza el paquete de recarga (RCH1) para la condición de recarga de aguas subterráneas. Sin embargo, el paquete de RCH1 tiene ciertas limitaciones al representar sistemas no confinados. Si una capa acuífera no confinada satura la superficie del terreno, la capacidad de la capa acuífera para absorber la recarga suministrada se reduce, siendo el agua restante vertida como escorrentía superficial. El RCH1 es incapaz de manejar tal situación y sigue proveyendo a la capa acuífera con la recarga suministrada con cargas continuamente crecientes sobre el nivel del terreno superficial.

El nuevo paquete RSF4 del MODFLOW-SURFACT fue diseñado para eliminar esta condición físicamente poco realista. El RSF4 permite la recarga suministrada en el sistema de aguas subterráneas, si el nivel freático está por debajo de un estanque determinado de elevación. El estanque de elevación corresponde a la elevación de la superficie del terreno, cuando no hay ningún estanque determinado de elevación. Si en cualquier momento, el nivel freático alcanza la elevación del estanque, la simulación permite sólo recargas para mantener las condiciones del estanque determinado. La recarga restante se vierte como escorrentía superficial. La salida de la simulación refleja esta reducción volumétrica de la recarga del flujo (L3/T) al sistema que es resultado de saturar el sistema hasta la altura determinada del estanque. Cabe mencionar, que el RSF4 no está acoplado al paquete de corriente (STR1) y por lo tanto, este exceso de recarga no es encaminado a corrientes determinadas.

El paquete RSF4 también puede ser usado para simular una condición de filtración lateral por medio de la determinación de la elevación de un nodo de filtración lateral. De este modo, el flujo cero ocurre en la condición de borde, hasta que el nivel freático se acumule hasta la elevación de la filtración lateral. Si el nivel freático alcanza la elevación de la filtración lateral, el acuífero se

drena para mantener la elevación de la filtración lateral (por ejemplo, la presión atmosférica). Si el nivel freático disminuye por debajo de las condiciones de elevación de la filtración lateral durante la simulación, el flujo cero se mantiene en la filtración lateral.

Los datos de entrada para el RSF4 son: el caudal de recarga y la elevación del estanque.

### 3.4.2 Evolución del MODFLOW – SURFACT

El programa MODFLOW - SURFACT se ha ido actualizando con el objetivo de brindar a los usuarios instrumentos más eficientes para la entrada, la modificación y el análisis de los modelos de aguas subterráneas. A continuación se presentan algunas de las actualizaciones más importantes en las últimas versiones del MODFLOW - SURFACT.

#### ***MODFLOW – SURFACT 1.2***

El MODFLOW - SURFACT 1.2 amplía la aplicabilidad del código original del MODFLOW para el manejo de problemas complejos como ser:

- Capacidad de adaptación de las condiciones de desaturización / resaturización de sistemas acuíferos.
- Capacidad para realizar análisis axisimétrico.
- Capacidad mejorada para simular pozos de múltiples capas.
- Capacidad para simular las condiciones de borde de filtraciones laterales.

#### ***MODFLOW – SURFACT 2.1***

Esta nueva versión del MODFLOW – SURFACT tiene la cualidad de poder resolver problemas que el código original de MODFLOW no es capaz.

- Capacidad para modelar flujo de agua saturado-no saturado.
- Linealización Newton-Raphson.

#### ***MODFLOW – SURFACT 2.2***

La versión 2.2 del MODFLOW – SURFACT permite incluir a cada celda anisotropía horizontal. Cabe mencionar, que el MODFLOW requiere que la anisotropía sea uniforme dentro de cada capa modelada. También permite introducir la conductividad vertical de bloques de grillas.

### 3.4.3 Beneficios del MODFLOW – SURFACT

Los principales beneficios de utilizar MODFLOW-SURFACT son los que identifican a continuación:

- Manejo completo de la desaturación y la nueva saturación de las celdas de la grilla.
- Capacidad de modelar el movimiento del agua a través de la zona vadosa.
- Delineación exacta y rastreo de la posición del nivel freático, tomando en cuenta el flujo en la zona no saturada.
- Redistribución automática y correcta del caudal total de un pozo con rejilla que penetra múltiples capas, cuando la celda superior se encuentra seca debido al bombeo.
- Manejo de las condiciones de borde de las filtraciones laterales.
- Capacidad de modelar flujo no saturado y movimiento del aire.

A continuación se explica brevemente algunas de las ventajas nombradas anteriormente:

En el MODFLOW 2000, un pozo que penetra varias capas, es representado como un pozo que penetra una sola capa, esta representación no es correcta, porque no toma en cuenta la interconexión entre las capas del pozo. Uno de los problemas más significativo relacionado con esta aproximación, es que las celdas son esencialmente desconectadas o aisladas cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo de la celda (por ejemplo, cuando la celda se seca). Esto reduce el caudal total bombeado del pozo (como el caudal es distribuido inicialmente entre todas las celdas con rejillas), y puede causar que el nivel freático se recupere y reactive las celdas secas de la grilla del pozo. Este tipo de comportamiento (on-again-off-again) del pozo de bombeo provoca que la solución oscile y puede ser que la solución no converja. En el caso, que la solución converja, el modelo puede resultar engañoso, ya que uno o más pozos de bombeo tendrán menos del caudal bombeado total esperado.

A diferencia del MODFLOW estándar, el MODFLOW-SURFACT redistribuye dinámicamente los caudales de bombeo a las restantes celdas activas, si una o más celdas se secan. De este modo, simula de manera más precisa los efectos reales de la sobreexplotación de un pozo que penetra varias capas.

El MODFLOW-SURFACT es capaz de modelar la humedad no saturada del suelo y asociarla a la superficie de agua y a los regimenes de flujos subterráneos. Este programa utiliza métodos numéricos especiales y poderosos algoritmos de cálculo para evitar los problemas de convergencia de la solución causada por las celdas secas.

El MODFLOW-SURFACT incorpora en los pozos de bombeo dos nuevas herramientas: el radio de la rejilla (screen radius) y el radio de la tubería (casing radius). Estas herramientas son utilizadas para calcular el almacenamiento específico del diámetro del pozo para el paquete FWL4, usando la siguiente formula:

$$S_s = (r_c / r_w)^2 (1 / L_s) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

- $S_s$  : almacenamiento específico
- $r_w$  : radio de la rejilla
- $r_c$  : radio de la tubería de agua
- $L_s$  : largo total de la rejilla

## **4. MODELACIÓN NUMÉRICA DE CASOS HIPOTÉTICOS**

### **4.1 Introducción**

A partir de un caso hipotético “A” de bombeo de agua de un acuífero se analizaron los resultados obtenidos por medio de soluciones analíticas y soluciones numéricas. En este caso, se utilizaron las soluciones analíticas para acuíferos confinados de régimen transiente propuestas por Theis y Jacob y la solución numérica del programa Visual MODFLOW 4.2, el cual es un software comercial ampliamente utilizado para la modelación de flujos subterráneos a través de medios porosos.

El objetivo de este análisis fue validar los resultados obtenidos del programa Visual MODFLOW con los resultados obtenidos con los métodos analíticos.

Las simulaciones computacionales se han convertido en una herramienta fundamental para la solución de problemas relacionados con el comportamiento de los flujos de agua subterránea. Los programas de diferencias finitas como el Visual MODFLOW y el MODFLOW – SURFACT cuentan con diferentes algoritmos de cálculo que les permiten resolver las ecuaciones numéricas para la simulación del flujo subterráneo.

Se realizó un análisis comparativo de los diferentes algoritmos de cálculo (“solvers”) que utilizan estos programas para poder analizar la eficiencia y estabilidad de los mismos en la resolución de las ecuaciones de flujo subterráneo. Este análisis se lo realizó en un modelo de simulación del drenaje de un rajo minero - caso hipotético “B”, en el cual se utilizaron pozos de observación en todo el dominio del modelo para comparar las cargas hidráulicas calculadas por los diferentes “solvers” y además se realizó un balance del caudal de salida del rajo.

Para analizar la influencia de la correcta representación de un rajo minero durante el drenaje de una mina a cielo abierto en la etapa de operación se elaboraron dos modelos de simulación, caso hipotético “C” y caso hipotético “D”, en los que se analizaron los comportamiento de los descensos de los niveles de aguas subterráneas ocasionados por el drenaje del rajo. Para las simulaciones del rajo minero se emplearon diferentes condiciones de bordes, tanto artificiales como naturales, que se encuentran incorporadas en los softwares comerciales de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, con el fin de aproximarse lo más posible a la realidad. Las condiciones de bordes utilizadas para la representación del rajo minero son: carga constante (caso hipotético “C”), dren (caso hipotético “C”) y campo de pozos de bombeo (caso hipotético “D”). El objetivo de esta fase del análisis es familiarizarse con las herramientas disponibles y verificar la consistencia y funcionalidad de las mismas.

### **4.2 Validación del Visual MODFLOW**

#### **4.2.1 Descripción del caso hipotético “A”**

Para realizar la validación de la solución numérica obtenida con el programa de diferencias finitas Visual MODFLOW con la solución analítica, se utilizó el caso hipotético “A”. La simplicidad del caso hipotético “A” se debe a que la solución del mismo debe poder ser realizada con métodos numéricos y métodos analíticos y además cumplir con los supuestos básicos de la solución analítica.

El caso hipotético “A” representa el flujo radial hacia un pozo de bombeo en un sistema acuífero confinado, el cual es sometido a una depresión de su nivel piezométrico por la extracción de agua a través de un pozo de bombeo que se encuentra en el centro del acuífero. El acuífero cuenta con un solo estrato y éste se caracteriza por ser confinado. El objetivo de la validación del Visual MODFLOW, es verificar el correcto funcionamiento del programa de diferencias finitas, y para ello se compararán los resultados obtenidos del descenso de los niveles de agua subterránea de las soluciones numéricas con los resultados de las soluciones analíticas.

Como se mencionó anteriormente, el caso hipotético “A” debe cumplir con los supuestos básicos de la solución analítica de Theis y Jacob para acuíferos confinados en régimen transiente, los cuales se describen a continuación:

- El acuífero deber ser horizontal y tener un espesor constante.
- El acuífero debe ser homogéneo, isotrópico e infinito.
- El nivel piezométrico inicial debe ser horizontal.
- La Ley de Darcy deber ser válida para el flujo en el acuífero.
- El agua es removida en forma instantánea desde el acuífero.
- La tasa de bombeo deber ser constante.
- El flujo debe ser simétrico con respecto al eje del pozo.
- El pozo debe penetrar el 100% del acuífero.
- El radio del pozo deber ser despreciable con respecto a las distancias de análisis.

El caso hipotético “A” utilizado para la validación del programa Visual MODFLOW se describe a continuación a través de la Figura 4.1, la cual es un esquema gráfico visto en planta, en la cual el área de 2000 m x 2000 m representa el acuífero y en el centro de éste se encuentra el pozo de extracción que produce el descenso del nivel del agua del acuífero. Además, se observan las ubicaciones de los pozos de observación utilizados para analizar los descensos del nivel del agua subterránea, tanto en la solución analítica, como en la solución numérica. En la Tabla 4.1 se muestran las coordenadas del pozo de bombeo y de los pozos de observación.

Para lograr que el acuífero sea infinito en el Visual MODFLOW se colocó una condición de borde de carga constante en los límites del acuífero. La condición de borde de carga constante actúa como una fuente infinita de agua que entra en el sistema. (Ver 4.4.2.1. Condición de borde de Carga Constante)

**Tabla 4.1**  
**Ubicación Pozo de Bombeo y Pozos de Observación en el Caso Hipotético “A”**

Nombre	Tipo de Pozo	x (m)
PB	Bombeo	0
Pobs3	Observación	60
Pobs6	Observación	120
Pobs9	Observación	180
Pobs12	Observación	240
Pobs15	Observación	300
Pobs18	Observación	360
Pobs21	Observación	420
Pobs24	Observación	480
Pobs27	Observación	540
Pobs30	observación	600

Donde:

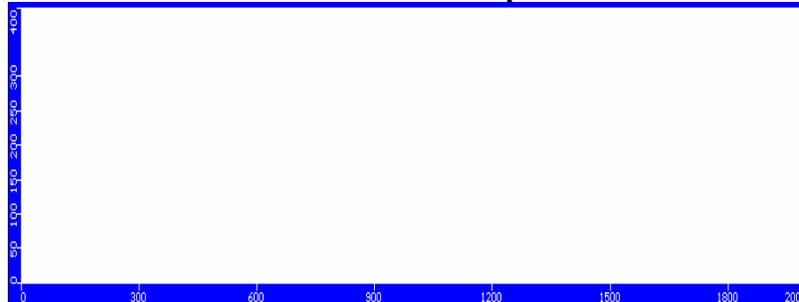
$x$  : distancia del pozo de observación al pozo de bombeo

**Figura 4.1**  
**Vista en Planta del Caso Hipotético “A” en Visual MODFLOW**



En la Figura 4.2 se muestra una vista en corte del caso hipotético “A”, en la cual el acuífero tiene un espesor de 400 m y esta conformado por un solo estrato, el cual se caracteriza por ser homogéneo e isotrópico.

**Figura 4.2**  
**Vista en Corte del Caso Hipotético “A”**



En la Tabla 4.2 se presentan los valores de las propiedades hidrogeológicas del acuífero confinado utilizadas para la solución del caso hipotético “A”. Los primeros seis parámetros son utilizados para la solución numérica y los últimos dos parámetros para la solución analítica.

**Tabla 4.2**  
**Propiedades Hidrogeológicas del Acuífero**

Parámetros	Valor
<b>Kx (m/d)</b>	5.60E-02
<b>Ky (m/d)</b>	5.60E-02
<b>Kz (m/d)</b>	5.60E-02
<b>Eff. Por.</b>	3.00E-01
<b>Tot. Por.</b>	3.00E-01
<b>Ss (1/m)</b>	8.83E-06
<b>S</b>	3.53E-03
<b>T (m<sup>2</sup>/día)</b>	22.59

Donde:

Kx, Ky y Kz : conductividades hidráulicas en las direcciones x, y y z  
 Eff. Por. : porosidad efectiva  
 Tot. Por. : porosidad total  
 Ss : coeficiente de almacenamiento específico  
 S : coeficiente de almacenamiento  
 T : transmisibilidad

#### 4.2.2 Resultados de la validación del Visual MODFLOW

La solución analítica del caso hipotético “A” del flujo radial de agua subterránea hacia un pozo en un sistema acuífero confinado se obtuvo a través de las soluciones de Theis y Jacob. Ambas soluciones se basan en la Ecuación 4.1, la cual es la ecuación diferencial que describe el flujo saturado en un sistema acuífero confinado horizontal.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

*h* : carga hidráulica  
*r* : coordenada radial  
*S* : coeficiente de almacenamiento  
*T* : transmisibilidad  
*t* : tiempo

En el año 1935 Theis desarrolló una solución que describe la carga hidráulica a cualquier distancia *r* desde el pozo y en cualquier tiempo *t* luego de iniciar el bombeo, esta solución está escrita en términos de descensos del nivel piezométrico como se puede apreciar en la Ecuación 4.2.

$$s(r,t) = h_0 - h(r,t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \int_x^u \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 \cdot T \cdot t} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

La integral de la Ecuación 4.2, es conocida como la integral exponencial y existen tablas de sus valores disponibles en la literatura. Para la definición específica de  $u$  dada en la Ecuación 4.3, la integral se la conoce como la Función de Pozo,  $W(u)$ . Con esta nueva definición se obtiene la Ecuación 4.4 que es análoga a la Ecuación 4.2.

$$s(r,t) = h_0 - h(r,t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

La Función de Pozo,  $W(u)$ , puede ser escrita en forma de una expansión en serie como se puede observar en la Ecuación 4.5.

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots + \frac{u^n}{n \cdot n!} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

En el año 1950 Jacob y Cooper observaron que después de un tiempo considerable de operación del pozo de bombeo, el parámetro  $u$  es muy pequeño por lo que las potencias de mayor valor de la serie en la Ecuación 4.5 pueden ser despreciados. Si  $u < 0.1$  es posible solo considerar los dos primeros términos de la serie con lo que se obtiene la Ecuación 4.6:

$$W(u) = -0.577216 - \ln u \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Al reemplazar la Ecuación 4.6 en la Ecuación 4.4 y reordenar los términos se obtiene la Ecuación 4.7, con la cual se puede calcular el descenso de los niveles piezométricos debido a la extracción de agua del acuífero a través de un pozo de bombeo.

$$s(r,t) = h_0 - h(r,t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln\left(\frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}\right) \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Tanto en la solución de Theis, como en la solución de Jacob si  $t < (r^2 \cdot S) / (2.25 \cdot T)$ , el descenso ocasionado por la operación del pozo de bombeo es cero, siendo  $t$  el tiempo que demora en llegar el efecto de la extracción de agua a una cierta distancia del pozo de bombeo.

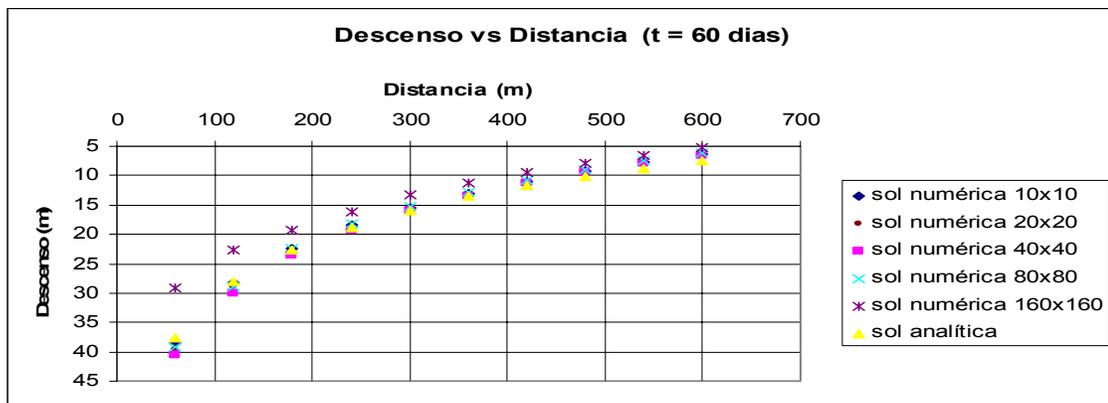
La solución numérica del caso hipotético se obtuvo con el programa de diferencias finitas Visual MODFLOW y como se mencionó en la descripción de dicho programa, las cargas hidráulicas se calculan para cada celda, es decir, que cada celda tendrá un solo valor de carga hidráulica. Por este motivo, se realizó un análisis de sensibilidad del tamaño de la celda que conforma la grilla del dominio del caso hipotético "A", para poder observar la importancia de la discretización espacial y además poder elegir el tamaño de celda correcto para realizar la validación del Visual MODFLOW con la solución analítica.

Para el análisis de sensibilidad del tamaño de las celdas, se utilizaron 5 grillas, cada grilla conformada por celdas cuadradas homogéneas, y se resolvió el caso hipotético con cada una de

las diferentes grillas para un tiempo de simulación de 60 días. Las dimensiones de las celdas que conforman las cinco grillas utilizadas son las siguientes: celdas de 10 m x 10 m, celdas de 20 m x 20 m, celdas de 40 m x 40 m, celdas de 80 m x 80 m y celdas de 160 m x 160 m.

En todos los casos, se verificó que la condición de borde de carga constante no afectara la solución, es decir, que no ingresara agua al sistema acuífero desde la condición de borde debido a la extracción del pozo de bombeo. Los resultados que se obtuvieron a través de la solución numérica y la solución analítica para el caso hipotético “A” del flujo radial de agua subterránea hacia un pozo que bombea 1950 m<sup>3</sup>/d en un sistema acuífero confinado en régimen transiente, se muestran en la Figura 4.3, donde se presentan los descensos en 10 pozos de observación, los que se encuentran a diferentes distancias del pozo de bombeo (Ver Tabla 4.1). A medida que los pozos de observación se van alejando del pozo de bombeo los descensos van decreciendo.

**Figura 4.3**  
**Análisis de Sensibilidad del Tamaño de las Celdas**



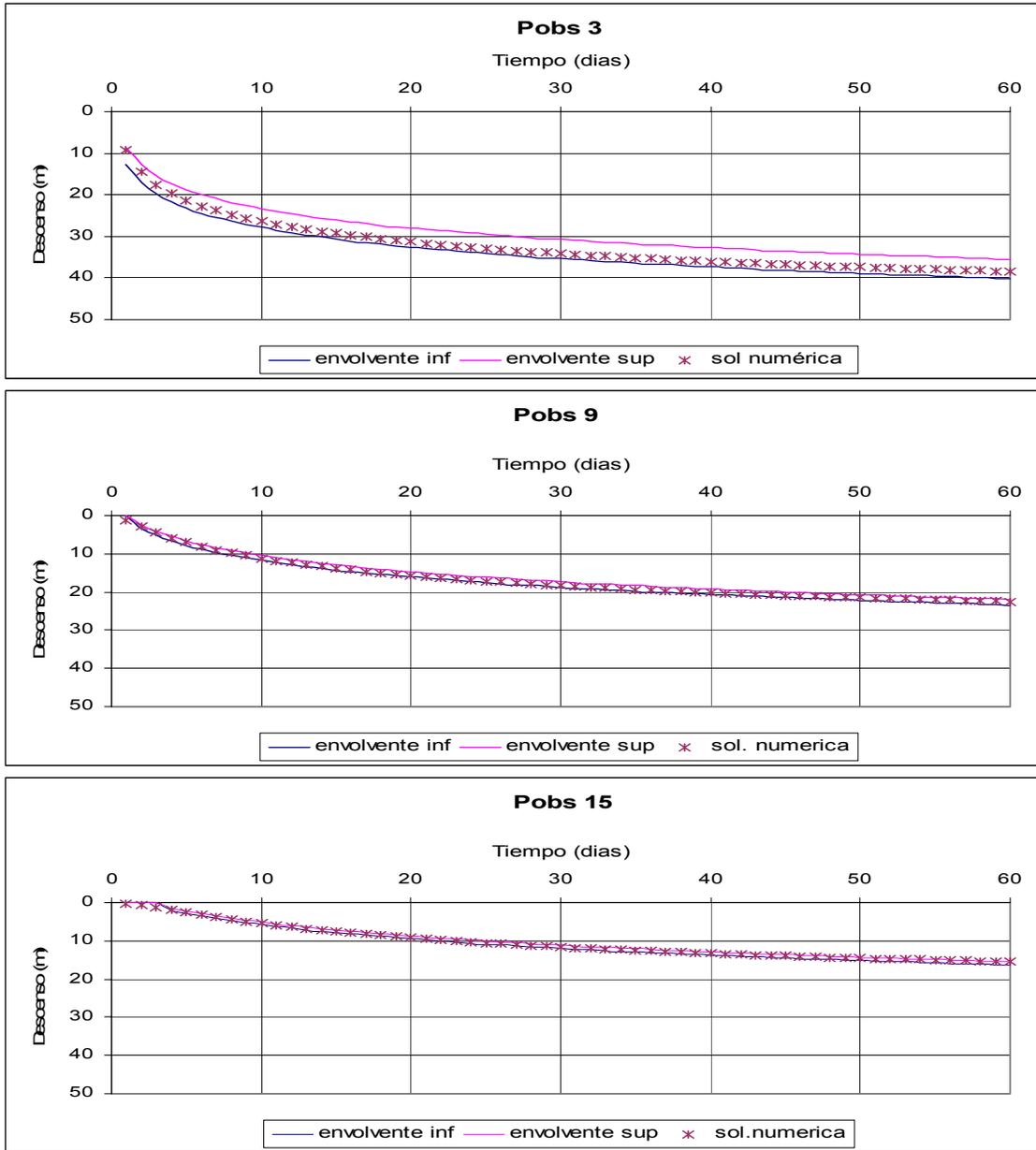
Como se puede observar en la Figura 4.3 se obtienen diferentes resultados, a medida que el tamaño de las celdas aumenta, la solución numérica se aleja de la solución analítica. Es aconsejable trabajar con grillas conformadas por celdas de dimensiones pequeñas, siempre que sea posible, puesto que el refinamiento de la grilla tiene un alto costo computacional. En casos, que el refinamiento de toda la grilla no sea posible debido a las grandes dimensiones del modelo de simulación, se debe refinar la grilla en los sectores de mayor interés para el análisis y tratar de que el cambio de tamaño entre las celdas no sea brusco, puesto que de ser así el modelo puede tener problemas para converger.

Para realizar la validación del Visual MODFLOW con la solución analítica de Theis y Jacob, se decidió utilizar una grilla fina conformada por celdas homogéneas de 10 m x 10 m, formando un total de 200 filas y 200 columnas. En este caso, se analizó el descenso en cada pozo de observación durante los 60 días de operación del pozo de bombeo y se los comparó con la solución analítica obtenida de Theis y Jacob.

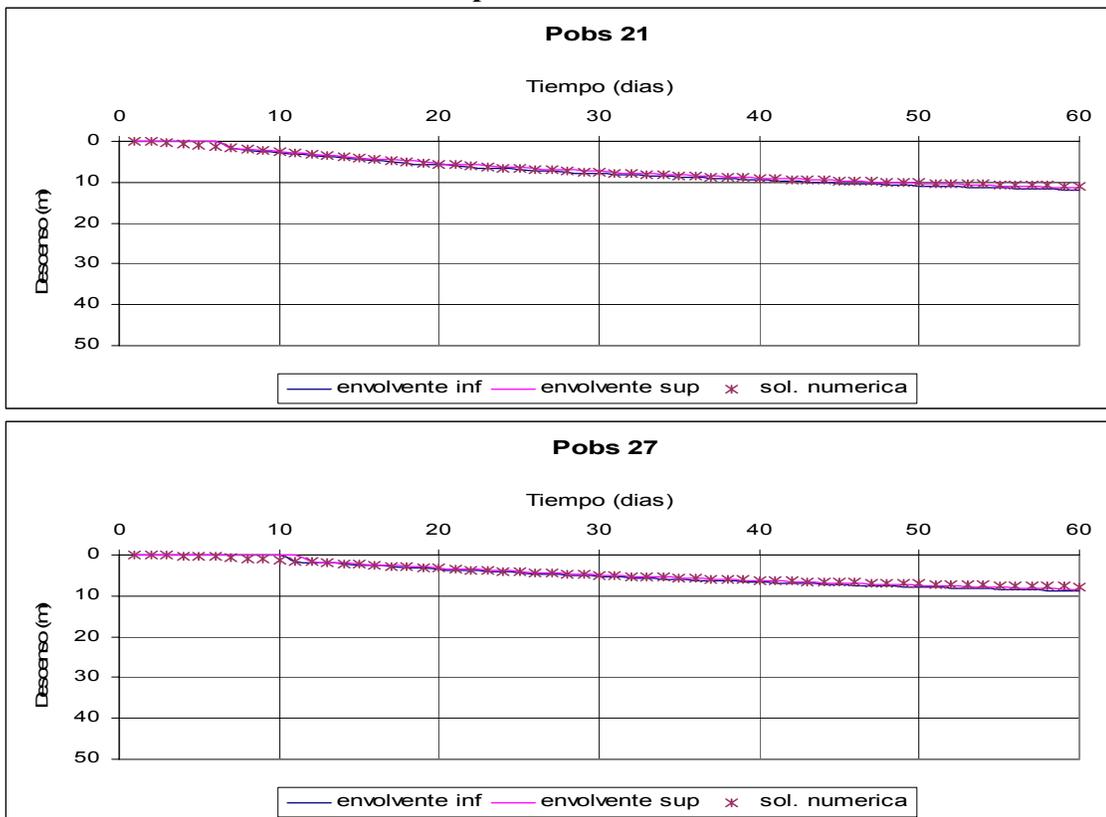
En el caso de la solución analítica, se utilizaron los descensos obtenidos en pozos de observación ubicados a  $\pm 10$  m de los pozos de observación utilizados para la solución numérica, obteniéndose una envolvente superior y una envolvente inferior para la solución numérica. Se decidió utilizar las envolventes para comparar los valores de los descensos analíticos con los valores de los descensos numéricos, puesto que estos últimos fueron obtenidos a través de métodos numéricos de diferencias finitas con celdas de 10 m x 10 m y como se mencionó

anteriormente, el programa Visual MODFLOW calcula las cargas hidráulicas para cada celda y en el caso de la solución analítica se calculan las cargas en un punto exacto. En la Figura 4.4 se puede observar los descensos obtenidos durante los 60 días de operación del pozo de bombeo en algunos de los pozos de observación.

**Figura 4.4**  
**Descenso vs. Tiempo en los Pozos de Observación**



**Figura 4.4 (Continuación)**  
**Descenso vs. Tiempo en los Pozos de Observación**



Como era de esperarse y se puede constatar en la Figura 4.4 la solución numérica y la solución analítica son prácticamente iguales, esto es debido a que ambas soluciones están basadas en la Ley de Darcy. Existe una pequeña diferencia en el tiempo de respuesta del acuífero al descenso entre la solución numérica y la solución analítica. Esta diferencia se va incrementando a medida que el pozo de observación donde se calculó el descenso se va distanciando del pozo de bombeo, obteniéndose un tiempo de respuesta del acuífero al descenso menor en el caso de la solución numérica calculada con el Visual MODFLOW en los primeros días de operación del pozo de bombeo.

### 4.3 Análisis comparativo de los algoritmos de cálculo (“solvers”)

Las simulaciones computacionales se han convertido en una herramienta fundamental para la solución de problemas relacionados con el comportamiento de los flujos de agua subterránea. Generalmente, mientras más fina es la discretización de una grilla, más alta es la exactitud de la simulación numérica. Lamentablemente, al aumentar la resolución de la grilla también se aumenta el tamaño de las ecuaciones de la matriz que tienen que ser solucionadas numéricamente. En la actualidad, se abordan problemas con millones de grados de libertad (variables).

Los programas de diferencias finitas como el Visual MODFLOW y el MODFLOW – SURFACT cuentan con diferentes algoritmos de cálculo que les permiten resolver las ecuaciones numéricas para la simulación del flujo subterráneo. La diferencia que existe entre los diferentes algoritmos

de cálculo, es el método que utilizan para resolver dichas ecuaciones, siendo algunos más eficientes, rápidos y estables que otros.

Se realizó un análisis comparativo de los diferentes “solvers” que utilizan el Visual MODFLOW 4.2 y el MODFLOW – SURFACT 2.2 para poder analizar la eficiencia y estabilidad de los mismos en la resolución de las ecuaciones de flujo subterráneo. Este análisis se realizó en un modelo de simulación del drenaje de un rajo minero, en el cual se utilizaron pozos de observación en todo el dominio del modelo para comparar las cargas hidráulicas calculadas por los diferentes “solvers” y además se realizó un balance del caudal de salida del rajo.

En las simulaciones numéricas de gran escala existe el problema de la velocidad con la cual los sistemas de ecuaciones pueden ser resueltos por los algoritmos de cálculo. En la presente tesis no se realizó el análisis del tiempo de convergencia para los diferentes “solvers”, pero se presentan los resultados obtenidos de un análisis realizado por investigadores del Waterloo Hydrogeologic Inc. y del Fraunhofer Institute SCAI.

#### 4.3.1 Descripción de los algoritmos de cálculo (“solvers”)

Los programas de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT utilizan diferentes algoritmos de cálculo para resolver las ecuaciones del flujo subterráneo. En el caso del Visual MODFLOW 4.2 los “solvers” que se encuentran disponibles son los siguientes: PCG, SIP, SOR, GMG, SAMG y WHS. Los “solvers” disponibles para el MODFLOW – SURFACT 2.2 son: PCG, SIP, SOR y PCG4. En el Anexo A se presenta una descripción de los diferentes algoritmos de cálculo.

#### 4.3.2 Descripción del caso hipotético “B”

El análisis comparativo de los diferentes algoritmos de cálculo que utilizan el Visual MODFLOW 4.2 y el MODFLOW – SURFACT 2.2 se realizó para verificar la estabilidad y eficiencia de los mismos en la resolución de las ecuaciones del flujo subterráneo. Para este análisis se utilizó el caso hipotético “B” que simula el drenaje de un rajo minero, el cual se describe brevemente a continuación.

El dominio del área del modelo de simulación se observa en la Figura 4.5, en la que se muestran las celdas activas (flujo subterráneo) y las celdas inactivas (condición de no flujo). También se observa la zona del rajo minero y las ubicaciones de los pozos de observación, éstos últimos fueron utilizados para comparar los niveles del agua subterránea obtenidos con los diferentes algoritmos de cálculo. Las coordenadas de los pozos de observación se presentan en la Tabla 4.3.

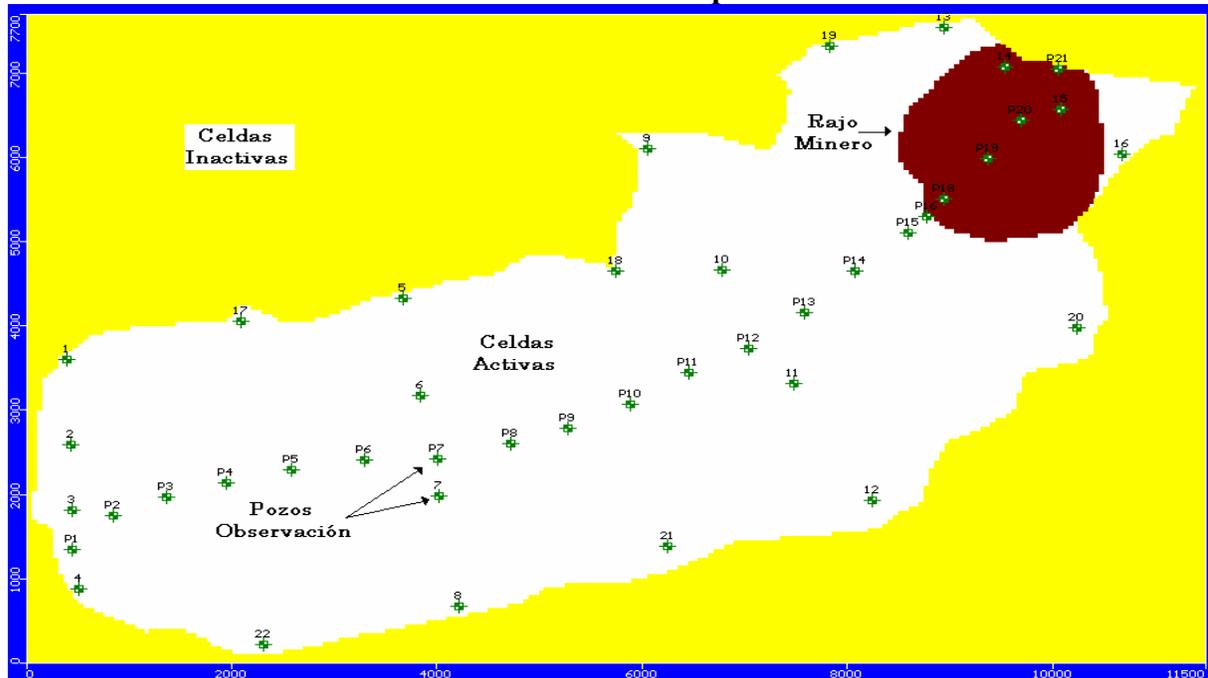
El sistema acuífero se discretiza horizontalmente mediante una grilla de diferencias finitas con celdas cuadradas de 50 m x 50 m y verticalmente mediante tres estratos acuíferos de diferentes espesores y propiedades hidrogeológicas, conformando un total de 106.260 celdas (154 filas, 230 columnas y 3 capas).

En las Figura 4.6 y 4.7 se observan las propiedades hidrogeológicas utilizadas en el caso hipotético “B” del drenaje de una mina a cielo abierto. En la Figura 4.6 se muestran las diferentes zonas de conductividades hidráulicas utilizadas en el primer estrato acuífero del modelo, en el caso del segundo (zona 8) y tercer estrato (zona 9) se utilizó una única conductividad. La zona 2

y 3 corresponden al sector de la ubicación de un río. Los valores de las conductividades hidráulicas se muestran en la misma Figura.

En la Figura 4.7 se observan las diferentes zonas de los coeficientes de almacenamiento y las porosidades del primer estrato del modelo de simulación, en el caso del segundo y del tercer estrato se utilizó el mismo valor para los coeficientes de almacenamiento y las porosidades en ambos estratos (zona 3), los respectivos valores se encuentran en la misma Figura.

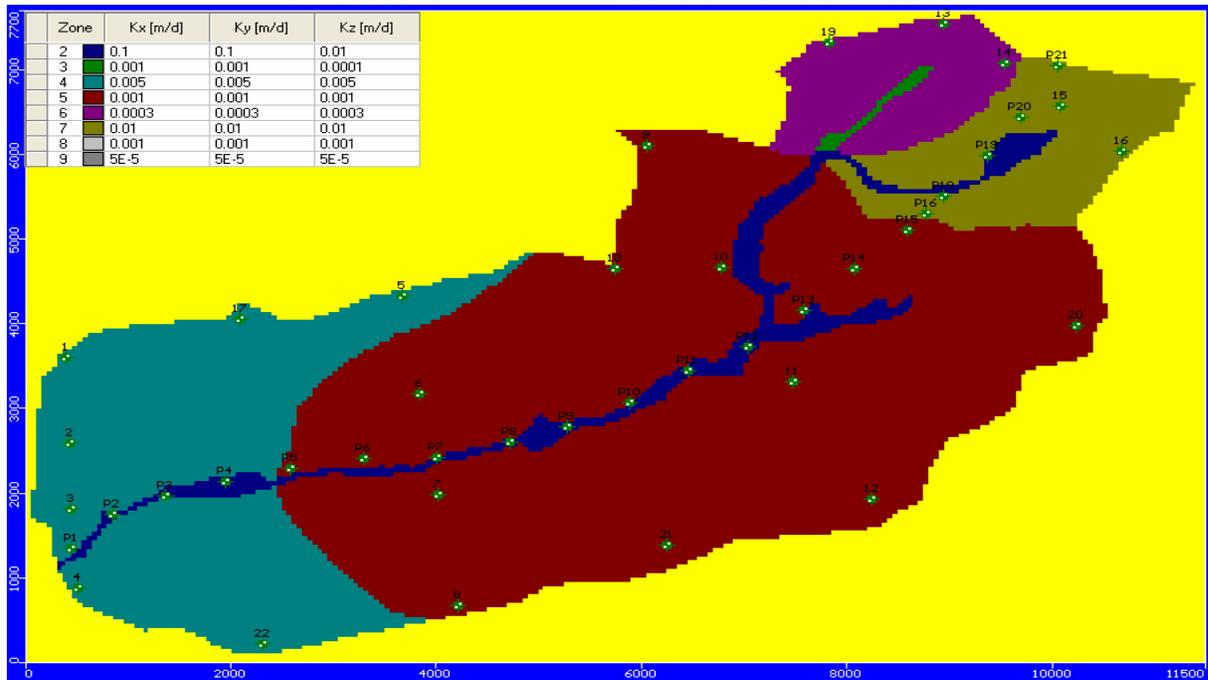
**Figura 4.5**  
**Vista en Planta del Caso Hipotético “B”**



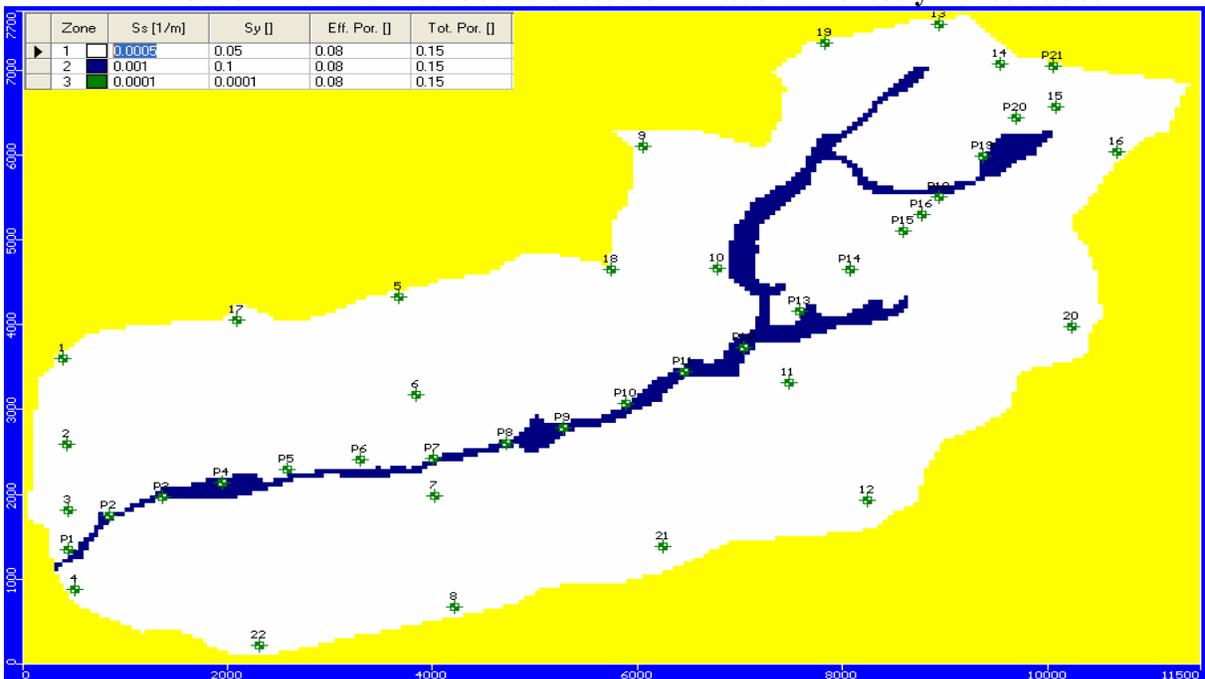
**Tabla 4.3**  
**Coordenadas Pozos de Observación**

Nombre	x (m)	y (m)	Nombre	x (m)	y (m)	Nombre	x (m)	y (m)
1	401	3595	15	10088	6573	P15	8586	5101
2	440	2597	16	10684	6042	P16	8778	5293
3	453	1820	17	2097	4060	P18	8945	5509
4	518	888	18	5750	4656	P19	9365	5988
5	3677	4332	19	7835	7324	P2	850	1748
6	3846	3180	20	10243	3983	P20	9700	6443
7	4027	1988	21	6255	1393	P21	10059	7041
8	4221	680	22	2318	227	P3	1365	1976
9	6060	6107	P1	443	1353	P4	1952	2144
10	6786	4669	P10	5880	3066	P5	2587	2287
11	7485	3322	P11	6455	3449	P6	3293	2407
12	8249	1937	P12	7041	3736	P7	4012	2419
13	8948	7544	P13	7580	4155	P8	4718	2599
14	9544	7078	P14	8071	4646	P9	5281	2790

**Figura 4.6**  
**Vista en Planta de las Conductividades Hidráulicas**



**Figura 4.7**  
**Vista en Planta de los Coeficientes de Almacenamientos y Porosidades**



### 4.3.3 Resultados del análisis comparativo de los algoritmos de cálculo (“solvers”)

El rajo minero se representó con una condición de borde de carga constante, ésta condición de borde representa la cota de fondo del rajo. Para simular el crecimiento gradual del rajo en los años de operación 1 (Rajo T1), 5 (Rajo T2), 10 (Rajo T3) y 25 (Rajo T4) del proyecto minero, se utilizaron los valores de las cargas constantes de la Tabla 4.4. Para el primer período de

simulación se utilizó como condición de borde inicial, una carga hidráulica inicial igual a la cota superior del terreno. A partir del segundo período de simulación se utilizó como condición de borde inicial las cargas hidráulicas obtenidas del período de simulación anterior.

**Tabla 4.4**  
**Valores Cargas Constantes (Cota de Fondo)**

Tiempo (año)	Cota de Fondo (msnm)
1	3950
5	3780
10	3585
25	3455

El análisis comparativo de los diferentes algoritmos de cálculo del Visual MODFLOW 4.2 y el MODFLOW – SURFACT 2.2 se realizó para los cuatro períodos de simulación (años 1, 5, 10 y 25) del caso hipotético “B”. Cabe mencionar, que para el análisis no se hizo uso de las herramientas adicionales que se encuentran incorporadas en el programa MODFLOW – SURFACT, las cuales diferencian a dicho programa del Visual MODFLOW, puesto que el objetivo de este análisis es comprobar la estabilidad y eficiencia de los algoritmos de cálculo en la resolución de las ecuaciones del flujo subterráneo.

Primeramente, se ejecutó el modelo de simulación con los diferentes “solvers” utilizando los valores de los parámetros que tienen dichos algoritmos por default. Luego se fueron variando los criterios de cierre de convergencia, los números de iteraciones y los parámetros que fueran necesarios para alcanzar un error de balance de masas apropiado. Además, se compararon los niveles en los diferentes pozos de observación para poder comprobar que los niveles calculados sean los mismos o similares con todos los algoritmos de cálculo.

En las Tablas 4.5 a 4.10 y 4.11 a 4.15 se muestran los valores de los parámetros finales de los algoritmos de cálculo de los programas Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT, respectivamente. Estas Tablas contienen los valores de los parámetros con los cuales se obtuvieron los mejores resultados para el caso hipotético “B”.

**Tabla 4.5**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG del Visual MODFLOW**

PCG	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max.outer iterations	100	100	100	100
Max.inner iterations	10	10	10	10
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Residual Criterion	0.01	0.01	0.01	0.01
Damping Factor	1	1	0.6	1
Printout interval	10	10	10	10
Pre-conditioning Method	Cholesky	Cholesky	Cholesky	Cholesky
Relaxation Parameter	1	1	1	1

**Tabla 4.6**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SAMG del Visual MODFLOW**

SAMG	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max. Iterations	100	100	100	100
Max.cycles	50	50	50	50
Budget Closure Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Damping Factor	-2	-2	-2	-2
Max. Damping factor	1	1	1	1
Min. Damping factor	0.2	0.2	0.2	0.2
Perform conjugate gradient iter.	no	no	no	No

**Tabla 4.7**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SIP del Visual MODFLOW**

SIP	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max. Iterations	200	200	200	200
Iterations variables	5	5	5	5
Acceleration variable	1	1	1	1
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Printout interval	10	10	10	10
Iterations variable seed	0.01	0.01	0.01	0.01

**Tabla 4.8**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SOR del Visual MODFLOW**

SOR	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max. Iterations	50	50	50	50
Acceleration variable	0.6	0.6	0.6	0.6
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Printout interval	10	10	10	10

**Tabla 4.9**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo WHS del Visual MODFLOW**

WHS	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max.outer iterations	50	50	50	50
Max.inner iterations	25	25	25	25
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Residual Criterion	0.01	0.01	0.01	0.01
Damping Factor	1	1	1	1
Relative residual criterion	0	0	0	0
Factorization level	level 0	level 0	level 0	level 0

**Tabla 4.10**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo GMG del Visual MODFLOW**

GMG	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max.outer iterations	50	50	50	50
Max.inner iterations	10	10	10	10
Adaptive Damping Control	0	0	0	0
Head Change Criterion	0.01	0.01	0.01	0.01
Residual Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Relaxation Parameter	1	1	1	1
Upper bound of estimate	1	1	1	1
Multigrid Preconditioner	0	0	0	0
Semicoarsening Control in Multigrid Preconditioner	0	0	0	0
Damping Factor	1	1	1	1

**Tabla 4.11**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG del MODFLOW -SURFACT**

PCG	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max.outer iterations	100	100	100	100
Max.inner iterations	10	10	10	10
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Residual Criterion	0.01	0.01	0.01	0.01
Damping Factor	1	1	1	1
Printout interval	10	10	10	10
Pre-conditioning Method	Cholesky	Cholesky	Cholesky	Cholesky
Relaxation Parameter	1	1	1	1

**Tabla 4.12**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo PCG4 del MODFLOW -SURFACT**

PCG4	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max.outer iterations	100	100	100	100
Max.inner iterations	10	10	10	10
Newton-Raphson Linearization	yes	yes	yes	Yes
Backtracking Factor	0.15	0.15	0.15	0.15
Backtracking Force Factor	1.5	1.5	1.5	1.5
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Max. # of orthogonalizations	5	5	5	5
Relative closure criterion	0.01	0.01	0.01	0.01
Dampening is applied	yes	yes	yes	Yes

**Tabla 4.13**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SIP del MODFLOW -SURFACT**

SIP	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max. Iterations	200	200	200	200
Iterations variables	5	5	5	5
Acceleration variable	1	1	1	1
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Printout interval	10	10	10	10
Iterations variable seed	0.01	0.01	0.01	0.01

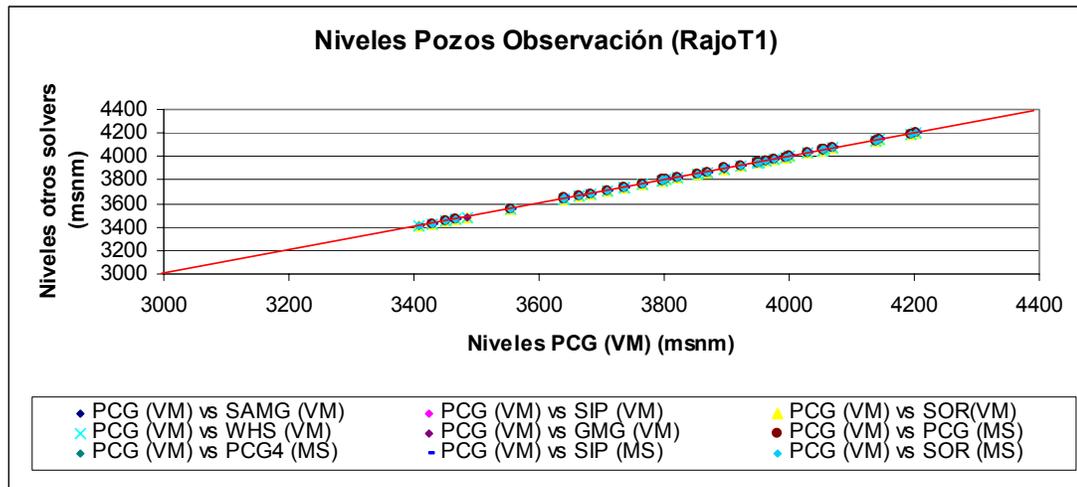
**Tabla 4.14**  
**Parámetros Finales del Algoritmo de Cálculo SOR del MODFLOW -SURFACT**

SOR	RajoT1	RajoT2	RajoT3	RajoT4
Max. Iterations	200	200	200	200
Acceleration variable	1	1	1	1
Head Change Criterion	0.001	0.001	0.001	0.001
Printout interval	10	10	10	10

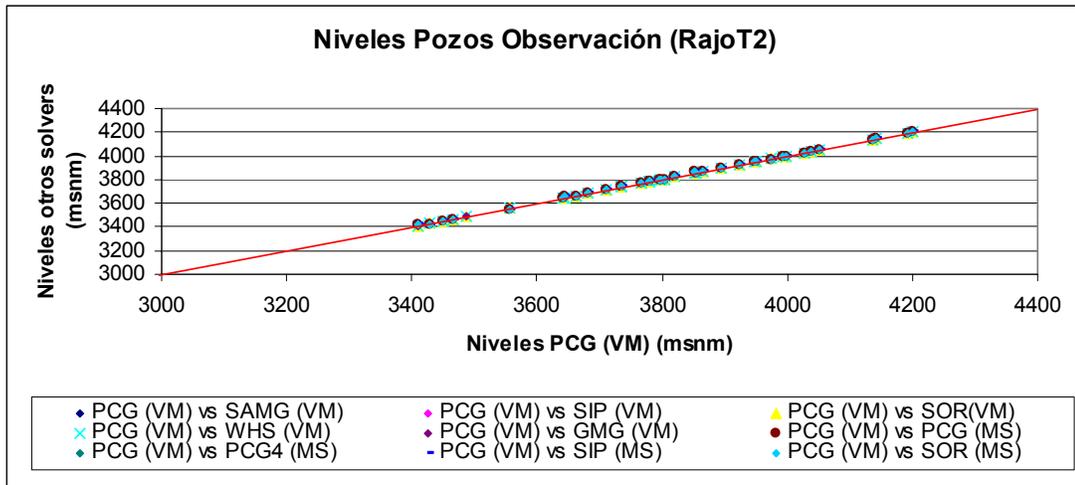
Como se observa en las anteriores Tablas, en algunos casos fue necesario incrementar el número de iteraciones y el criterio de cierre de convergencia en los “solvers” para poder obtener resultados apropiados para la simulación del caso hipotético “B”. En el caso específico de este modelo de drenaje del rajo minero todos los algoritmos de cálculo convergieron.

En las Figuras 4.8 a 4.11 se presentan los resultados obtenidos mediante los pozos de observación en los cuatro períodos de simulación con los “solvers” de ambos programas. En el eje de las abscisas se graficaron en todas las series los niveles obtenidos de los pozos de observación con el algoritmo de cálculo PCG del Visual MODFLOW y en el eje de las ordenadas se graficaron los niveles obtenidos con los otros “solvers”, tanto del Visual MODFLOW como del MODFLOW – SURFACT.

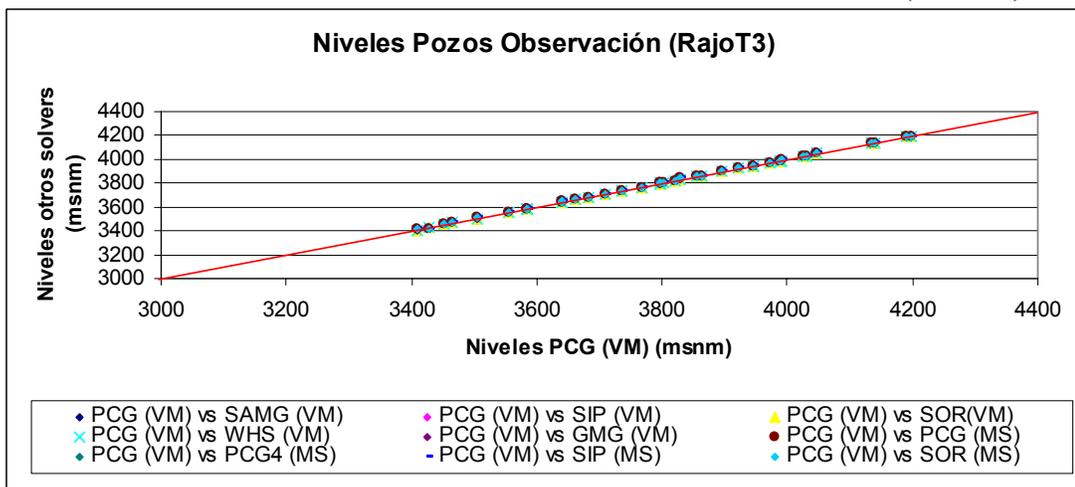
**Figura 4.8**  
**Resultados Pozos Observación Primer Período de Simulación (1 año)**



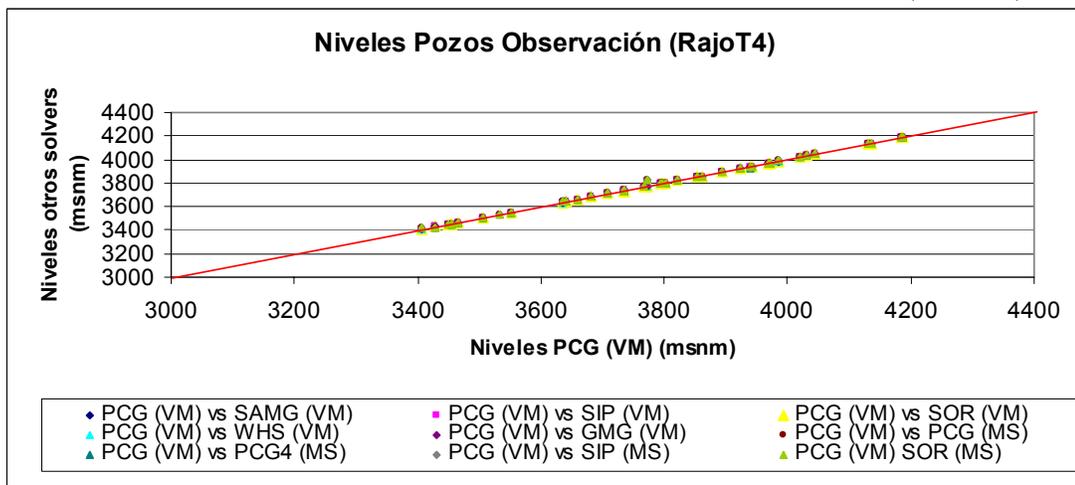
**Figura 4.9**  
**Resultados Pozos Observación Segundo Período de Simulación (5 años)**



**Figura 4.10**  
**Resultados Pozos Observación Tercer Período de Simulación (10 años)**



**Figura 4.11**  
**Resultados Pozos Observación Cuarto Período de Simulación (25 años)**



Como se observa en las anteriores Figuras de los niveles de los pozos de observación, se obtuvieron resultados bastante similares con todos los algoritmos de cálculo en los cuatro períodos de simulación, exceptuando el caso particular de algunos pozos de observación.

En el primer período de simulación, los “solvers” del Visual MODFLOW presentaron diferencias de niveles menores a 1 metro. Los “solvers” del MODFLOW – SURFACT presentaron un par de pozos con diferencias de niveles mayores a 1 metro, obteniéndose la mayor diferencia en el pozo de observación (P16) con una diferencia de aproximadamente 9 metros.

En el segundo período de simulación, los algoritmos de cálculo del Visual MODFLOW, al igual que en el primer período, presentaron diferencias de niveles menores a 1 metro. Los algoritmos de cálculo del MODFLOW – SURFACT presentaron varios pozos con diferencias de niveles mayores a 1 metro, obteniéndose la mayor diferencia en el pozo de observación (P16) con una diferencia de aproximadamente 14 metros.

En el tercer período de simulación, los “solvers” del Visual MODFLOW presentaron diferencias de niveles menores a 1 metro, a excepción del “solver” SAMG, el que presentó en el pozo de observación (4) una diferencia de 16 metros. En el caso, de los algoritmos de cálculo del MODFLOW – SURFACT se obtuvieron varios pozos con diferencias de niveles mayores a 1 metro, obteniéndose la mayor diferencia en el pozo de observación (P16) con una diferencia de aproximadamente 15 metros.

En el último período de simulación, al igual que en el anterior período, los algoritmos de cálculo del Visual MODFLOW presentaron diferencias de niveles menores a 1 metro, a excepción del “solver” SAMG, el que presentó en el pozo de observación (4) una diferencia de 19 metros. En el caso, de los “solvers” del MODFLOW – SURFACT se obtuvieron varios pozos con diferencias de niveles mayores a 1 metro, obteniéndose la mayor diferencia en el pozo de observación (P16) con una diferencia de aproximadamente 60 metros.

A pesar de que se aumentó el criterio de cierre de convergencia y el modelo de simulación convergió, no se logró disminuir las diferencias de niveles obtenidas entre los diferentes algoritmos de cálculo.

En el caso del pozo de observación (P16), en el que se observó la mayor diferencia de niveles en todos los períodos de simulación entre los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, se colocó un pozo de observación en una celda adyacente inferior al pozo (P16) y se analizaron los niveles obtenidos con este nuevo pozo de observación (P16-1), el que se encuentra en las coordenadas (8778, 5220).

Los resultados obtenidos con el pozo (P16-1) para todos los períodos de simulación con los diferentes algoritmos de cálculo muestran una diferencia de niveles de aproximadamente 1 metro. Los diferentes resultados obtenidos con los pozos de observación (P16) y (P16-1), puede deberse a que la zona, en que ambos pozos se encuentran, es una zona cercana a la condición de borde del rajo minero y de cambio de conductividad hidráulica, como se observa en las Figuras 4.5 y 4.6. Además, a partir del segundo período de simulación en adelante las celdas de los estratos superiores de la zona del rajo minero se encuentran inactivas, esto para hacer posible el crecimiento gradual del rajo con la condición de borde de carga constante.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de los algoritmos de cálculo nos demuestran que hay que ser bastante cautelosos a la hora de interpretar los resultados obtenidos por los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, puesto que en lo que se refiere a resultados puntuales, éstos no siempre podrían ser los correctos. Por esto se recomienda hacer la interpretación de los resultados no solo en puntos específicos de los modelos de simulación, sino a nivel general del dominio del modelo de simulación.

También, se realizó un balance del caudal de salida del rajo para los cuatro períodos de simulación del caso hipotético “B”, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos con los diferentes algoritmos de cálculo. En la Tabla 4.15 se presentan los resultados obtenidos del caudal de salida del rajo para el último paso de tiempo de cada período de simulación.

**Tabla 4.15**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero en los Cuatro Períodos de Simulación**

Algoritmos de cálculo	Caudal (l/s)			
	1 año	5 años	10 años	25 años
PCG (VM)	43.45	25.45	27.78	10.86
SAMG (VM)	43.37	25.48	27.78	10.85
SIP (VM)	43.45	25.45	27.78	10.86
SOR (VM)	43.45	25.45	27.78	10.86
WHS (VM)	43.45	25.45	27.78	10.86
GMG (VM)	43.45	25.45	27.78	10.86
PCG (MS)	43.45	25.45	27.78	10.86
PCG4 (MS)	43.45	25.45	27.78	10.86
SIP (MS)	43.45	25.45	27.78	10.86
SOR (MS)	43.45	25.45	27.78	10.86

Como se observa en la Tabla 4.15 de los caudales de salida del rajo minero, se obtuvieron resultados iguales con todos los algoritmos de cálculo para los cuatro períodos de simulación, exceptuando los caudales obtenidos con el algoritmo de cálculo SAMG para el primer, segundo y cuarto período, los cuales presentan una muy pequeña diferencia.

Del análisis de los algoritmos de cálculo del Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT se puede concluir, que no todos los algoritmos de cálculo convergen con todos los modelos de simulación. En el caso, que el modelo de simulación cumpla con los criterios de cierre de convergencia y de balance de masa, no necesariamente significa que los resultados obtenidos sean correctos, siempre hay que realizar un análisis visual y numérico de las cargas hidráulicas obtenidas y preguntarse si las mismas son físicamente posibles.

Como se mencionó anteriormente, existe un serio problema en las simulaciones numéricas de gran escala y éste es la velocidad con la cual los sistemas de ecuaciones pueden ser solucionados por los algoritmos de cálculo. En esta tesis no se realizó el análisis del tiempo de convergencia para los diferentes “solvers”, pero se presentan los resultados obtenidos de un análisis realizado por investigadores del Waterloo Hydrogeologic Inc. y del Fraunhofer Institute SCAI denominado Algebraic Multigrid for Ground Water Flow and Oil Reservoir Simulation.

El objetivo de este estudio fue utilizar diferentes algoritmos de cálculo en varios modelos de simulación reales de flujo de aguas subterráneas y comparar el funcionamiento y resultados de los mismos. Los algoritmos de cálculo utilizados fueron los siguientes: PCG, desarrollado por el

USGS y utilizado en el MODFLOW-2000, WHS desarrollado por Waterloo Hydrogeologic y utilizado en el Visual MODFLOW; y el algoritmo de cálculo SAMG, desarrollado por el Fraunhofer Institute y utilizado en el Visual MODFLOW.

Seis modelos de flujo de aguas subterráneas fueron seleccionados para realizar las comparaciones, estos modelos son proyectos que fueron elaborados por Waterloo Hydrogeologic's Consulting Division, utilizando el Visual MODFLOW. A continuación se presenta la discretización espacial que se utilizó en los seis modelos:

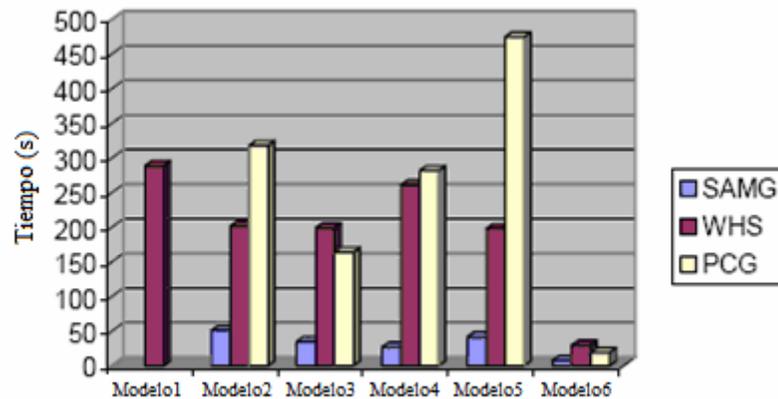
- Modelo 1, contiene 44908 celdas, conformadas por 109 filas, 103 columnas y 4 capas
- Modelo 2, contiene 110166 celdas, conformadas por 122 filas, 129 columnas y 7 capas
- Modelo 3, contiene 210574 celdas, conformadas por 178 filas, 169 columnas y 7 capas
- Modelo 4, contiene 138276 celdas, conformadas por 167 filas, 138 columnas y 6 capas
- Modelo 5, contiene 85680 celdas, conformadas por 120 filas, 102 columnas y 7 capas
- Modelo 6, contiene 59616 celdas, conformadas por 138 filas, 144 columnas y 3 capas

Los modelos de simulación 1, 2, 3 y 4, son modelos de flujo de aguas subterráneas de escala regional realizados para la Provincia de Ontario para el programa de Estudios de Aguas Subterráneas. El modelo 5, es un modelo regional inicialmente desarrollado por el USGS y más tarde ampliado y refinado por el Waterloo Hidrogeologic. El modelo 6, es un modelo de escala regional de una mina en Chile para un estudio de factibilidad de abastecimiento de agua.

Para los objetivos de este estudio, Waterloo Hidrogeologic implementó el “solver” SAMG en el Visual MODFLOW. Todos los modelos para este estudio fueron solucionados usando el Visual MODFLOW 3.2 en un Pentium III, con un procesador de 500MHz y una memoria RAM de 256 Mb. El funcionamiento de los algoritmos de cálculo fue medido comparando el tiempo requerido para que la solución converja a una solución razonable. Debido a que el “solver” SAMG utiliza un criterio de cierre de convergencia diferente al del PCG y el WHS, se utilizó un balance de masas con un error del 0.5% como criterio para indicar una solución razonable. Para alcanzar el objetivo, los criterios de cierre para cada algoritmo de cálculo fueron ajustados sobre una prueba de ensayo y error para cada modelo. Una inspección visual de las cargas hidráulicas también fue realizada para asegurar soluciones razonables.

Una comparación de los tiempos de solución de cada “solver” para los seis modelos de simulación se presenta en la Figura 4.12. Para todos los modelos probados, excepto el Modelo 1, el algoritmo de cálculo SAMG demostró una ventaja de funcionamiento significativa sobre el PCG y el WHS. En los casos donde todos los “solvers” convergieron a una solución, el SAMG era más rápido que el WHS por un factor de entre 3.7 y 9.7 y más rápido que el PCG por un factor de entre 2.4 y 11.3.

**Figura 4.12**  
**Comparación del Tiempo de Convergencia para los “Solvers” SAMG, WHS y el PCG**



El Modelo 1 no convergió a una solución adecuada en una cantidad de tiempo razonable usando el PCG y a pesar de que el algoritmo de cálculo SAMG convergió a una solución con un balance de masa menor al 0.5 %, una inspección visual de la solución indicó que la misma no era una solución razonable. Aunque, los modelos utilizados en el estudio tenían una amplia gama de dimensiones de grillas, no se encontró una correlación entre el tamaño de grilla del modelo (el número total de celdas de la grilla) y las mejoras de funcionamiento realizadas por el SAMG.

En los modelos grandes con grillas bastantes finas, el ahorro de tiempo y de costo computacional de usar un algoritmo de cálculo que obtenga soluciones adecuadas en un tiempo razonable, es muy importante. Puesto que esto permite invertir más tiempo en la creación de un mejor modelo conceptual y en la interpretación de los resultados.

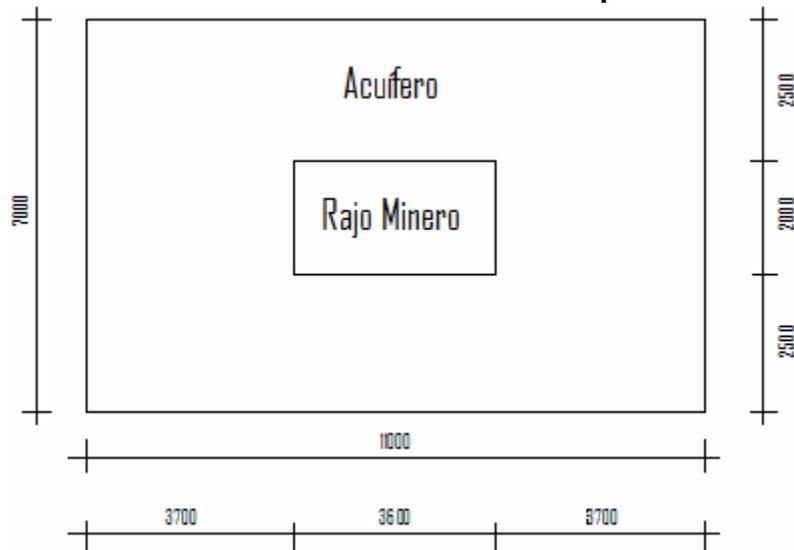
#### 4.4 Modelación numérica utilizando programas de diferencias finitas

##### 4.4.1 Descripción del caso hipotético “C”

Para el análisis de la influencia de la correcta representación de un rajo minero durante el drenaje en la etapa de operación se construyó el caso hipotético “C” en los softwares comerciales de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT. Posteriormente, se utilizó este modelo para analizar el comportamiento de los descensos de los niveles de aguas subterráneas ocasionados por el drenaje del rajo. Para la simulación del rajo minero se emplearon diferentes condiciones de bordes, tanto artificiales como naturales, que se encuentran incorporadas en los diferentes softwares comerciales, con el fin de aproximarse lo más posible a la realidad. Las condiciones de bordes utilizadas para la representación del rajo minero son las siguientes: carga constante, dren y campo de pozos de bombeo, las cuales más adelante serán descritas. El objetivo de esta fase del análisis es familiarizarse con las herramientas disponibles y verificar la consistencia y funcionalidad de las mismas.

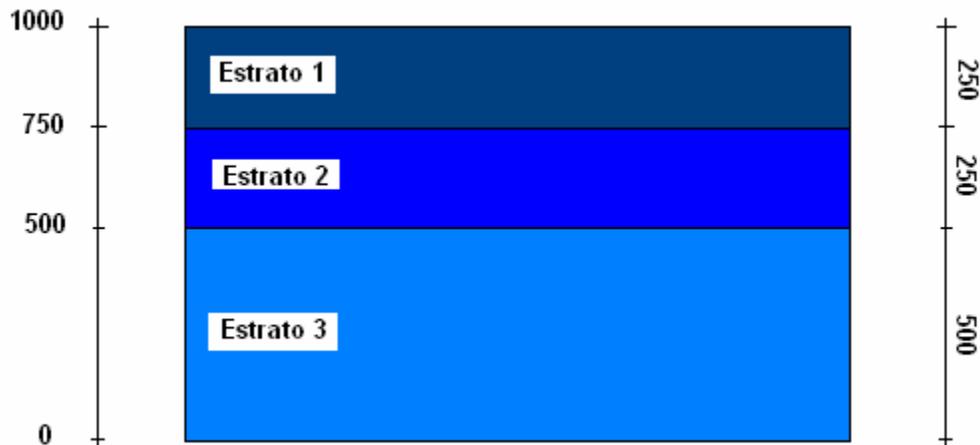
El caso hipotético “C” que representa el drenaje del rajo minero se describe a continuación a través de la Figura 4.13, la cual es un esquema gráfico visto en planta, en el cual el área rectangular de 1000 m x 7000 m representa el acuífero y el área rectangular de 3600 m x 2000 m, que se encuentra en el centro del área del acuífero, representa el rajo minero.

**Figura 4.13**  
**Vista en Planta del Dominio del Caso Hipotético “C”**



En la Figura 4.14 se muestra una vista en corte del dominio del modelo de simulación, en la cual el acuífero tiene un espesor total de 1000 m y esta conformado por tres estratos de diferentes espesores y propiedades hidrogeológicas.

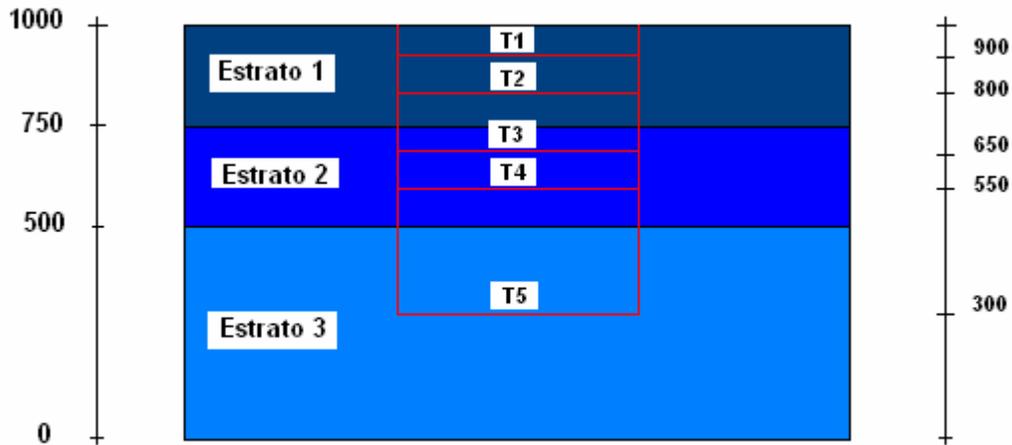
**Figura 4.14**  
**Vista en Corte del Dominio del Caso Hipotético “C”**



La discretización espacial horizontal se realizó con una grilla de diferencias finitas homogénea, la cual está conformada por celdas cuadradas de 50 m x 50 m, formando estas celdas un total de 140 filas y 220 columnas. La discretización espacial vertical está compuesta por tres estratos acuíferos heterogéneos entre sí, tanto en sus propiedades hidrogeológicas como en sus espesores.

En cuanto a la discretización temporal se analizaron los niveles de aguas subterráneas en el acuífero para cinco períodos de tiempo  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  y  $t_5$ , como se muestra en la Figura 4.15. Donde  $t_1$  corresponde a un período de simulación de 1 año,  $t_2$  al período de simulación hasta el año 5,  $t_3$  corresponde a un período de simulación hasta el año 10,  $t_4$  al período de simulación hasta el año 15 y  $t_5$  hasta el año de simulación 20.

**Figura 4.15**  
**Vista en Corte del Rajo para Diferentes Tiempos de Simulación Caso Hipotético “C”**



El acuífero del caso hipotético “C” se caracteriza por ser heterogéneo, contando con tres estratos acuíferos de diferentes propiedades hidrogeológicas entre sí, pero individualmente cada estrato acuífero se caracteriza por ser homogéneo e isotrópico. La simulación del caso hipotético “C” que representa el drenaje del rajo minero se la realizó en régimen transiente. Las propiedades de los diferentes estratos del acuífero y el tipo de material por el cual están conformados los estratos se presentan en las Tablas 4.16 y 4.17. En la Figura 4.14 se muestran las ubicaciones de los diferentes estratos.

**Tabla 4.16**  
**Propiedades Hidrogeológicas del los Estratos del Caso Hipotético “C”**

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
<b>Kx (m/d)</b>	5.00E-03	1.00E-03	1.00E-05
<b>Ky (m/d)</b>	5.00E-03	1.00E-03	1.00E-05
<b>Kz (m/d)</b>	5.00E-03	1.00E-03	1.00E-05
<b>Ss (1/m)</b>	5.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
<b>Sy</b>	5.00E-02	1.00E-04	1.00E-04
<b>Eff. Por.</b>	0.08	0.08	0.08
<b>Tot. Por.</b>	0.15	0.15	0.15

Donde:

- Kx, Ky y Kz : conductividades hidráulicas en las direcciones x, y y z
- Ss : coeficiente de almacenamiento específico
- Sy : coeficiente de capacidad específica
- Eff. Por. : porosidad efectiva
- Tot. Por. : porosidad total

**Tabla 4.17**  
**Características Geológicas de los Estratos del Caso Hipotético “C”**

Estrato	Espesor (m)	K (cm/s)	Descripción
1	500	1.00E-06 - 1.00E-05	Roca basal medianamente fracturada y/o semipermeable
2	1000	1.00E-06 - 1.00E-05	
3	1500	1.00E-09 - 1.00E-07	Roca basal y/o fracturada

Donde:

$K$  : rango de conductividades hidráulicas para las diferentes formaciones acuíferas

#### 4.4.2 Representación del rajo minero con diferentes condiciones de borde

##### 4.4.2.1 Condición de borde de carga constante

###### **Definición**

La condición de borde de carga constante es usada para fijar el valor de la carga en la celda seleccionada independientemente de las condiciones del sistema en las celdas circundantes. Esta condición de borde actúa como una fuente infinita de agua que entra en el sistema, o como un sumidero infinito para el agua que abandona el sistema. Por lo tanto, las condiciones de borde constante pueden tener una influencia significativa sobre los resultados de una simulación, y pueden conducir a predicciones poco realistas, en particular cuando es usada en posiciones cerca del área de interés.

La condición de borde de carga constante permite que las cargas especificadas sean directamente interpoladas en el tiempo entre el principio y el final de cada período de tiempo, de tal modo que la carga especificada de una celda pueda cambiar en cada paso de tiempo dado. Los datos de entrada que requiere esta condición de borde son:

- *Carga inicial*, es el valor de la carga al inicio del período de simulación
- *Carga final*, es el valor de la carga al final del período de simulación
- *Tiempo inicial*, es el tiempo del inicio del período de simulación
- *Tiempo final*, es el tiempo del final del período de simulación

###### **Simulación del caso hipotético “C”**

Para la simulación del caso hipotético “C” se utilizaron tanto en el Visual MODFLOW como en el MODFLOW - SURFACT, los valores de las propiedades hidrogeológicas de la Tabla 4.16 y como se mencionó anteriormente, se utilizaron cinco períodos de simulación, en los cuales se usaron diferentes valores de carga constante para cada período de simulación, esto para hacer posible la representación del crecimiento gradual del rajo. Las cargas constantes representan la profundidad del rajo, es decir, la cota del fondo del rajo minero. En la Tabla 4.18 se presentan los valores de las cargas constantes para los diferentes períodos de simulación y la ubicación de las mismas en los estratos acuíferos. La condición de borde de carga constante permite modelar el rajo minero fijando un nivel de agua constante en el sistema acuífero, este nivel representa la cota de fondo del rajo y el programa de diferencias finitas calcula el caudal de salida del rajo para mantener el nivel constante fijado anteriormente.

Para hacer posible la simulación del drenaje del rajo minero con la condición de borde de carga constante en el segundo estrato acuífero (tercer y cuarto período de simulación), fue necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer estrato acuífero y en el caso de la simulación de la carga constante en el tercer estrato (quinto período de simulación), fue necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer y segundo estrato.

En el primer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, una carga hidráulica inicial igual a la cota superior del terreno, en el caso del modelo del caso hipotético “C”, esta carga inicial tiene un valor de 1000 msnm. Para el segundo período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del primer período de simulación. En el caso, del tercer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del segundo período de simulación y así sucesivamente para el resto de los períodos de simulación.

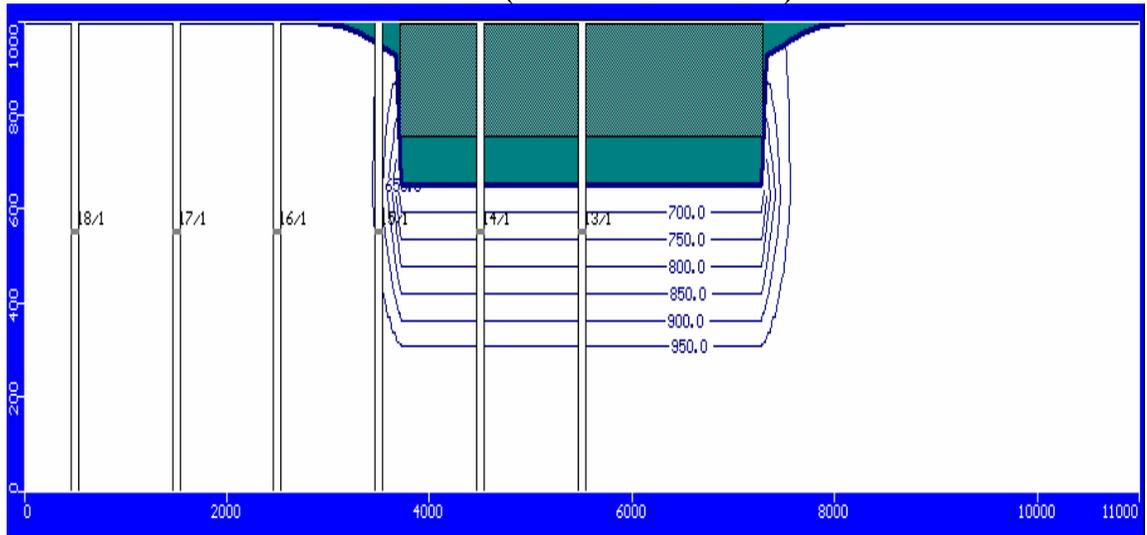
**Tabla 4.18**  
**Valores de la Condición de Borde de Carga Constante**

<b>Tiempo simulación</b>	<b>Carga constante (m)</b>	<b>Ubicación en el estrato</b>
T <sub>1</sub> (1 año)	900	Primero
T <sub>2</sub> (5 años)	800	Primero
T <sub>3</sub> (10 años)	650	Segundo
T <sub>4</sub> (15 años)	550	Segundo
T <sub>5</sub> (20 años)	300	Tercero

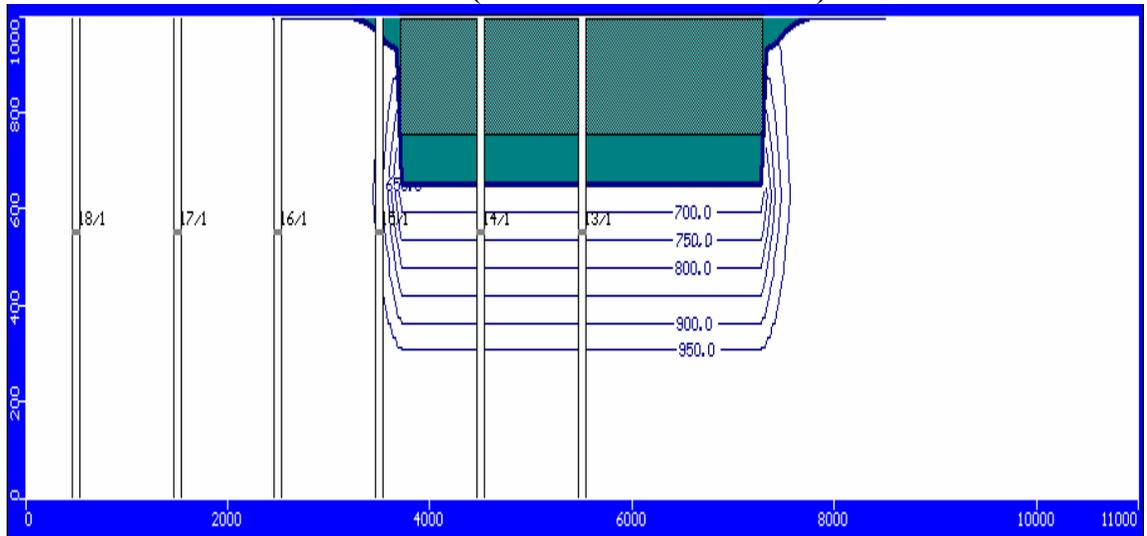
### ***Resultados***

Las Figuras 4.16 y 4.17 muestran un corte longitudinal realizado en el centro del modelo de simulación del caso hipotético “C”, donde se observa la distribución de los niveles de aguas subterráneas obtenidas para el tercer período de simulación del drenaje del rajo minero, en este caso representado como una condición de borde de carga constante.

**Figura 4.16**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante (Visual MODFLOW)**



**Figura 4.17**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante (MODFLOW-SURFACT)**



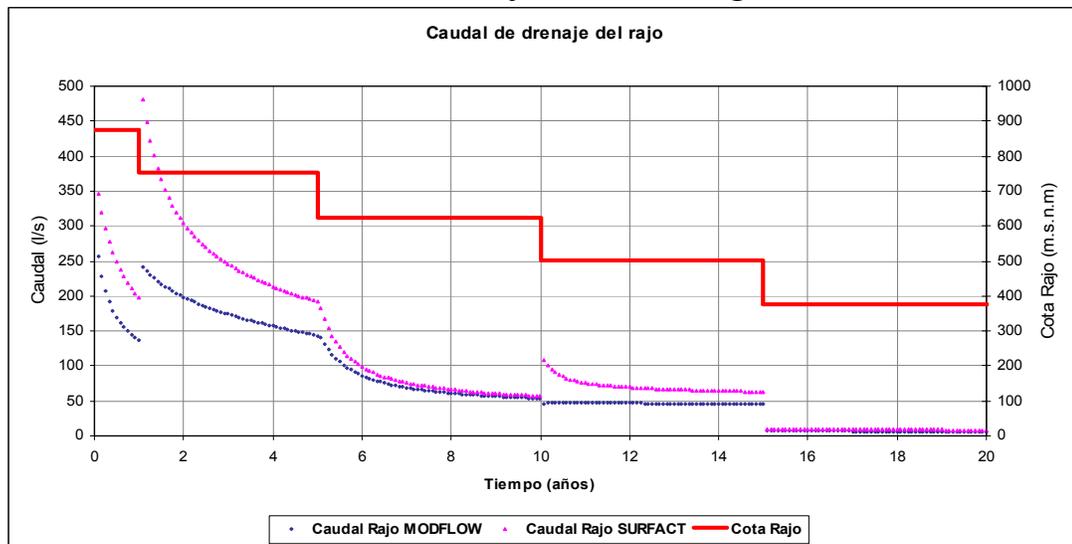
Como se puede observar en las Figuras 4.16 y 4.17 los resultados obtenidos con los softwares Visual MODFLOW y MODFLOW-SURFACT son diferentes entre sí. El área de impacto del drenaje del rajo minero obtenido con el Visual MODFLOW, es en el tercer período de simulación, al igual que en todos los períodos de simulación, mayor al área del impacto del drenaje obtenido con el MODFLOW-SURFACT. En el Anexo Digital AX en las Figuras AX.1 a AX.10, se presentan los resultados obtenidos por ambos softwares para todos los períodos de simulación.

Mediante las figuras se puede concluir, que los gradientes hidráulicos obtenidos con los softwares, al igual que el área de impacto, difieren entre sí. En el caso del Visual MODFLOW, a pesar de que el área de impacto es mayor, los gradientes hidráulicos son menores que los obtenidos con el MODFLOW-SURFACT.

Al realizar el balance hídrico y analizar específicamente el caudal de salida del rajo, el caudal obtenido con el MODFLOW-SURFACT es mayor, esto se debe al mayor gradiente hidráulico que éste presenta. En la Figura 4.18 se observan los caudales de salida del rajo para las diferentes profundidades del rajo.

Los resultados obtenidos de la simulación del rajo minero concuerdan con la Ley de Darcy, la cual describe el movimiento del agua a través de un medio poroso, donde el caudal pasante a través de un suelo es directamente proporcional al gradiente hidráulico y al área perpendicular al escurrimiento.

**Figura 4.18**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero – Carga Constante**



La Figura 4.20 muestra los niveles de agua subterránea resultantes cercanos al sector del drenaje para el primer, tercer y quinto período de simulación. Los niveles fueron obtenidos a través de pozos de observación, los cuales se encuentran a diferentes profundidades y distancias del sector de drenaje del rajo minero (Ver Tabla 4.19 y Figura 4.19).

Se puede observar que existe una diferencia en los niveles de agua subterránea, obteniéndose valores de niveles menores en los pozos de observación con el Visual MODFLOW, concordando éstos con los gráficos mostrados anteriormente en los cortes longitudinales de la distribución de

niveles de agua subterránea. Los niveles menores indican que existe mayor descenso en los resultados obtenidos con el Visual MODFLOW, es decir, el área de impacto causado por el drenaje del rajo obtenido con el Visual MODFLOW es efectivamente mayor, que al obtenido con el MODFLOW-SURFACT. Cabe notar, que el quinto período de simulación tiene diferente escala a los otros períodos, debido a que los valores de los niveles obtenidos no permiten el uso de la misma escala de graficación.

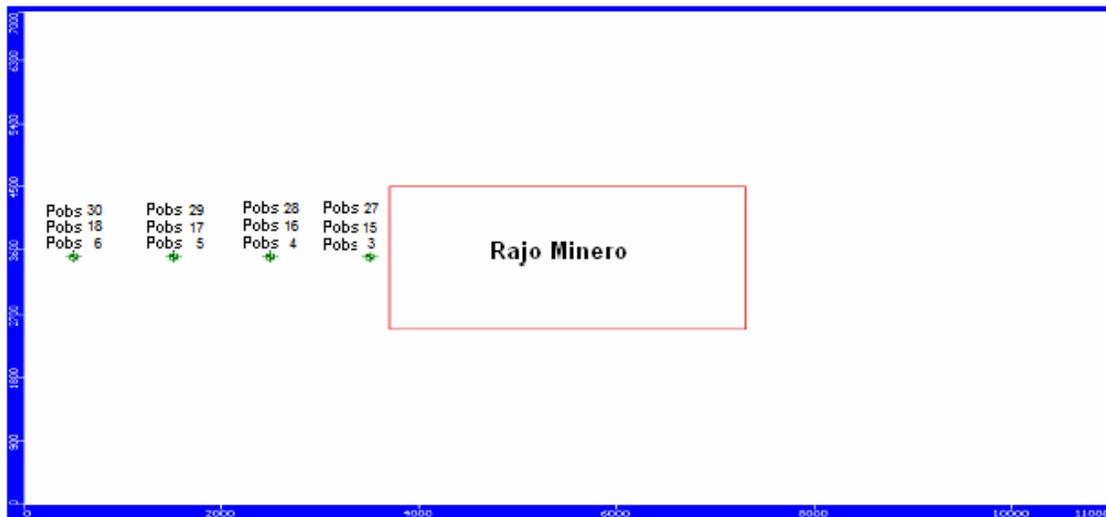
**Tabla 4.19**  
**Datos de los Pozos de Observación**

Pozo obs.	x (m)	Prof. medición (m)	Período Simulación
3	2000	800	T <sub>1</sub> (1 año)
4	3000	800	T <sub>1</sub> (1 año)
5	4000	800	T <sub>1</sub> (1 año)
6	5000	800	T <sub>1</sub> (1 año)
15	2000	550	T <sub>3</sub> (10 años)
16	3000	550	T <sub>3</sub> (10 años)
17	4000	550	T <sub>3</sub> (10 años)
18	5000	550	T <sub>3</sub> (10 años)
27	2000	300	T <sub>5</sub> (20 años)
28	3000	300	T <sub>5</sub> (20 años)
29	4000	300	T <sub>5</sub> (20 años)
30	5000	300	T <sub>5</sub> (20 años)

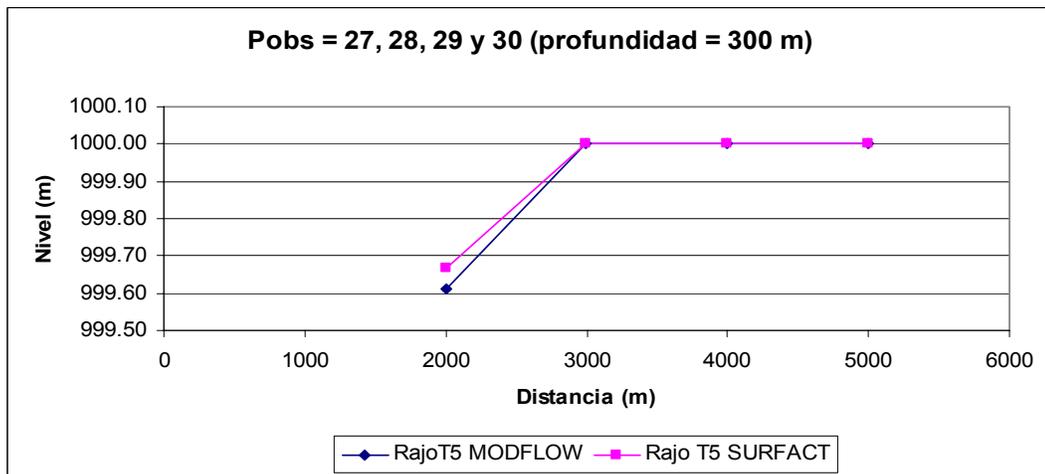
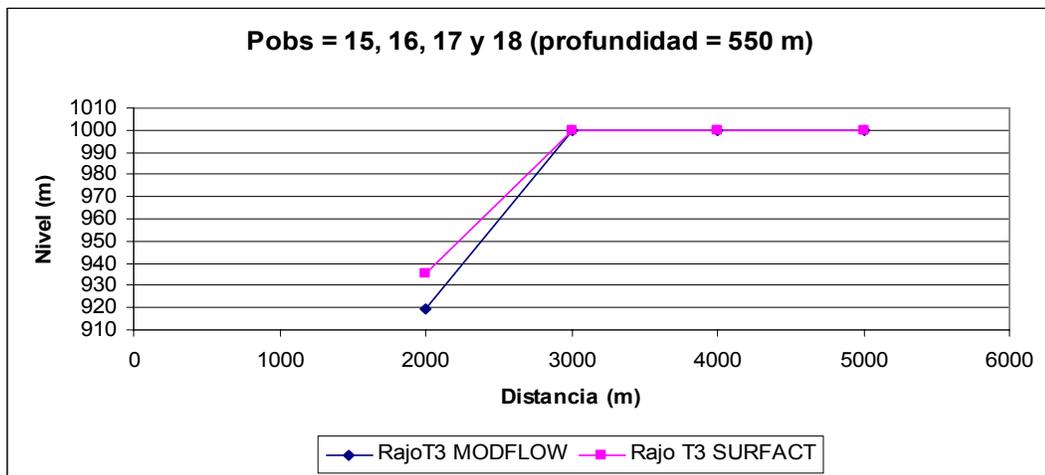
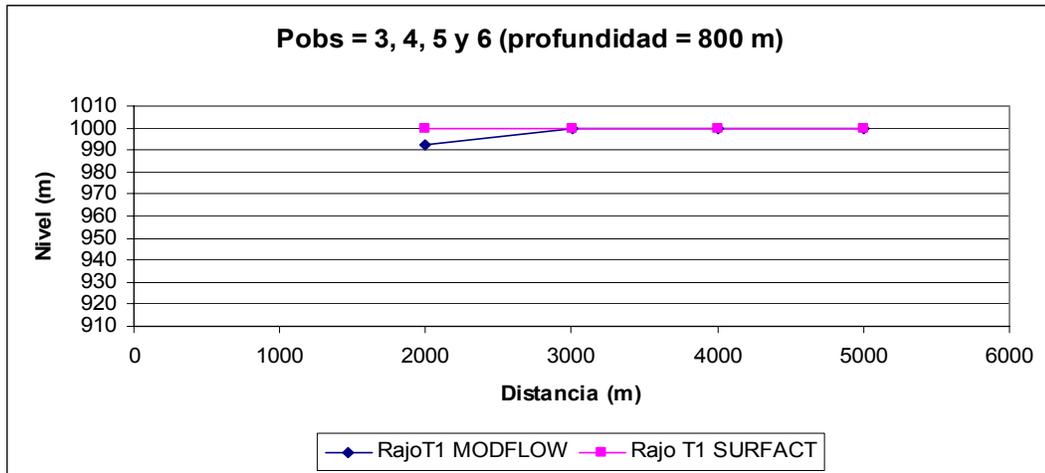
Donde:

$x$  : distancia del pozo de observación al centro del rajo minero

**Figura 4.19**  
**Vista en Planta de la Ubicación de los Pozos de Observación**



**Figura 4.20**  
**Niveles en los Pozos de Observación – Carga Constante**



La diferencia en los resultados obtenidos a través del Visual MODFLOW y el MODFLOW-SURFACT, se debe a que ambos softwares abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas. El dominio de flujo es discretizado en filas, columnas y capas, tal que cada nodo representa un bloque rectangular de material poroso que se denomina como una celda. Un nodo en la grilla de diferencia finita representa ya sea una celda sin flujo, una celda de carga variable, o una celda de carga constante y cualquier propiedad hidráulica asociada con una celda es especificada al nodo correspondiente.

En el caso del Visual MODFLOW, este software utiliza la media armónica de las transmisibilidades de los bloques adyacentes para calcular la transmisibilidad en el bloque. Para sistemas acuíferos, la transmisibilidad de un bloque es calculado como la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor del bloque saturado.

El software MODFLOW-SURFACT utiliza un procedimiento más apropiado y físicamente más consistente, el cual es el uso de la media armónica de las conductividades hidráulicas saturadas con la ponderación de un punto medio de las permeabilidades, el cual es relacionado con el espesor saturado de las celdas a través de las funciones de pseudo suelo para el esquema de saturación variable (Ver 3.4.1. Descripción del MODFLOW - SURFACT).

Esta es la razón por la cual con el MODFLOW – SURFACT se obtienen caudales de salida del rajo minero mayores a los obtenidos con el Visual MODFLOW, a pesar de que la zona impactada por el drenaje del primer programa es menor que la obtenida con el segundo.

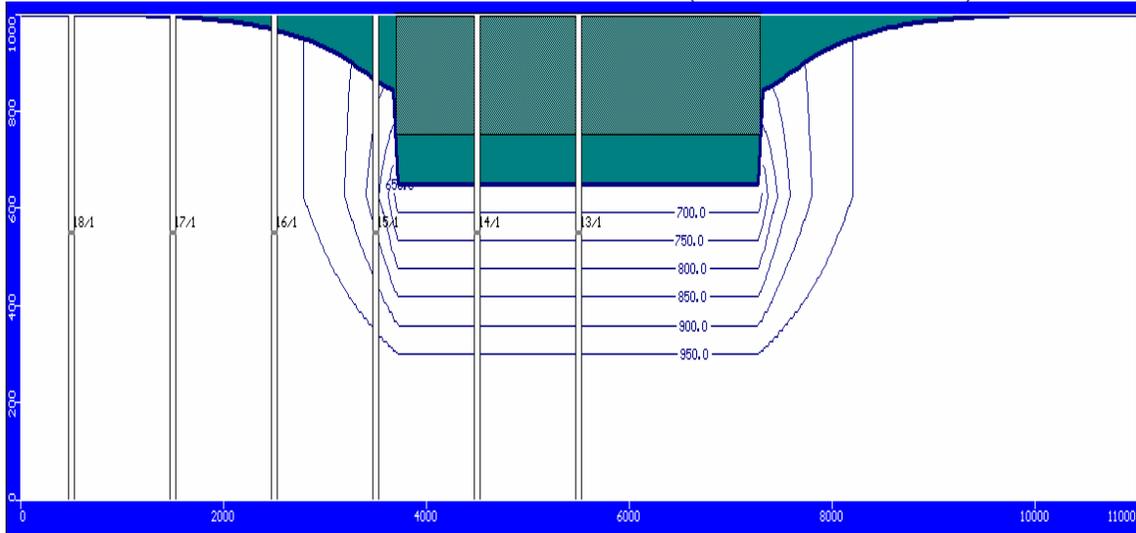
También se realizó la simulación del caso hipotético “C” anteriormente descrito, utilizando las mismas condiciones de borde, pero en esta ocasión se cambiaron las conductividades hidráulicas de los estratos acuíferos y se dejaron los mismos valores para el resto de las propiedades hidrogeológicas. Esta simulación se la realizó para analizar si es que el comportamiento de las aguas subterráneas sometidas al drenaje del rajo seguía la misma tendencia obtenida en los resultados anteriores. Las nuevas conductividades hidráulicas utilizadas en el análisis se presentan en la Tabla 4.20 y como se puede observar, éstas son un grado de magnitud mayor que las anteriores.

**Tabla 4.20**  
**Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos – Conductividades Mayores**

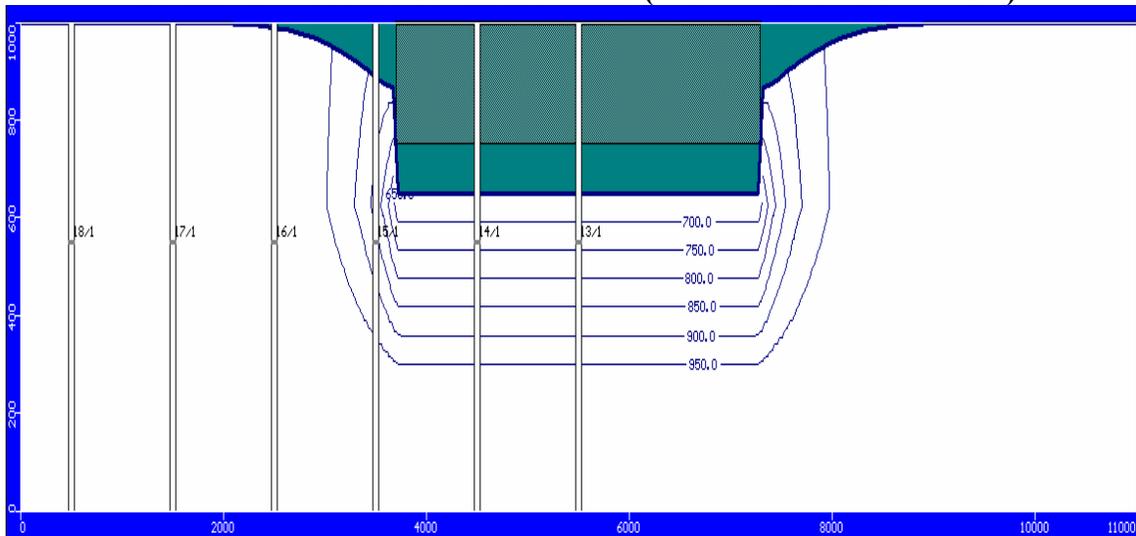
	<b>Estrato 1</b>	<b>Estrato 2</b>	<b>Estrato 3</b>
<b>Kx (m/d)</b>	5.00E-02	1.00E-02	1.00E-04
<b>Ky (m/d)</b>	5.00E-02	1.00E-02	1.00E-04
<b>Kz (m/d)</b>	5.00E-02	1.00E-02	1.00E-04
<b>Ss (1/m)</b>	5.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
<b>Sy</b>	5.00E-02	1.00E-04	1.00E-04
<b>Eff. Por.</b>	0.08	0.08	0.08
<b>Tot. Por.</b>	0.15	0.15	0.15

La distribución de los niveles de agua subterráneas que se obtuvieron en el tercer período de simulación con las conductividades hidráulicas con un grado de magnitud mayor que las anteriores se muestran en las Figura 4.21 y 4.22, las que son un corte longitudinal realizado en el centro del modelo de simulación.

**Figura 4.21**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante – Nuevas Conductividades (Visual MODFLOW)**



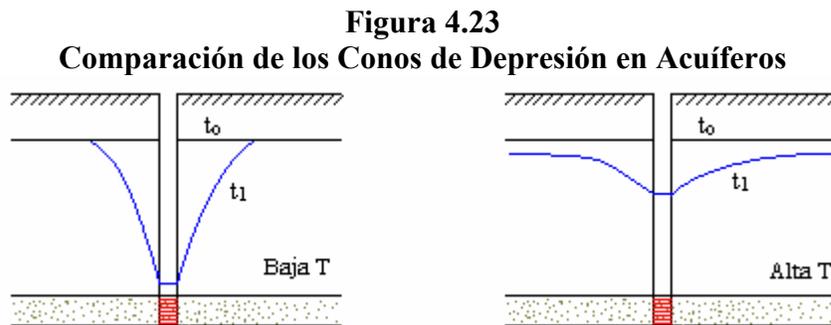
**Figura 4.22**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante – Nuevas Conductividades (MODFLOW - SURFACT)**



Al igual que en los resultados obtenidos primeramente, el área de impacto del drenaje del rajo minero obtenido con el Visual MODFLOW, es en el tercer período de simulación, al igual que en todos los períodos de simulación, mayor al área del impacto del drenaje obtenido con el MODFLOW-SURFACT. En el caso de los gradientes hidráulicos obtenidos con el Visual MODFLOW, éstos son menores que los obtenidos con el MODFLOW-SURFACT (ver Anexo Digital Figuras AX.10 a AX.20).

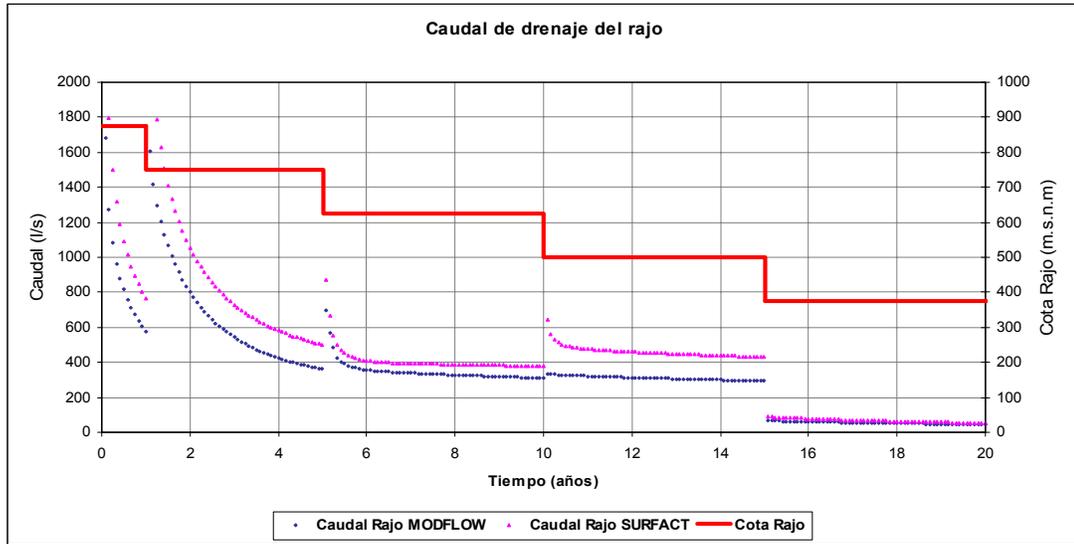
En el nuevo caso de simulación, el impacto ocasionado por el rajo minero en las aguas subterráneas tiene un mayor alcance, esto se debe a que las conductividades hidráulicas al ser mayores oponen menor resistencia al movimiento del flujo subterráneo, permitiendo su movimiento con mayor facilidad y produciendo que el descenso debido al drenaje alcance mayores distancias con el mismo período de simulación.

En el ejemplo que se presenta a continuación de la extracción de aguas subterráneas a través de un pozo de bombeo en un acuífero, se observa que el descenso en cualquier punto del acuífero en un tiempo dado es directamente proporcional al caudal de bombeo e inversamente proporcional a la transmisibilidad ( $T = K \times b$ ) y al coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) del mismo. En la Figura 4.23 se observa que los acuíferos de baja transmisibilidad desarrollan conos de depresión estrechos y profundos, mientras que los acuíferos de alta transmisibilidad desarrollan conos de depresión extensos y poco profundos. La transmisibilidad ejerce mayor influencia en el descenso que el coeficiente de almacenamiento.



Al realizar el balance hídrico y analizar específicamente el caudal de salida del rajo en el caso hipotético C con las nuevas conductividades hidráulicas, al igual que en la simulación del anterior caso, el caudal es mayor en el caso del MODFLOW-SURFACT, esto se debe al mayor gradiente hidráulico que éste presenta. En la Figura 4.24 se observan los caudales de salida del rajo para las diferentes profundidades del rajo.

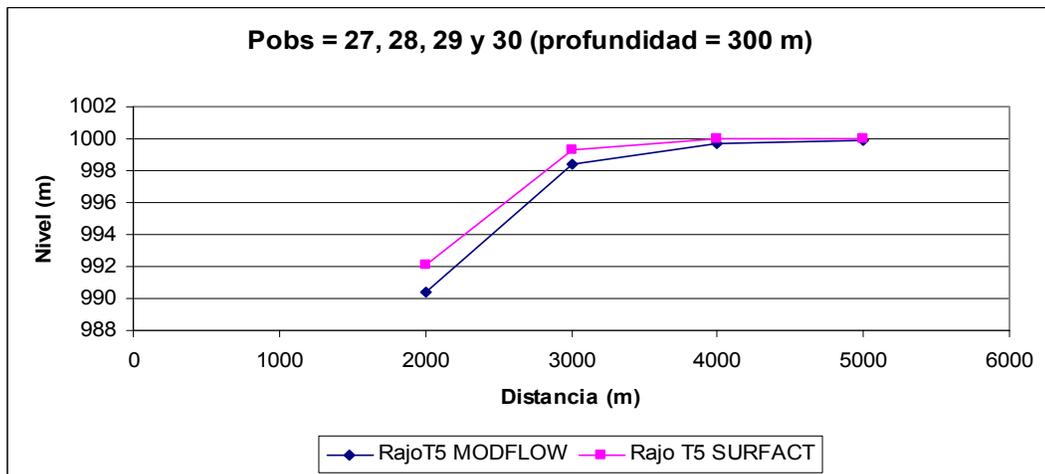
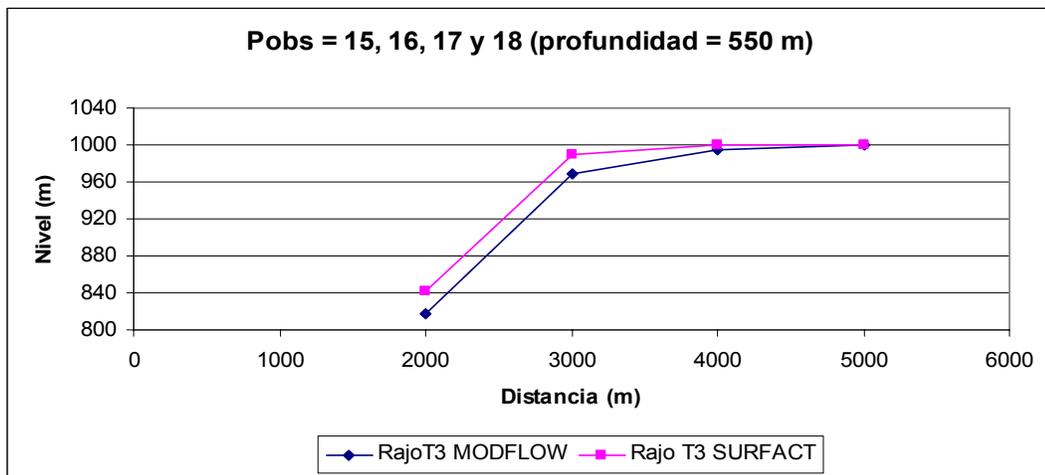
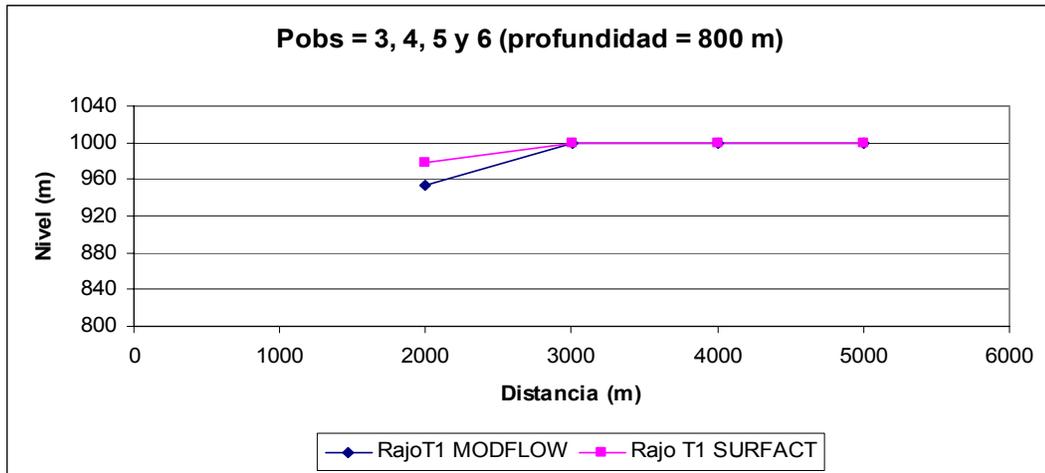
**Figura 4.24**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero Nuevas Conductividades – Carga Constante**



La Figura 4.25 muestra los niveles de agua subterránea resultantes cercanos al sector del drenaje para el primer, tercero y quinto período de simulación con las nuevas conductividades hidráulicas, los cuales fueron obtenidos a través de pozos de observación que se encontraban a las mismas distancias y profundidades que en el caso anterior (Ver Tabla 4.19 y Figura 4.19). Se obtuvieron niveles de agua subterránea menores en los pozos de observación con el Visual MODFLOW (mayor descenso), concordando éstos con los resultados mostrados anteriormente en los cortes longitudinales de la distribución de niveles de agua subterránea. Cabe notar, que el quinto período de simulación tiene diferente escala a los otros períodos, debido a que los valores de los niveles obtenidos no permiten el uso de la misma escala de graficación.

**Figura 4.25**

**Niveles en Pozos de Observación Nuevas Conductividades – Carga Constante**



Los resultados, con las conductividades hidráulicas con un grado de magnitud mayor, siguen la misma tendencia que los obtenidos en los primeros resultados, por lo que se comprueba que al existir una diferencia en la manera de abordar la aproximación de diferencia finita en los softwares utilizados para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas, los resultados que se obtienen son diferentes.

El inactivar las celdas de los estratos superiores del sector del rajo minero (rajo en el segundo y tercer estrato) y utilizar la condición de borde de carga constante para representar la cota de fondo del rajo, no es la manera más adecuada de modelar el drenaje de una mina a cielo abierto, puesto que el modelo de simulación es incapaz de reproducir el flujo de aguas subterráneas que fluye hacia el rajo por las paredes laterales del mismo. Este efecto se puede apreciar claramente en las figuras anteriores de la distribución de los niveles de agua subterránea vistas en cortes longitudinales.

En el drenaje de una mina a cielo abierto, desde el punto de vista hidrodinámico el rajo actúa como un sumidero en el sistema acuífero, hacia el que fluye el agua subterránea debido al descenso provocado por el drenaje. Esta filtración lateral del flujo de aguas subterráneas que existe en las paredes del rajo minero es necesaria incorporarla en el modelo numérico para que la simulación del caso hipotético “C” del drenaje del rajo se aproxime más a lo que ocurre en la realidad.

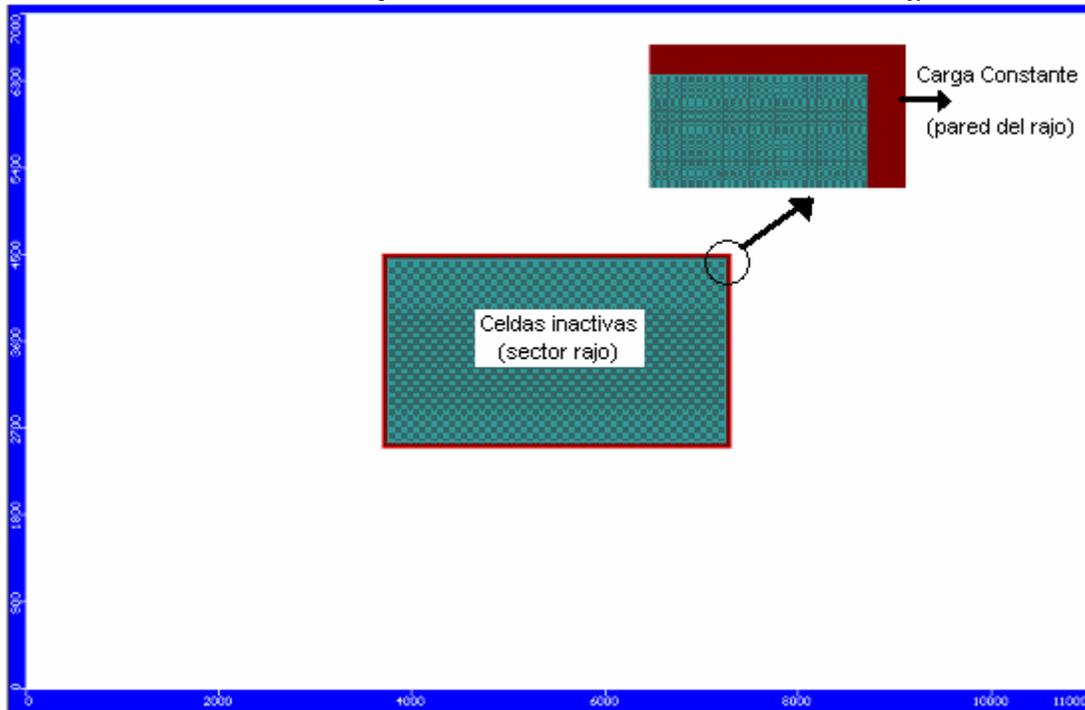
La incorporación de la filtración lateral en las paredes del rajo minero es necesaria realizarla en el tercer, cuarto y quinto período de simulación, en los cuales se inactivaron las celdas de los estratos superiores del sector del rajo. En estos períodos de simulación la filtración lateral se la representó como una carga constante colocada en los bordes del rajo, como se observa en la Figura 4.26.

En el caso del tercer y cuarto período de simulación, en los cuales la cota del fondo del rajo minero se encuentra en el segundo estrato acuífero, se colocó una condición de borde de carga constante de 751 m (cota inferior del primer estrato + 1 m) alrededor del rajo en el primer estrato.

En el caso del quinto período de simulación, en el cual el rajo se encuentra en el tercer estrato, se colocó una condición de borde de carga constante alrededor del rajo en el primer y segundo estrato, el valor de las cargas constantes son 751 m y 501 m (cota inferior del segundo estrato + 1m), respectivamente.

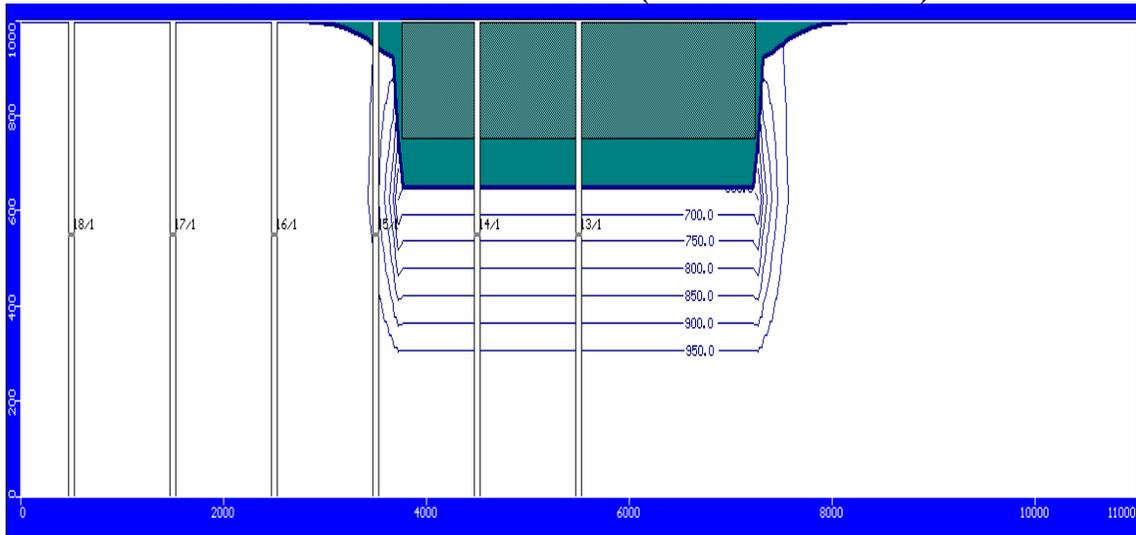
Para la simulación del caso hipotético “C” que incorpora la filtración lateral en el rajo se utilizaron las propiedades hidrogeológicas de la Tabla 4.3 , que son los mismos valores que se utilizaron para la simulación de los primeros resultados obtenidos con la condición de borde de carga constante mostradas en las Figuras 4.16 y 4.17.

**Figura 4.26**  
**Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral – Carga Constante**

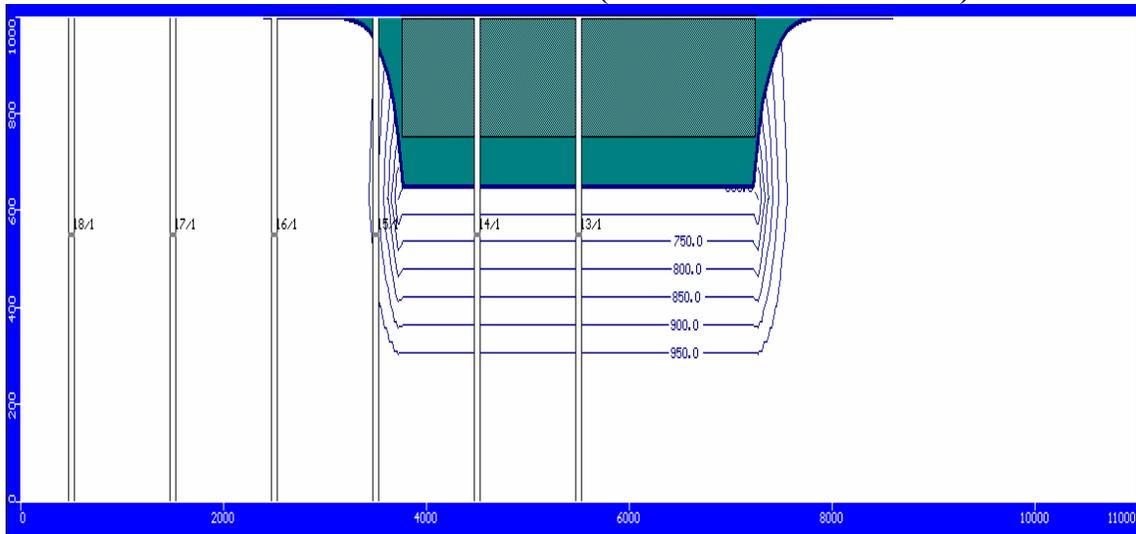


En las Figuras 4.27 y 4.28 se presentan las distribuciones de los niveles de agua subterránea obtenidos en el Visual MODFLOW y en el MODFLOW - SURFACT con la incorporación de la filtración lateral en las paredes del rajo en el drenaje de la mina a cielo abierto en la etapa de operación.

**Figura 4.27**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante – Filtración Lateral (Visual MODFLOW)**



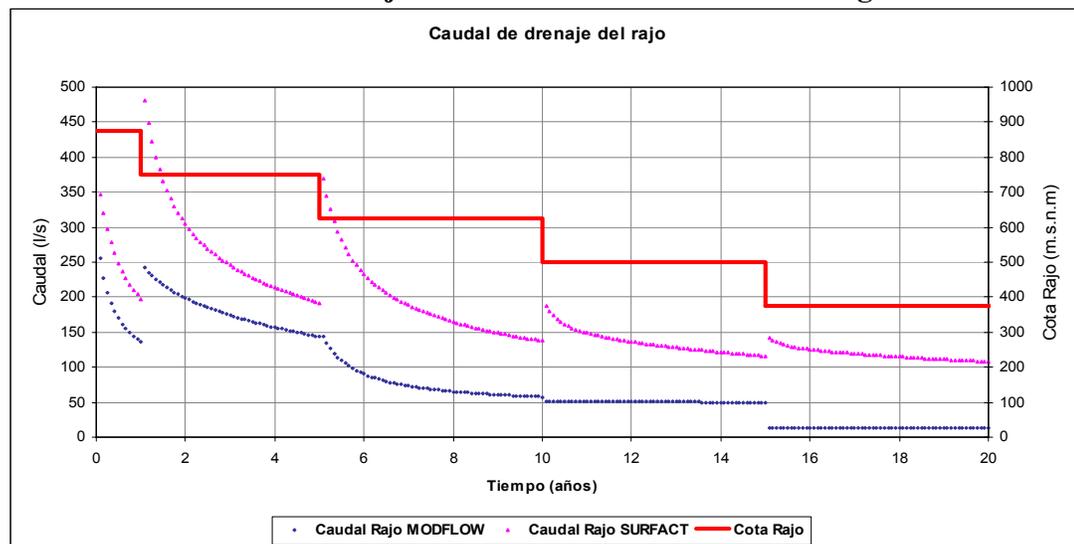
**Figura 4.28**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Carga Constante – Filtración Lateral (MODFLOW - SURFACT)**



En las Figuras 4.27 y 4.28 se puede observar la incorporación de la filtración lateral del flujo de agua subterránea en el sector del rajo, al igual que en los resultados obtenidos de la simulación del rajo minero solo con la condición de borde de carga constante, el área de impacto del drenaje del rajo minero obtenido con el Visual MODFLOW, es en todos los períodos de simulación mayor al área del impacto del drenaje obtenido con el MODFLOW-SURFACT. En el caso de los gradientes hidráulicos obtenidos con el Visual MODFLOW, éstos son menores que los obtenidos con el MODFLOW-SURFACT (ver Anexo Digital Figuras AX.21 a AX.26).

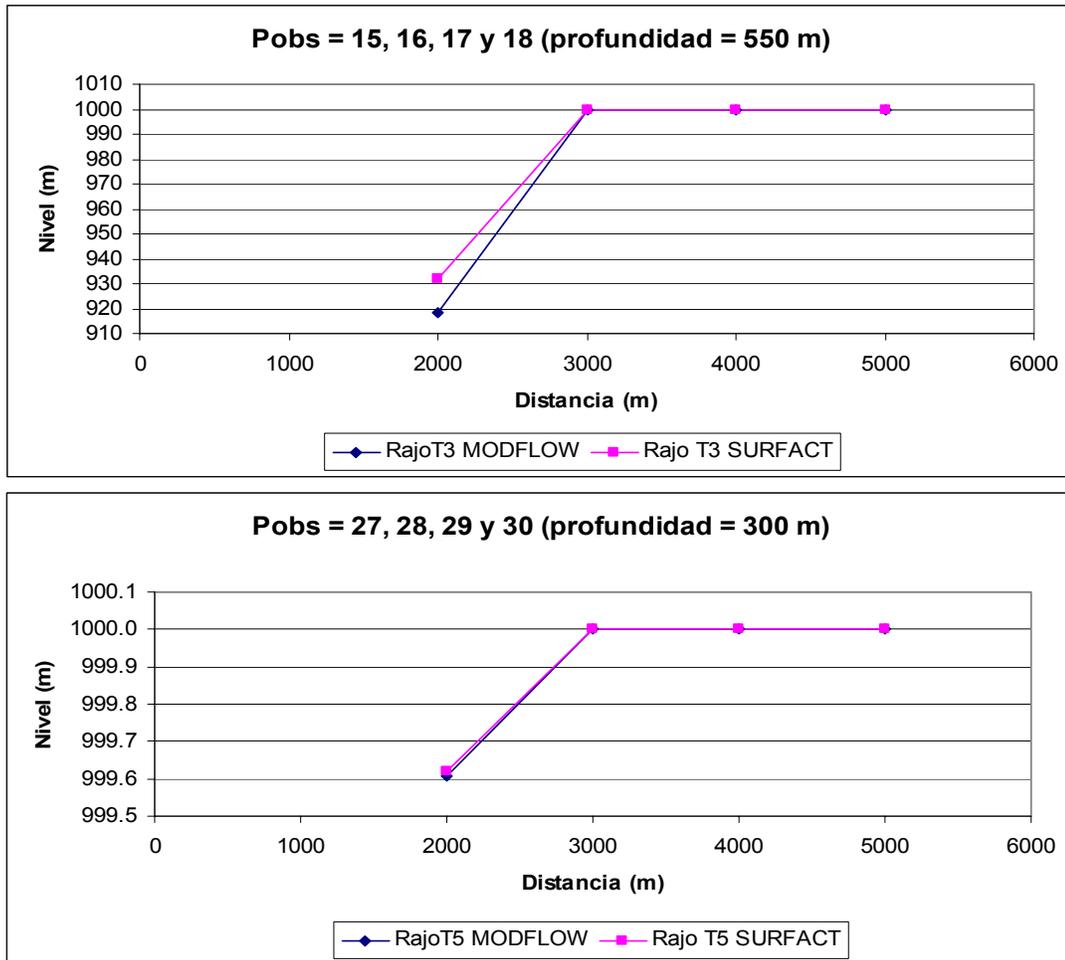
Al realizar el balance hídrico y analizar específicamente el caudal de salida del rajo, se observa que en la simulación del drenaje del rajo minero que incorpora la filtración lateral en las paredes del mismo, se obtuvo un mayor caudal de salida del mismo que la obtenida en la simulación del drenaje sin incorporar la filtración lateral. Se obtuvo un caudal de salida mayor, en el caso del MODFLOW-SURFACT, esto se debe al mayor gradiente hidráulico que éste presenta. En la Figura 4.29 se observan los caudales de salida del rajo para las diferentes profundidades del rajo.

**Figura 4.29**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero Filtración Lateral – Carga Constante**



La Figura 4.30 muestra los niveles de agua subterránea resultantes cercanos al sector del drenaje para el tercer y quinto período de simulación, éstos fueron obtenidos a través de pozos de observación, los cuales se encuentran a diferentes profundidades y distancias del sector de drenaje del rajo minero (Ver Tabla 4.19 y Figura 4.19). Se observa que existe una leve diferencia entre los niveles de aguas subterráneas obtenidos con la simulación del drenaje minero incluyendo la filtración lateral y los niveles obtenidos sin incluir la filtración lateral (Figura 4.20). En el caso de los resultados obtenidos con la incorporación de la filtración lateral en el rajo, éstos se caracterizan por presentar niveles de agua subterránea menores (mayor descenso provocado por el drenaje) a los obtenidos sin la incorporación del rajo minero, concordando estos resultados con los resultados mostrados de los caudales de salida del rajo minero. Al igual que en las simulaciones del rajo minero sin incluir la filtración lateral, se obtuvieron valores de niveles menores con el Visual MODFLOW (mayor descenso), concordando éstos con los resultados mostrados anteriormente en los cortes longitudinales de la distribución de los niveles de aguas subterráneas. Cabe notar, que el tercer y quinto período de simulación tienen diferentes escalas, debido a que los valores de los niveles obtenidos no permiten el uso de la misma escala de graficación.

**Figura 4.30**  
**Niveles en Pozos de Observación Filtración Lateral – Carga Constante**



La condición de borde de carga constante actúa como un sumidero infinito para que el agua abandone el sistema, lo que permite modelar el rajo minero fijando un nivel de agua constante en el sistema acuífero, siendo a su vez, éste el nivel de la cota de fondo del rajo. El programa de diferencias finitas calcula el caudal de salida de la condición de borde para mantener el nivel constante fijado anteriormente.

Este tipo de condición de borde, no tiene un límite para extraer agua del sistema, es decir, extrae toda el agua necesaria para mantener el nivel de agua fijado. Además, la simulación se inicia con el nivel de agua fijado por la condición de borde, lo que implica, que desde el primer paso de tiempo de cada período de simulación la cota de fondo del rajo se encuentra en su máxima profundidad (extracción instantánea).

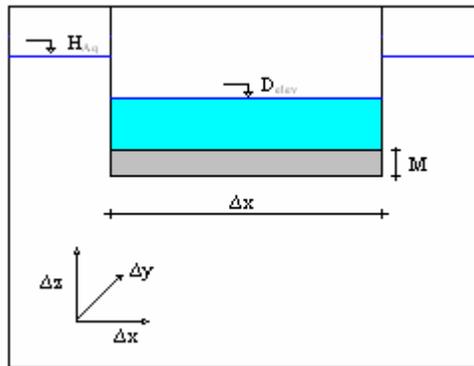
#### 4.4.2.2 Condición de borde de dren

##### Definición

La condición de borde de tipo dren está diseñada para simular los efectos de drenaje, tales como los drenajes agrícolas, que remueven el agua del acuífero en un caudal proporcional a la diferencia entre la carga en el acuífero y alguna carga o elevación fijada en el dren. El dren asume que el drenaje no tiene ningún efecto, si la carga en el acuífero cae por debajo de la elevación fijada del dren, como se muestra en las Ecuaciones 4.8 y 4.9.

La Ecuación 4.10 representa la fórmula por default de la conductancia, la cual es utilizada por MODFLOW para calcular la conductancia en caso de que el usuario lo especifique. También existe la posibilidad de colocar un valor numérico para la conductancia, si es que se tiene conocimiento del valor numérico. En la Figura 4.33 se muestra un esquema gráfico de la condición de borde de tipo dren.

**Figura 4.31**  
**Esquema Gráfico de la Condición de Borde de Dren**



$$Q_D = C_D (H_{Aq} - D_{elev}) \quad \text{para } H_{Aq} > D_{elev} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$Q_D = 0 \quad \text{para } H_{Aq} \leq D_{elev} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$C_D = \frac{K_z \cdot \Delta y \cdot \Delta x}{M} \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Donde:

$Q_D$  : caudal de la celda hacia el dren [ $L^3/T$ ]

$C_D$  : conductancia del dren [ $L^2/T$ ]

$H_{Aq}$  : carga hidráulica en la celda [L]

$D_{elev}$  : elevación del dren [L]

$K_z$  : conductividad hidráulica vertical del acuífero cercana a la zona del dren [L/T]

$\Delta y$  : largo del dren [L]

$\Delta x$  : ancho del dren [L]

$M$  : espesor del dren [L]

Los datos de entrada que requiere esta condición de borde son las siguientes:

- *Carga de elevación:* La cota del dren, o la elevación de la superficie libre de agua dentro del dren.
- *Elevación inferior:* Cota inferior del dren (solo para simulaciones con SEAWAT).
- *Conductancia:* La conductancia de un dren es un coeficiente que describe la pérdida de carga entre el dren y el sistema de agua subterránea. Esta pérdida es causada por la presencia de materiales extraños alrededor del dren, materiales del lecho del canal, las paredes del dren y el grado en el cual las aperturas de la tubería del dren puedan ser bloqueadas por precipitaciones químicas, raíces de plantas y otros.

En la mayor parte de las situaciones, la información requerida para calcular la conductancia del dren no está disponible. La información incluye la distribución de cargas alrededor del dren, la conductividad hidráulica del acuífero cerca del dren, el número y el tamaño de las aperturas del tubo del dren, la cantidad de materiales que obstruyen el dren y la conductividad hidráulica de estos materiales. El valor de la conductancia del dren por lo general es ajustado durante la calibración del modelo.

### ***Simulación del caso hipotético “C”***

En la simulación del caso hipotético “C” que representa el drenaje de una mina a cielo abierto se utilizaron los programas de diferencia finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT. En ambos programas se utilizaron las propiedades hidrológicas de la Tabla 4.16, que son las mismas utilizadas en el caso de la primera simulación del caso hipotético “C” con la condición de borde de carga constante.

Al igual que en el caso anteriormente nombrado, se utilizaron cinco períodos de simulación, en los cuales se usaron diferentes elevaciones del dren para cada período de simulación, la razón de haber utilizado diferentes períodos de simulación con diferentes elevaciones del dren, es para poder representar el crecimiento espacial del rajo a través del tiempo. La elevación del dren representa la cota del fondo del rajo minero, es decir, la profundidad del mismo. En la Tabla 4.21 se observan los valores de las elevaciones del dren para los diferentes períodos de simulación y la ubicación de los mismos en los estratos acuíferos.

La condición de borde de tipo dren extrae agua del sistema acuífero cuando la carga hidráulica en el acuífero es mayor a la elevación fijada del dren, una vez que la carga del acuífero sea igual o menor a la elevación del dren, el dren deja de extraer agua del acuífero. El caudal extraído del acuífero por el dren es proporcional a la diferencia entre la carga del acuífero y la elevación fijada del dren. Además, el caudal extraído está condicionado por la conductancia del dren, la cual es un parámetro numérico que representa la resistencia del flujo entre el acuífero y el dren.

Para la simulación del drenaje del rajo minero con la condición de borde de dren, al igual que con la condición de borde de carga constante, cuando la elevación del dren se encuentra en el segundo estrato acuífero (tercer y cuarto período de simulación), es necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer estrato acuífero y en el caso de que la elevación del dren se encuentre en el tercer estrato (quinto período de simulación), es necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer y segundo estrato.

En el primer período de simulación se utiliza como condición de borde inicial, una carga hidráulica inicial igual a la cota superior del terreno, en el caso del modelo del caso hipotético “C” del drenaje del rajo minero, esta carga inicial tiene un valor de 1000 msnm. Para el segundo

período de simulación se utiliza como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del primer período de simulación. En el caso del tercer período de simulación, se utiliza como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del segundo período de simulación y así sucesivamente para el resto de los períodos de simulación.

**Tabla 4.21**  
**Valores de la Condición de Borde de Tipo Dren**

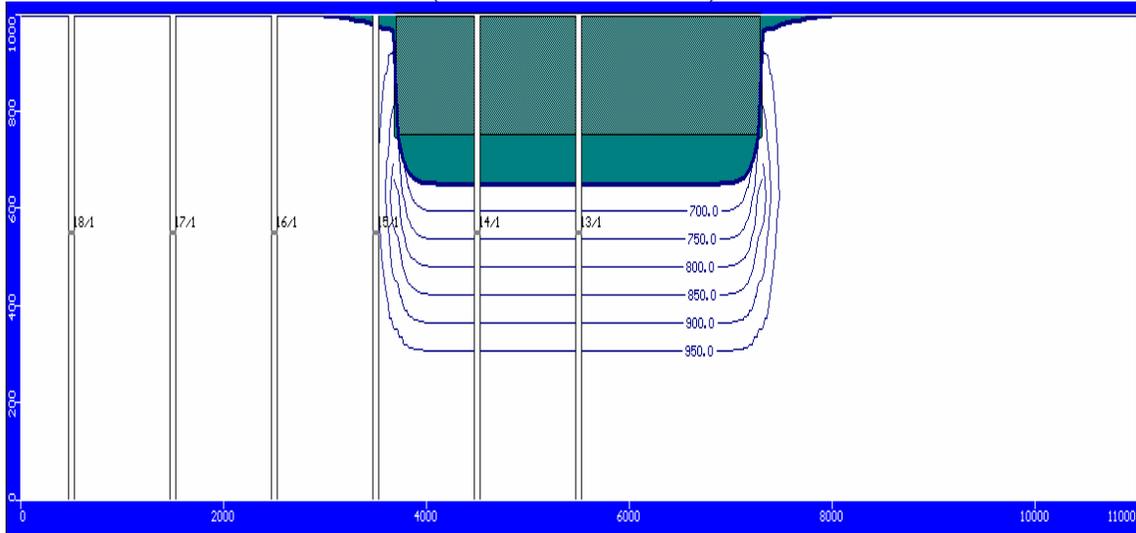
<b>Tiempo simulación</b>	<b>Elevación dren (m)</b>	<b>Ubicación en el estrato</b>
T <sub>1</sub> (1 año)	900	Primero
T <sub>2</sub> (5 años)	800	Primero
T <sub>3</sub> (10 años)	650	Segundo
T <sub>4</sub> (15 años)	550	Segundo
T <sub>5</sub> (20 años)	300	Tercero

**Resultados**

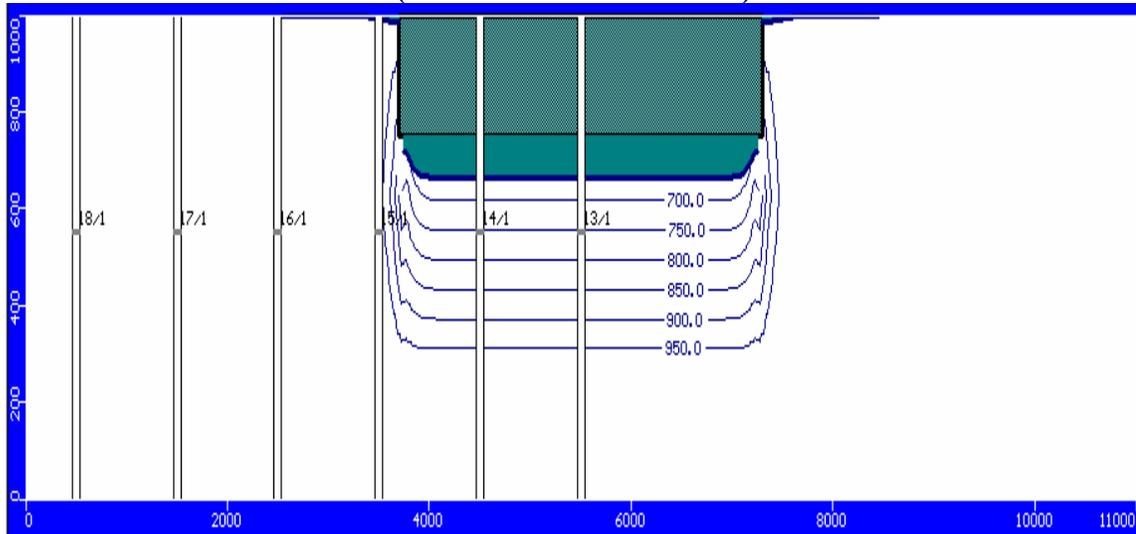
En las Figuras 4.34 y 4.35 se muestra un corte longitudinal realizado en el centro del modelo de simulación del caso hipotético “C”, donde se observa la distribución de los niveles de aguas subterráneas obtenidas para el tercer período de simulación para el drenaje del rajo minero, en este caso representado como una condición de borde de dren.

Como se mencionó anteriormente, en la mayor parte de las situaciones, la información necesaria para calcular la conductancia del dren no se encuentra disponible, siendo esta generalmente ajustada durante el proceso de calibración. Para la simulación del caso hipotético “C” del drenaje del rajo minero se utilizaron tres valores numéricos de conductancia de 0.1, 1.0 y 10 m<sup>2</sup>/d, de manera de poder analizar la sensibilidad que tiene este parámetro. Las Figuras que se presentan a continuación son los resultados obtenidos con la conductancia de 0.1 m<sup>2</sup>/d.

**Figura 4.32**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Dren**  
**(Visual MODFLOW)**



**Figura 4.33**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Dren**  
**(MODFLOW-SURFACT)**



En las Figuras 4.32 a 4.33 se observan que los resultados obtenidos con los softwares Visual MODFLOW y MODFLOW-SURFACT de la simulación del rajo minero con una condición de borde de tipo dren con una conductancia de  $0.1 \text{ m}^2/\text{d}$  difieren entre sí. Resultando el área de impacto del drenaje del rajo minero obtenida con el MODFLOW –SURFACT en el tercer período de simulación, al igual que en todos los períodos de simulación (ver Anexo Digital Figuras AX.27 a AX.36), menor al área del impacto del drenaje obtenido con el Visual MODFLOW. En los resultados obtenidos con las conductancias de 1 y  $10 \text{ m}^2/\text{d}$ , también se observa que el área impactada por el drenaje del rajo, es menor en el caso del MODFLOW – SURFACT.

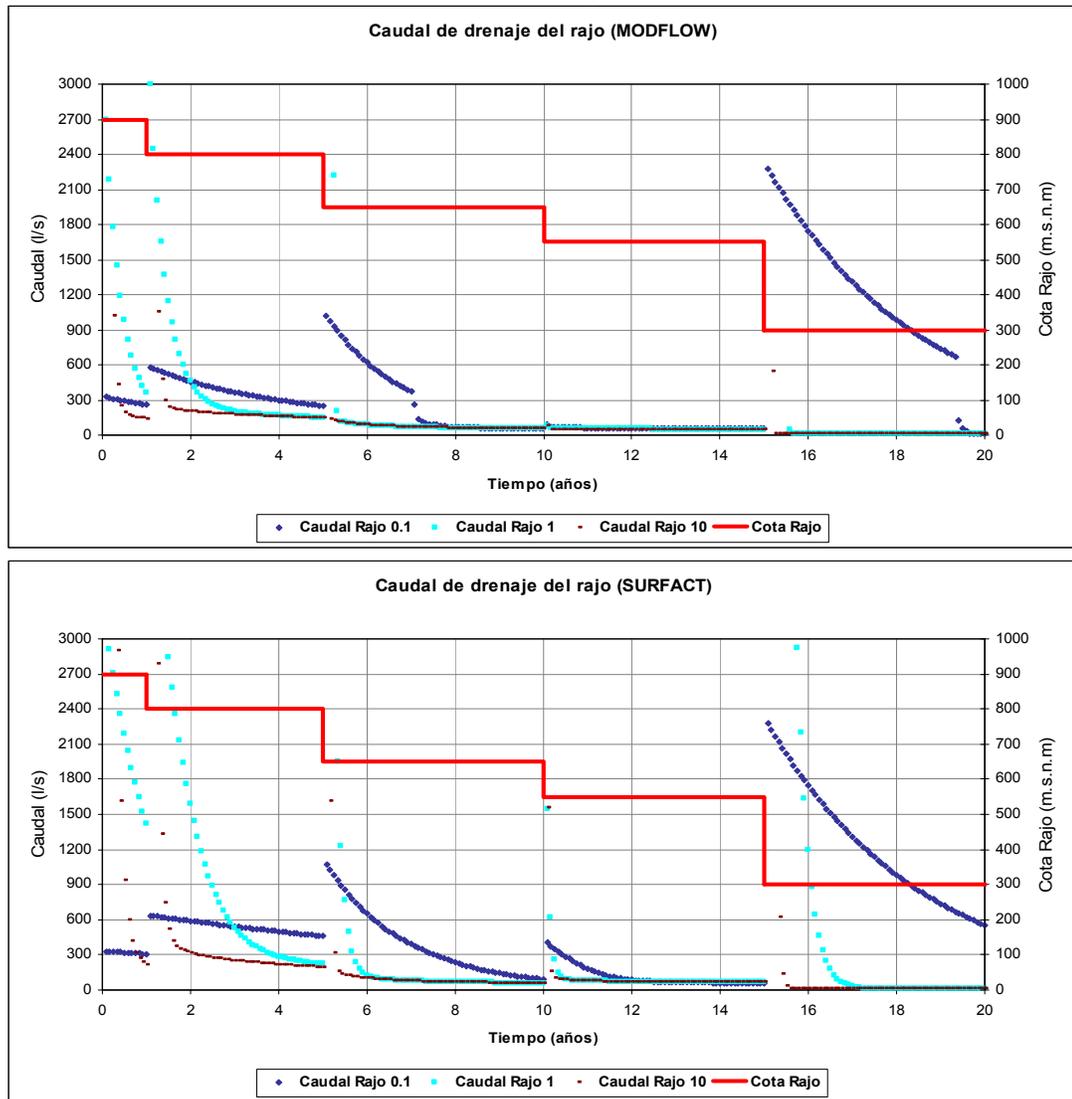
Se realizó un balance hídrico y se analizó específicamente el caudal de salida del rajo, obteniéndose mayores caudales de salida del rajo con el programa MODFLOW-SURFACT, a pesar, de como se puede observar en las figuras anteriores de la distribución de los niveles de agua subterránea, el área impactada es menor con el MODFLOW – SURFACT. Esto se debe a que ambos softwares abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas, como se mencionó anteriormente en el análisis de la condición de borde de carga constante.

El programa Visual MODFLOW utiliza la media armónica de las transmisibilidades de los bloques adyacentes para calcular la transmisibilidad en el bloque y el MODFLOW – SURFACT utiliza la media armónica de las conductividades hidráulicas saturadas, con la ponderación de un punto medio de las permeabilidades, evitando el secado de celdas durante las iteraciones y por ende siendo un procedimiento más apropiado y físicamente más consistente.

En la Figura 4.34 se observan los caudales de salida del rajo para las diferentes profundidades del rajo y para las diferentes conductancias utilizadas. En los casos de las conductancias de 1 y  $10 \text{ m}^2/\text{d}$ , no se observan los primeros caudales de salida del rajo en los cinco períodos de simulación en los gráficos, puesto que estos tienen un valor numérico muy superior al resto de los caudales (el mayor =  $67000 \text{ l/s}$ ) y al colocarlos en el gráfico no se puede apreciar adecuadamente el resto de los caudales.

La razón por la cual los primeros caudales de salida en los últimos cuatro tiempos de simulación son muy superiores en comparación al resto, se debe a que existe un salto en la elevación fijada del dren al pasar de un período de simulación a otro, siendo en todo los casos este salto superior o igual a 100 m. Además, en algunos períodos de simulación es necesario inactivar las celdas superiores del sector del rajo minero, lo cual puede producir las inconsistencias en los valores de los caudales al inicio del período de simulación.

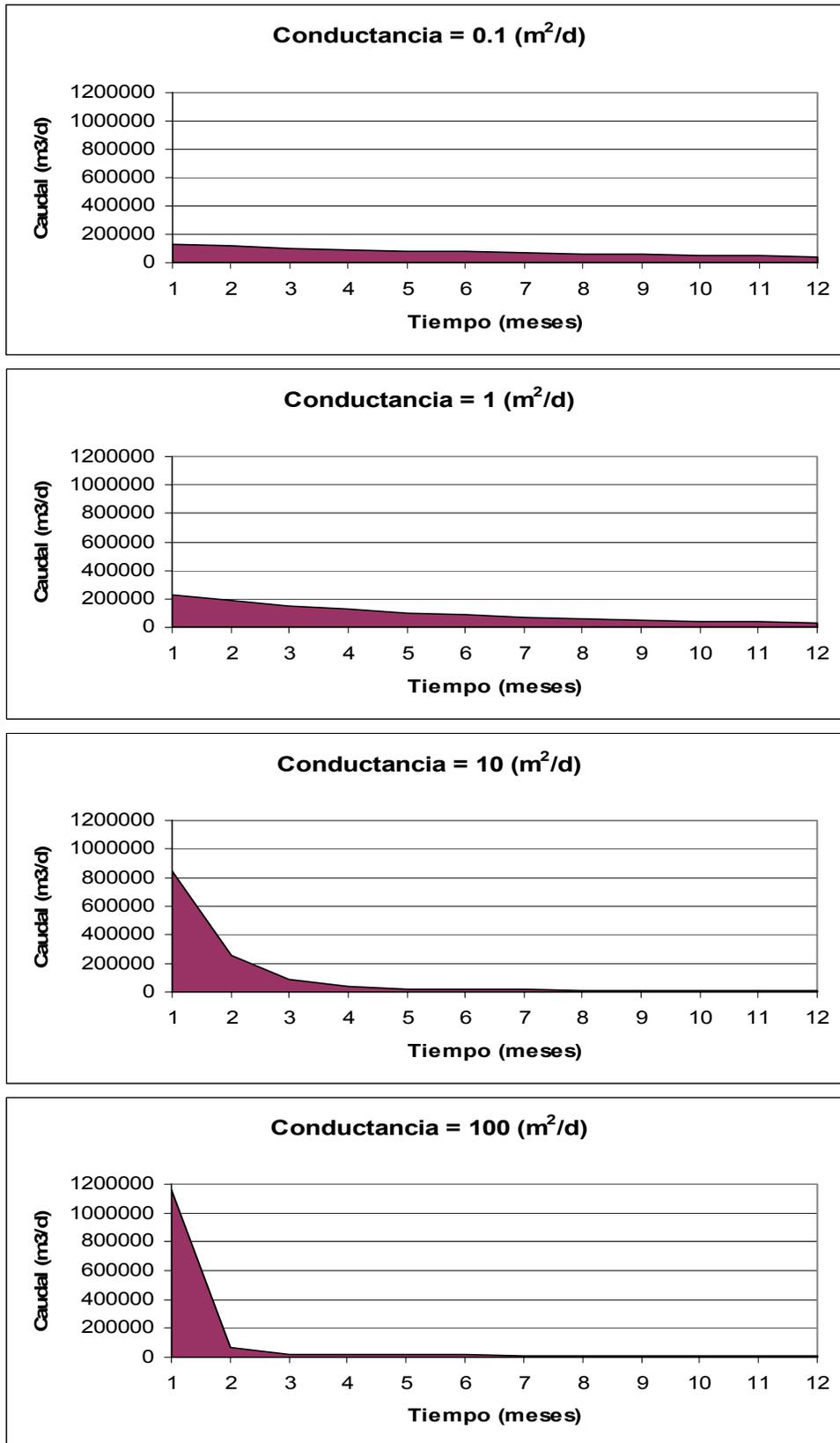
**Figura 4.34**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero – Dren**



Se analizó específicamente el caudal de salida del rajo para el primer período de simulación (1 año), debido a que este período no se encuentra afectado por los saltos en las elevaciones fijadas del dren y la inactivación de las celdas superiores del sector del rajo minero.

Para este análisis de sensibilidad se utilizaron conductancias del dren de diferentes valores (0.1, 1, 10 y 100 m<sup>2</sup>/d). En la Figura 4.35 se observan los caudales de salida del rajo en el primer período de simulación. La conductancia es un parámetro de la condición de borde de dren que describe la pérdida de carga entre el dren y el sistema de agua subterránea, es decir, condiciona la entrada de agua al dren. Como se observa en la Figura 4.35 con una conductancia pequeña el caudal de extracción del dren se mantiene relativamente constante durante el período de simulación. A medida que el valor de la conductancia va aumentando el caudal de extracción aumenta en los primeros meses de simulación y luego desciende abruptamente, el mayor caudal de extracción se debe a que las conductancias grandes oponen menor resistencia al paso del agua del acuífero hacia el dren, pero a medida que pasa el tiempo el factor que regula el paso del agua del acuífero hacia el dren es la conductividad hidráulica del acuífero.

**Figura 4.35**  
**Caudal de Salida del Rajo para Diferentes Conductancias**



Se calculó el volumen total de salida del rajo para el primer período de simulación con las diferentes conductancias, los resultados se presentan en la Tabla 4.22. Se observa que, a pesar, que los valores numéricos de las conductancias difieren bastante entre sí, presentan volúmenes de extracción de agua bastante similares. La razón de la similitud de los volúmenes de extracción, es que después de un cierto tiempo la extracción de agua a través del dren no está condicionada por la conductancia del dren, sino por la permeabilidad del material que conforma el acuífero.

**Tabla 4.22**  
**Volúmenes de Extracción de Agua para Diferentes Conductancias**

<b>Conductancia (m<sup>2</sup>/d)</b>	<b>Volumen de agua extraído (MMm<sup>3</sup>)</b>
0.1	21.6
1	23.5
10	22.7
100	22.9

Volumen prom. = 22.7 (MMm<sup>3</sup>)

Con los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad de la conductancia del dren, se puede concluir que en casos de estudios del impacto físico en las aguas subterráneas debido al drenaje de minas, utilizando la condición de borde de tipo dren en acuíferos con bajas conductividades hidráulicas y de un único estrato, el valor de la conductancia del dren es de poca relevancia en términos de impacto ocasionado por el drenaje. También se comprobó el área impactada por el drenaje obtenida con las diferentes conductancias, y estas áreas al igual que los volúmenes de extracción obtenidos, son bastantes similares.

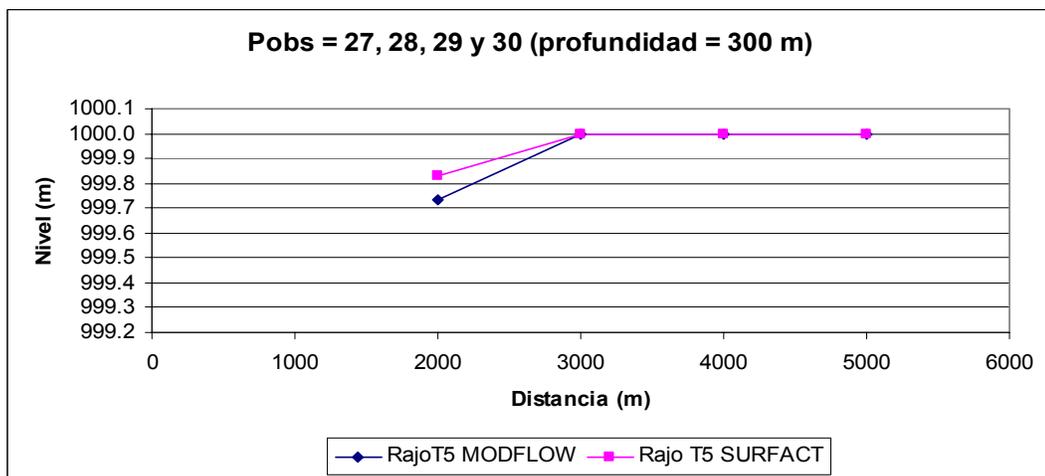
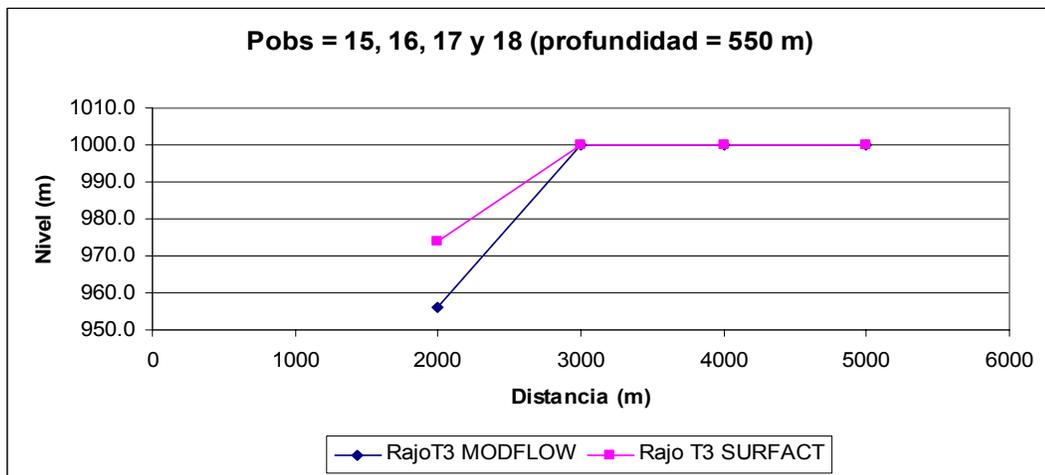
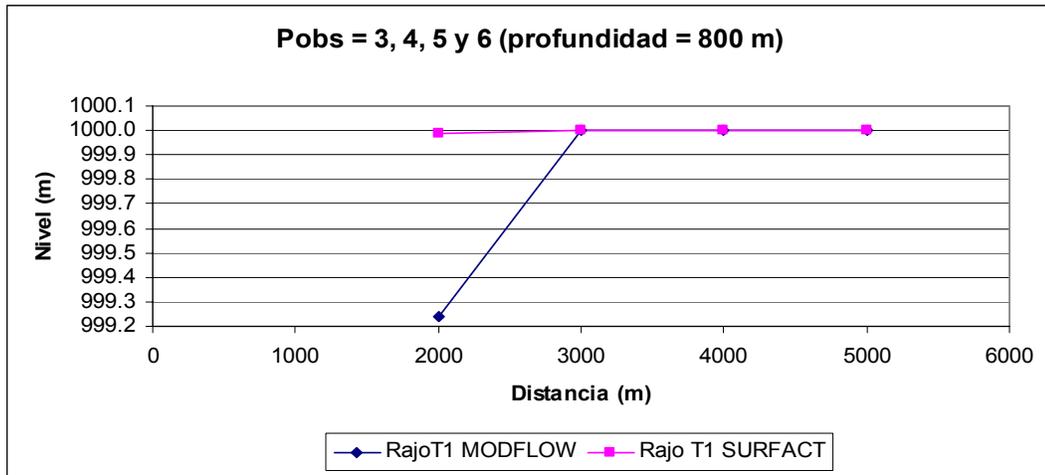
Si se utilizará el caudal de salida del rajo a través de la condición de borde de tipo dren para estudios de ingeniería, como por ejemplo, calcular el sistema de bombeo en base al caudal que es posible extraer mediante pozos de bombeo, las conductancias del dren si serían relevantes. Se podrían utilizar conductancias elevadas para conocer cual es el máximo caudal que es posible extraer del sistema acuífero.

En la Figura 4.36 se observan los niveles de agua subterránea cercanos al sector del drenaje del rajo minero para el primer, tercer y quinto período de simulación, éstos fueron obtenidos a través de pozos de observación, los cuales se encuentran a diferentes profundidades y distancias del sector de drenaje del rajo minero (Ver Tabla 4.19 y Figura 4.19).

Se observa que existe una diferencia en los niveles de agua subterránea calculados, obteniéndose valores de niveles mayores en los pozos de observación con el programa MODFLOW – SURFACT, concordando estos valores con los resultados mostrados anteriormente en los cortes longitudinales de la distribución de los niveles de agua subterránea.

Los niveles mayores indican que existe menor descenso en los resultados obtenidos con el MODFLOW - SURFACT, es decir, el área de impacto causado por el drenaje del rajo obtenido con el Visual MODFLOW es efectivamente mayor que al obtenido con el MODFLOW-SURFACT. Cabe notar, que el tercer período de simulación tiene diferente escala a los otros períodos, debido a que los valores de los niveles obtenidos no permiten el uso de la misma escala de graficación.

**Figura 4.36**  
**Niveles en Pozos de Observación – Dren**



Como se había mencionado anteriormente, para simular el drenaje del rajo minero con la condición de borde de tipo dren en el tercer, cuarto y quinto período de simulación, es necesario inactivar las celdas de los estratos superiores del sector del rajo. Al inactivar estas celdas no se puede reproducir el flujo de aguas subterráneas que fluye hacia el rajo por las paredes del mismo, como se observa en las figuras de los cortes longitudinales de la distribución de niveles de agua subterránea obtenidos con los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT (Figuras 4.32 y 4.33).

La incorporación del flujo de agua subterránea que fluye hacia el rajo por las paredes laterales del mismo es necesaria, puesto que el rajo actúa como un sumidero en el acuífero, hacia al cual fluye el agua debido al descenso provocado por el drenaje. Uno de los objetivos del análisis numérico es tratar de representar correctamente el drenaje del rajo minero, en otras palabras tratar de que la simulación se aproxime a lo que ocurre en la realidad.

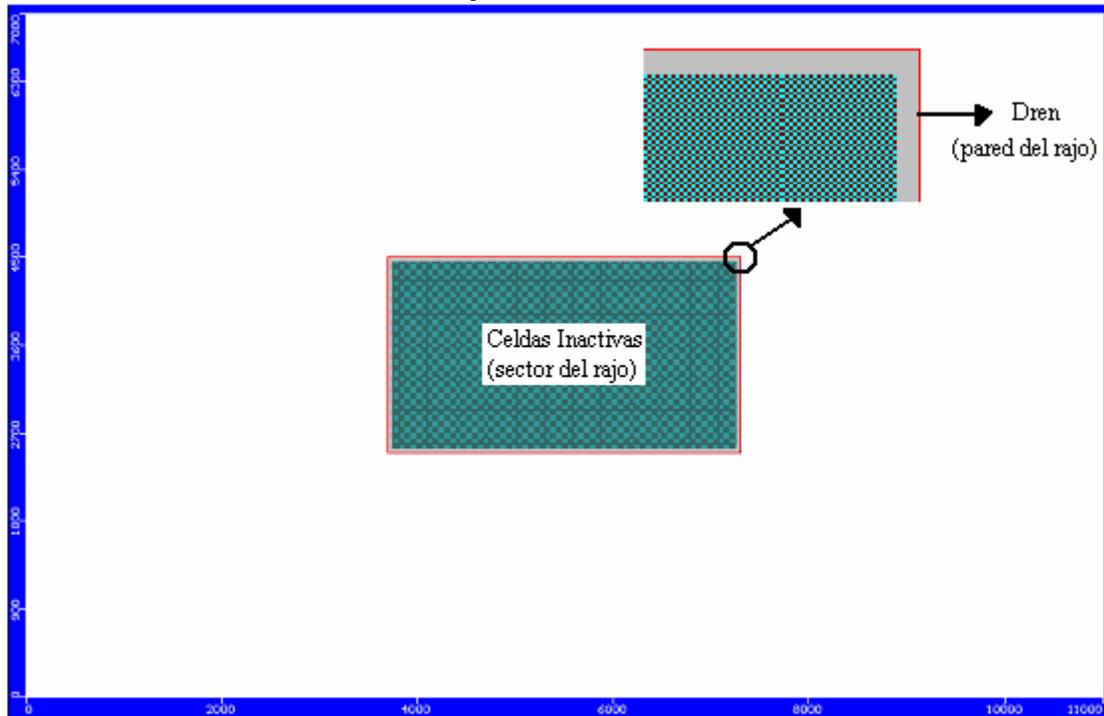
Se incorporó la filtración lateral en las paredes del rajo minero en el tercer, cuarto y quinto período de simulación, en los cuales se inactivaron las celdas de los estratos superiores del sector del rajo. La filtración lateral se la representó como una condición de borde de tipo dren colocada en los bordes del rajo como se observa en la Figura 4.37.

Como en el tercer y cuarto período de simulación, la cota del fondo del rajo minero se encuentra en el segundo estrato acuífero, se colocó una condición de borde de dren de 751 m (cota inferior del primer estrato + 1 m) alrededor del rajo en el primer estrato.

En el último período de simulación, en el cual el rajo se encuentra en el tercer estrato, se colocó una condición de borde de tipo dren alrededor del rajo en el primer y segundo estrato, el valor de las elevaciones del dren son 751 m y 501 m (cota inferior del segundo estrato + 1m) respectivamente.

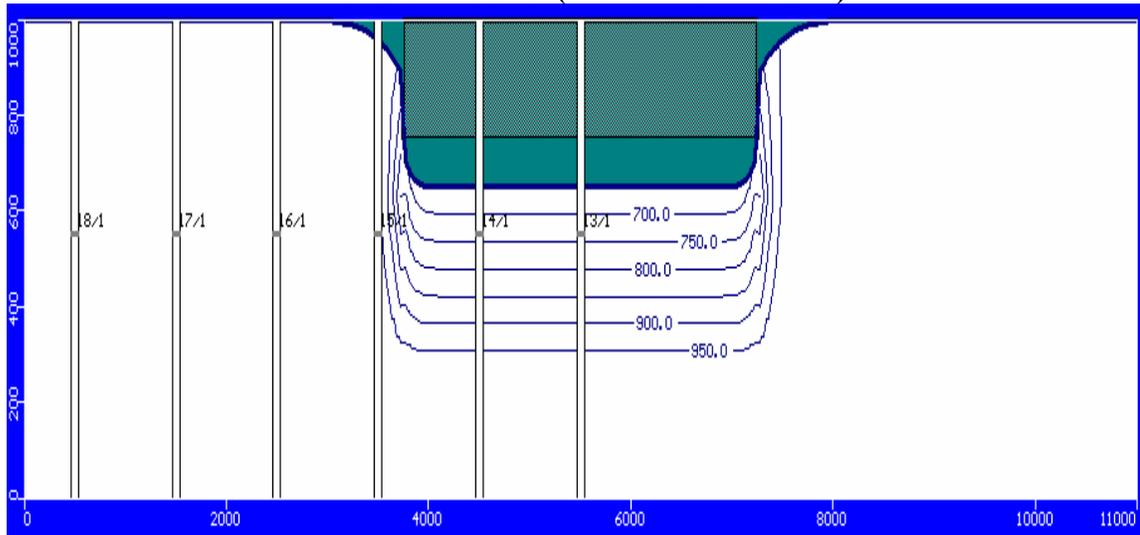
Para la simulación del caso hipotético “C” que incorpora la filtración lateral en el rajo se utilizaron las propiedades hidrogeológicas de la Tabla 4.3 , que son los mismos valores que se utilizaron para la simulación de los primeros resultados obtenidos con la condición de borde de dren mostradas en las Figuras 4.32 y 4.33.

**Figura 4.37**  
**Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral - Dren**

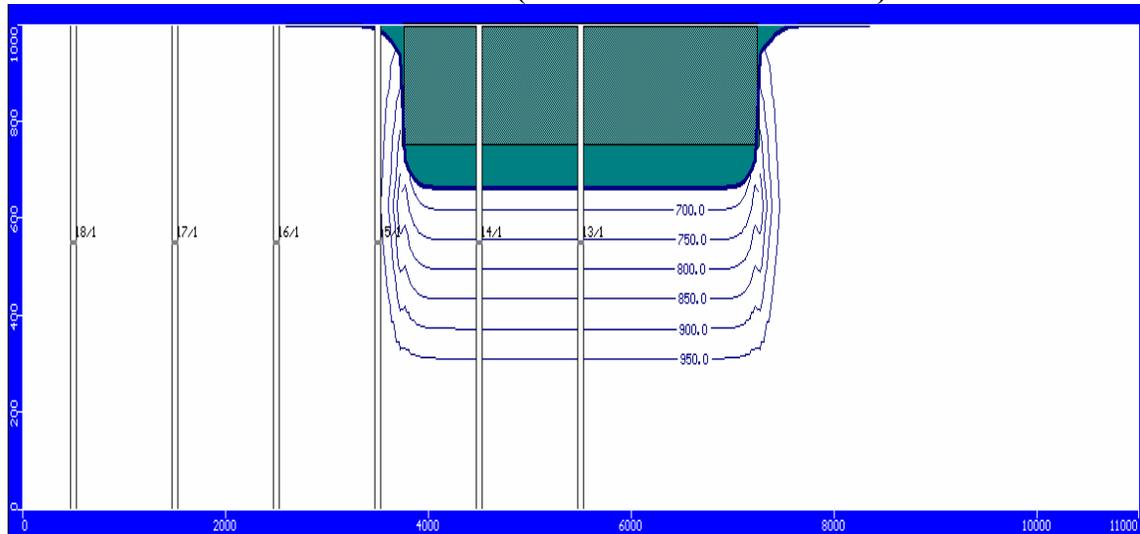


Las Figuras 4.38 y 4.39 muestran los resultados que se obtuvieron del drenaje de la mina a cielo abierto en la etapa de operación con los programas Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT de la incorporación de la filtración lateral en las paredes laterales del rajo en el tercer período de simulación.

**Figura 4.38**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Dren –**  
**Filtración Lateral (Visual MODFLOW)**



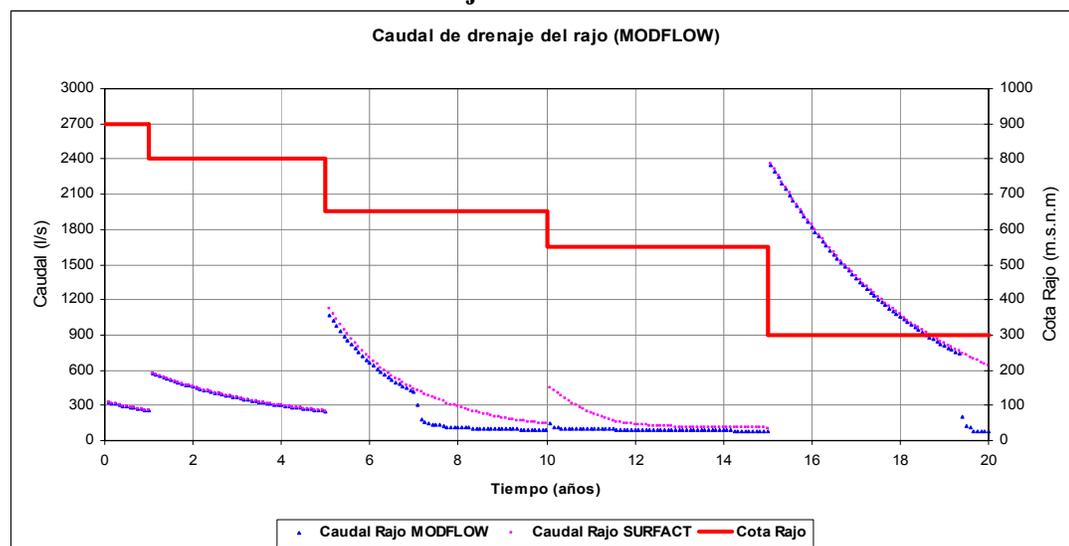
**Figura 4.39**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Dren –**  
**Filtración Lateral (MODFLOW - SURFACT)**



Las Figuras 4.38 y 4.39 muestran los resultados obtenidos de la incorporación de la filtración lateral del flujo subterráneo en el sector del rajo, al igual que en los resultados obtenidos de la simulación del rajo minero solo con la condición de borde de tipo dren (sin filtración lateral), el área de impacto del drenaje del rajo obtenido con el programa MODFLOW - SURFACT, es en todos los períodos de simulación menor al área del impacto del drenaje obtenido con el Visual MODFLOW.

Se realizó el balance hídrico del caudal de salida del rajo, incorporando la filtración lateral en las paredes del rajo y como era de esperarse se obtuvo un mayor caudal de salida del rajo, que el obtenido en la simulación del drenaje sin incorporar la filtración lateral. Se obtuvo un caudal de salida mayor en el caso del MODFLOW-SURFACT, esto se debe al método de cálculo físicamente más consistente que utiliza este programa para resolver las ecuaciones del flujo subterráneo. En la Figura 4.40 se observa los caudales de salida del rajo para las diferentes profundidades del rajo con una conductancia de 0.1 (m<sup>2</sup>/d).

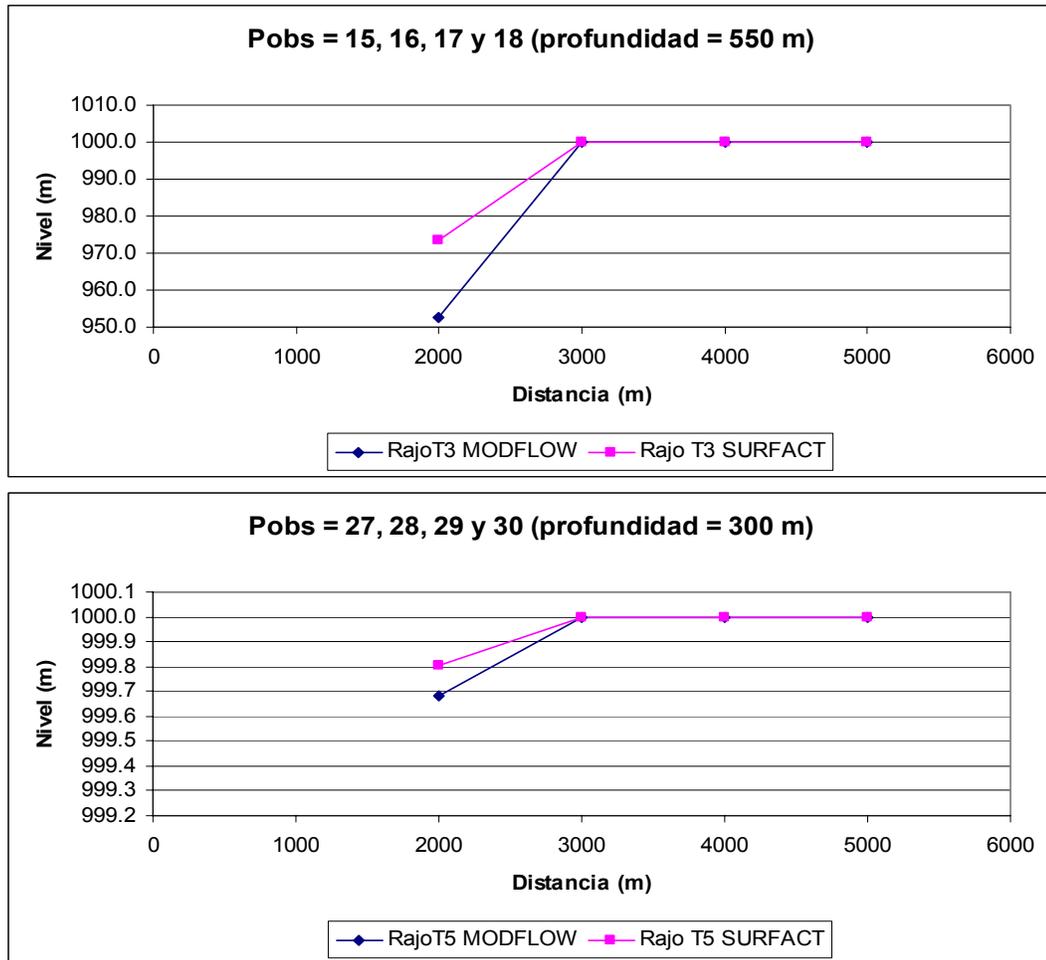
**Figura 4.40**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero Filtración Lateral – Dren**



En la Figura 4.41 se observa los niveles de agua subterránea obtenidos en el sector cercano al rajo minero para el tercer y quinto período de simulación. Los niveles se obtuvieron de pozos de observación a diferentes profundidades y distancias del sector de drenaje del rajo (Ver Tabla 4.19 y Figura 4.19). En la Figuras se observa que existe una leve diferencia entre los niveles obtenidos con la simulación del drenaje minero incluyendo la filtración lateral y los niveles obtenidos sin incluir la filtración lateral (Figuras 4.32 y 4.33).

Los resultados obtenidos con la incorporación de la filtración lateral en las paredes del rajo, se caracterizan por presentar niveles de agua subterránea menores a los obtenidos sin la incorporación de la filtración lateral. Los niveles menores representan el mayor descenso, concordando con los resultados obtenidos en los balances hídricos de caudales de salida del rajo. Al igual que en las simulaciones del rajo minero sin incluir la filtración lateral se obtuvieron valores de niveles mayores con el MODFLOW – SURFACT. Cabe notar, que el tercer y quinto período de simulación tienen diferentes escalas, debido a que los valores de los niveles obtenidos no permiten el uso de la misma escala de graficación.

**Figura 4.41**  
**Niveles en Pozos de Observación Filtración Lateral – Dren**



El caso hipotético “C” del drenaje de la mina a cielo abierto, con el cual se realizó el análisis de las diferentes condiciones de bordes que se pueden utilizar para representar el drenaje de un rajo minero, se caracteriza por estar constituido por tres estratos acuíferos. Las conductividades hidráulicas de los estratos no tienen el mismo valor numérico, disminuyendo este valor a medida que el estrato se encuentra más cercano a la roca madre o también conocida como roca sana, la cual se caracteriza por ser impermeable.

Como se explicó anteriormente, se usaron diferentes períodos de simulación para representar el crecimiento del rajo minero, por lo tanto, la condición de borde se va a encontrar en diferentes estratos del acuífero, dependiendo del período de simulación. En los estratos que tienen conductividades hidráulicas menores, el caudal de salida del rajo es menor, debido a que la conductividad hidráulica condiciona el movimiento del agua subterránea. Este fenómeno se lo aprecia claramente en los resultados mostrados de los caudales de salida del rajo minero para las conductancias de 0.1, 1 y 10 m<sup>2</sup>/d, exceptuado en quinto período de simulación con una conductancia de 0.1 m<sup>2</sup>/d.

A continuación, se muestran los caudales de salida del rajo minero para el caso hipotético “C” del drenaje de la mina a cielo abierto, pero en este caso se cambiaron las conductividades hidráulicas y los coeficientes de almacenamientos del acuífero, las porosidades se mantuvieron, puesto que

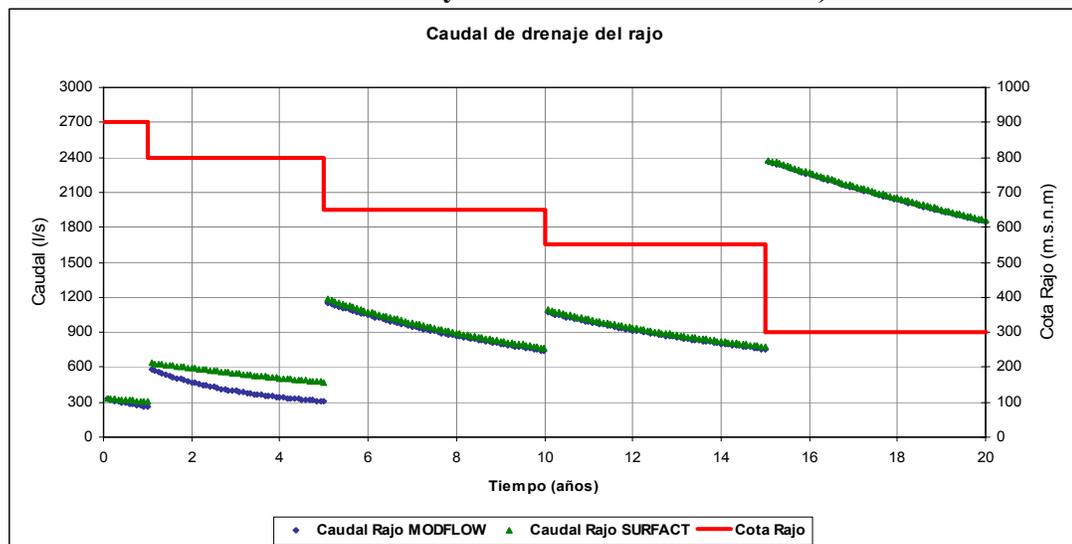
éstas son iguales para los tres estratos (Tabla 4.23). La conductancia utilizada en este caso es de  $0.1 \text{ m}^2/\text{d}$  y se incorporó la filtración lateral en las paredes laterales del rajo en el tercer, cuarto y quinto período de simulación.

En la Figura 4.42 se observan los caudales de salida del rajo obtenidas con el Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT con las nuevas propiedades hidrogeológicas. A medida que la profundidad del rajo aumenta, el caudal de salida de la condición de borde de tipo dren es mayor, debido a que es necesario extraer mayor cantidad de agua para mantener el sector del rajo minero seco y las propiedades hidrogeológicas del acuífero permiten ésta mayor extracción. Al igual que en todas las simulaciones del caso hipotético se obtuvieron mayores caudales de salida y menor área de impacto ocasionado por el drenaje con el programa MODFLOW – SURFACT.

**Tabla 4.23**  
**Nuevas Propiedades Hidrogeológicas de los Estratos**

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
<b>Kx (m/d)</b>	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
<b>Ky (m/d)</b>	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
<b>Kz (m/d)</b>	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
<b>Ss (1/m)</b>	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
<b>Sy</b>	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02
<b>Eff. Por.</b>	0.08	0.08	0.08
<b>Tot. Por.</b>	0.15	0.15	0.15

**Figura 4.42**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero con Conductividades Hidráulicas Iguales (Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT)**



El salto que existe en los caudales de salida entre el cuarto y quinto período de simulación, en todas las simulaciones realizadas con las condiciones de borde de carga constante y dren, se debe a que en el quinto período de simulación, las condiciones de borde se encuentran en el último estrato del acuífero, encontrándose este estrato cercano a la roca madre.

En el quinto período de simulación, el flujo del agua subterránea hacia las condiciones de borde es solamente horizontal, a diferencia de los otros períodos de simulación que el flujo hacia las

condiciones de borde, es tanto horizontal como vertical, como se observa en las figuras de la distribución de niveles de agua subterránea vistas en cortes longitudinales (ver Figuras AX.1 a AX.42 del Anexo Digital). Las líneas azules representan las equipotenciales, siendo el flujo del agua subterránea perpendicular a las equipotenciales.

La tendencia del caudal de extracción de la condición de borde de tipo dren depende principalmente de las propiedades hidrogeológicas del sistema acuífero como se observó en los análisis anteriormente realizados.

Para el caso hipotético “C” en que las conductividades hidráulicas y los coeficientes de almacenamiento iban disminuyendo a medida que se aproximaban a la roca sana, se observó que el caudal de salida iba decreciendo, a pesar del incremento de la profundidad del rajo. Las conductividades hidráulicas bajas oponen mayor resistencia al paso del agua a través del acuífero.

Cuando todos los estratos tenían las mismas propiedades hidrogeológicas, se observó que el caudal de salida del rajo se iba incrementando, a medida que el rajo se iba profundizando, al contrario de lo que ocurría en el primer caso.

El análisis de sensibilidad de la conductancia del dren demostró que para medios porosos no tradicionales de bajas conductividades hidráulicas (rocas fracturadas) y un único estrato acuífero, el valor numérico de la conductancia es poco relevante en estudios de impactos físicos en las aguas subterráneas ocasionados por el drenaje de minas. El caudal de extracción de agua a largo plazo es controlado por la permeabilidad del acuífero y no así por la conductancia del dren.

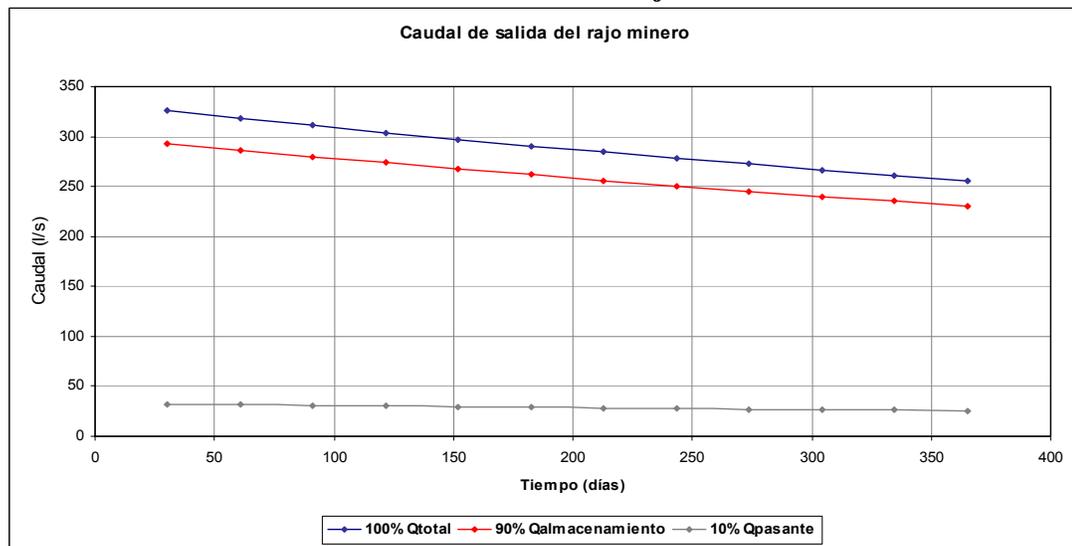
La diferencia que existe entre las condiciones de borde de carga constante y dren, es que la condición de borde de tipo dren limita la salida de agua a través de la conductancia, y la condición de borde de carga constante no tiene un límite para extraer agua del sistema acuífero.

La extracción de agua a través del dren se realiza de manera gradual, hasta que la carga en el acuífero sea menor a la elevación fijada del dren (cota de fondo del rajo), al contrario de la carga constante, que extrae agua desde el inicio de la simulación de la cota de fondo del rajo.

Cabe mencionar, que se realizó un balance de los caudales de salida del rajo del caso hipotético del drenaje del rajo minero para las condiciones de borde de tipo carga constante y dren. En el balance se pudo observar que aproximadamente un 90% del volumen total del agua subterránea extraída por ambas condiciones de borde corresponde al almacenamiento del acuífero, por lo que el 10% de agua restante corresponde al agua que fluye efectivamente hacia el rajo minero y debe ser extraída para hacer posible su construcción.

Los resultados fueron corroborados a través de un análisis realizado del caudal pasante por las paredes del rajo, en cual se obtuvo que el caudal pasante por las paredes del rajo es aproximadamente el 10% del caudal total de salida por las condiciones de borde de carga constante y dren. El análisis del caudal pasante se basó en los gradientes hidráulicos calculados por los programas de diferencias finitas utilizados. En la Figura 4.43 se representan los porcentajes de los caudales de salida obtenidos del balance de caudales realizado para la condición de borde de tipo dren para el primer período de simulación.

**Figura 4.43**  
**Caudales de Salida del Rajo Minero**



El alto porcentaje de volumen de agua de almacenamiento, se debe a que la evolución espacial del rajo minero se realiza de manera muy brusca en la modelación del drenaje del rajo, por ejemplo, para el primer período de simulación el rajo se inicia y finaliza con una profundidad de 100 m. En la realidad, el crecimiento espacial de los rajos se realiza gradualmente, este crecimiento no es factible de representar de manera tan gradual en los modelos de simulación. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que un alto porcentaje de los caudales de salida de las condiciones de borde que entregan los modelos de simulación corresponden al almacenamiento del acuífero y no al caudal real de salida por el rajo minero.

#### 4.4.2.3 Condición de borde de pozos de extracción (Caso hipotético “D”)

##### **Definición**

Es una herramienta que permite la extracción o inyección de agua del sistema acuífero. En el caso que se quiera simular la extracción de agua del acuífero se asigna un caudal negativo y en el caso de inyección, se asigna un caudal positivo. Los datos de entrada que se requieren son los siguientes:

- *Nombre del pozo*, nombre alfanumérico usado para identificar al pozo.
- *Coordenadas del pozo (x, y)*, estas coordenadas pueden estar referidas al sistema de coordenadas del modelo o al sistema mundial.
- *Ubicación de las rejillas*, altura inferior y superior, permite colocar varios tramos de rejillas (L).
- *Tiempo de extracción o inyección*, inicial y final (T).
- *Caudal de extracción o inyección*, cantidad de agua a ser extraída o inyectada al sistema a través del pozo ( $L^3/T$ ).

MODFLOW calcula los resultados de un pozo de bombeo en el centro de la celda, obteniéndose los mismos resultados con un pozo ubicado en la esquina de una celda o con un pozo ubicado exactamente al centro de la misma celda, es por eso que se recomienda refinar la grilla en las zonas con pozos, si es que estas fueran de interés.

El número máximo de pozos de extracción o de inyección está limitado solamente por la cantidad de memoria RAM disponible.

### ***Simulación del caso hipotético “D”***

El caso hipotético “C” que se utilizó para las simulaciones del drenaje de una mina a cielo abierto con las condiciones de borde de carga constante y dren, no fue factible utilizarlo para la simulación del drenaje del rajo minero a través de pozos de extracción. Las razones que imposibilitaron la simulación del caso hipotético “C” a través de pozos de bombeo, son los bajos valores numéricos de las conductividades hidráulicas del acuífero donde se encuentra el rajo minero. Las bajas conductividades se deben a que el caso hipotético “C” representa una zona de roca fracturada, la cual se caracteriza por tener muy bajas conductividades hidráulicas.

Un gran número de minas a cielo abierto de Chile, se encuentran en zonas de roca fracturada, es decir en medios porosos no tradicionales. Debido a ello es que las conductividades hidráulicas que se utilizaron en el caso hipotético “C” del drenaje del rajo son muy bajas, ya que todos los valores numéricos de las propiedades hidrogeológicas del caso hipotético “C” se tomaron de un caso real de una mina a cielo abierto.

Si el rajo minero se encuentra en un medio poroso tradicional, como por ejemplo, un acuífero de formación sedimentaria no consolidada, la simulación del drenaje del rajo minero a través de pozos de extracción es posible. Estos acuíferos se caracterizan por tener altas conductividades hidráulicas, siendo el flujo de aguas subterráneas a través de este medio poroso tradicional mucho más fluido que en el caso de los medios porosos no tradicionales.

Como se explicó anteriormente, en los resultados de la condición de borde de carga constante (punto 4.3.2.1), en el ejemplo de la extracción de aguas de un acuífero a través de un pozo de bombeo, cuando se explota aguas subterráneas por medio de un pozo de extracción, el descenso en cualquier punto del acuífero en un tiempo dado es directamente proporcional al caudal de bombeo e inversamente proporcional a la transmisibilidad ( $T = K \times b$ ; siendo K, la conductividad hidráulica y b, el espesor del acuífero) y al coeficiente de almacenamiento (S) del acuífero. En la Figura 4.23 se muestra la comparación de los conos de depresión ocasionados por la extracción de agua subterránea del acuífero. Los acuíferos que tienen baja transmisibilidad, al deprimirse desarrollan conos de depresión estrechos y profundos, mientras los acuíferos que tienen alta transmisibilidad desarrollan conos de depresión extensos y pocos profundos.

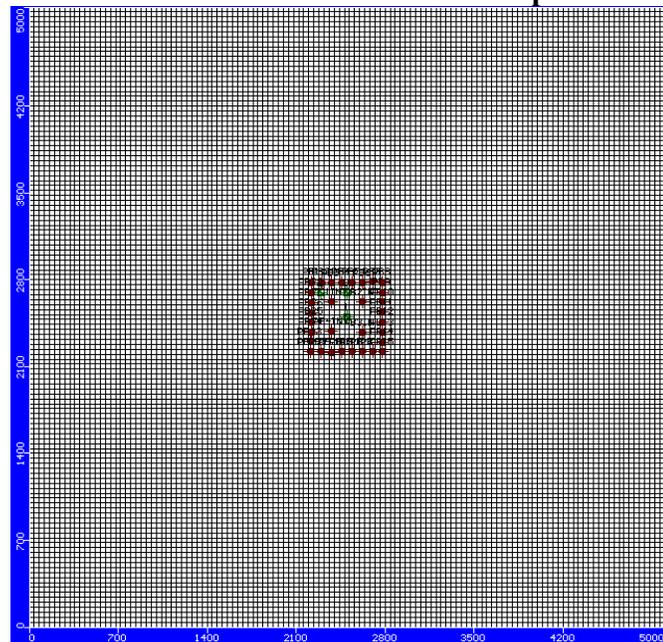
Por lo tanto, en el caso hipotético “C” del drenaje del rajo minero que tiene una conductividad hidráulica muy baja, al extraer agua subterránea a través de pozos de bombeos, se forman conos de depresión profundos y poco extensos. Siendo en estos casos el radio de influencia de un pozo de bombeo muy pequeño, es decir, ocasionan una depresión del nivel del agua subterránea muy localizada y haciendo necesaria la implementación de muchos pozos de bombeo para poder drenar un área pequeña. La dimensión del área del rajo minero del caso hipotético “C” es de 3600 m de largo por 2000 m de ancho, siendo esta área bastante extensa para ser simulado su drenaje a través de pozos de bombeo con los programas de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT. Cabe recalcar, que la simulación del drenaje de rajos mineros en acuíferos de muy baja permeabilidad y de áreas extensas no es factible realizarla a través de campo de pozos de bombeo por los argumentos anteriormente expuestos.

Como uno de los objetivos que persigue la presente tesis es comparar las diferentes herramientas que poseen los programas Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT para simular el

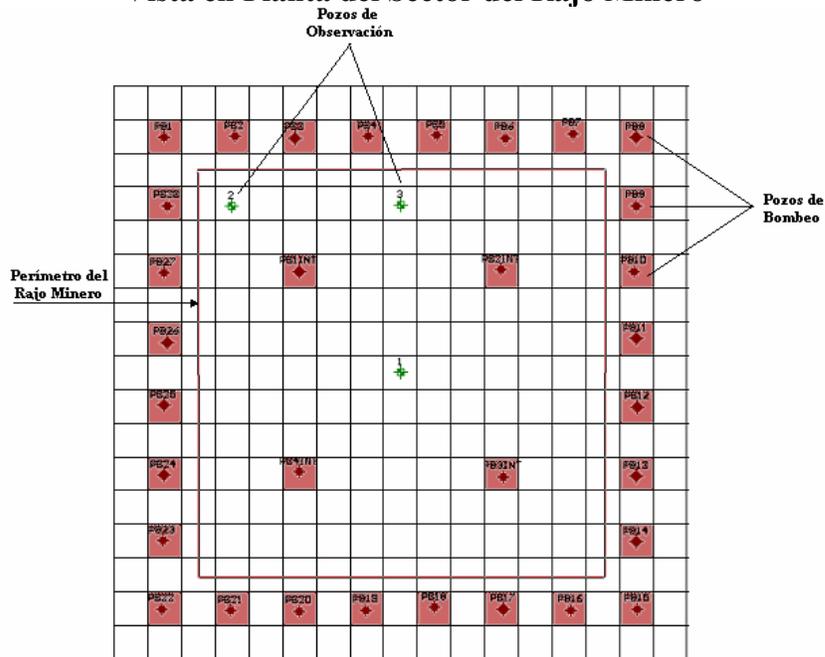
drenaje de una mina a cielo abierto, se decidió incorporar un nuevo caso hipotético del drenaje de un rajo minero que sea factible simular a través de pozos de bombeo. La descripción del caso hipotético “D” se presenta a continuación.

El dominio del caso hipotético “D” que representa el drenaje de un rajo minero, se describe a continuación a través de las Figuras 4.44 y 4.45, donde el área cuadrada de 5000 m x 5000 m representa el acuífero y en el centro de éste se encuentra el rajo minero. El rajo tiene un área de 500 m x 500 m, siendo éste considerablemente más pequeño que el rajo minero del caso hipotético “C”. En las Figuras también se observan los pozos de bombeo y los pozos de observación que se utilizaron en la simulación. La discretización espacial horizontal se la realizó con una grilla de diferencias finitas homogénea, la cual está conformada por celdas cuadradas de 40 x 40 metros, formando estas celdas un total de 125 filas y 125 columnas.

**Figura 4.44**  
**Vista en Planta del Dominio del Caso Hipotético “D”**

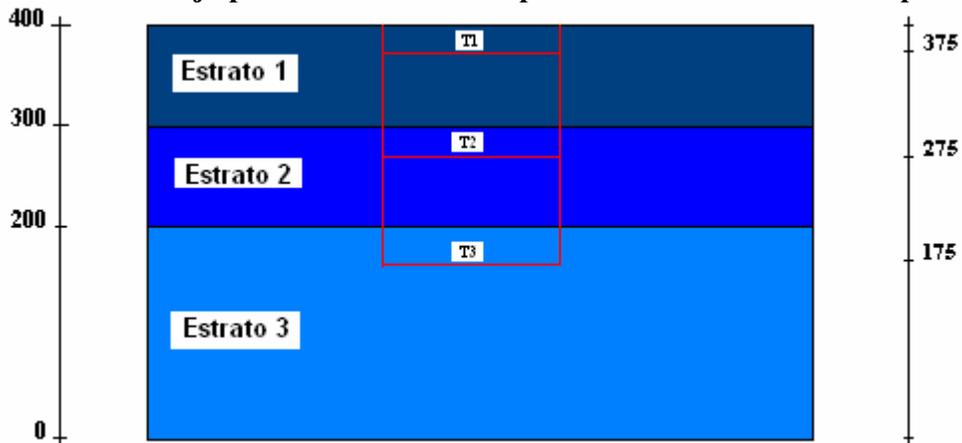


**Figura 4.45**  
**Vista en Planta del Sector del Rajo Minero**



La Figura 4.46 muestra una vista en corte del caso hipotético “D”, en la cual el acuífero tiene un espesor total de 400 m. La discretización espacial vertical esta compuesta por tres estratos acuíferos heterogéneos entre sí, tanto en sus propiedades hidrogeológicas como en sus espesores.

**Figura 4.46**  
**Vista en Corte del Rajo para Diferentes Tiempos de Simulación - Caso Hipotético “D”**



En cuanto a la discretización temporal se analizaron los niveles de agua subterránea en el acuífero para tres períodos de tiempo  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , como se muestra en la Figura 4.46. Donde  $t_1$  corresponde a un período de simulación de 1 año,  $t_2$  al período de simulación hasta el año 10 y  $t_3$  corresponde a un período de simulación hasta el año 20.

El caso hipotético “D” se caracteriza por ser un acuífero heterogéneo, compuesto por tres estratos acuíferos de diferentes propiedades hidrogeológicas entre sí, pero individualmente cada estrato acuífero se caracteriza por ser homogéneo e isotrópico. La simulación del caso hipotético “D”

que representa el drenaje del rajo minero se lo realizó en régimen transiente. Las propiedades de los diferentes estratos del acuífero se presentan la Tabla 4.24. Las conductividades hidráulicas utilizadas en este caso hipotético son bastante más altas que las utilizadas en el caso hipotético “C”.

**Tabla 4.24**  
**Propiedades Hidrogeológicas del los Estratos del Caso Hipotético “D”**

	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
<b>Kx (m/d)</b>	0.23	0.10	0.023
<b>Ky (m/d)</b>	0.23	0.10	0.023
<b>Kz (m/d)</b>	0.23	0.10	0.023
<b>Ss (1/m)</b>	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-05
<b>Sy</b>	1.00E-01	1.00E-04	1.00E-05
<b>Eff. Por.</b>	0.30	0.30	0.30
<b>Tot. Por.</b>	0.30	0.30	0.30
<b>B (m)</b>	100	100	200

Donde:

- Kx, Ky y Kz : conductividades hidráulicas en las direcciones x, y y z respectivamente.  
 Ss : coeficiente de almacenamiento específico.  
 Sy : coeficiente de capacidad específica.  
 Eff. Por. : porosidad efectiva.  
 Tot. Por. : porosidad total.

Para la simulación del caso hipotético “D” se utilizaron los programas Visual MODFLOW y MODFLOW - SURFACT, los valores de las propiedades hidrogeológicas de la Tabla 4.24 y como se mencionó anteriormente, se utilizaron tres periodos de simulación, para hacer posible la representación del crecimiento gradual del rajo (Ver Figura 4.46). En la Tabla 4.25 se presentan las profundidades del rajo minero para los diferentes periodos de simulación, la profundidad de las rejillas y los caudales de bombeo.

En los periodos de simulación se utilizaron diferentes caudales de extracción en los pozos de bombeo y diferentes profundidades de rejillas con el objetivo de producir el descenso de los niveles de agua subterránea necesarios para hacer posible la construcción del rajo. En total se utilizaron 32 pozos de bombeo como se observa en la Figura 4.45, de los cuales 28 pozos de bombeo se encuentran alrededor del rajo minero, conformando lo que denominaremos el “anillo externo”, el “anillo interno” está conformado por 4 pozos de bombeo que se encuentran dentro del sector del rajo.

**Tabla 4.25**  
**Tiempo de Simulación, Profundidad del Rajo y Caudales de Bombeo**

Tiempo simulación	Profundidad rajo (msnm)	Profundidad rejilla (msnm)	Caudal bombeo (m <sup>3</sup> /d)	
			Anillo externo	Anillo Interno
T1 (0-1 año)	375	380 - 320	250	300
T2 (1-10 años)	275	380 - 220	250	300
T3 (10-20 años)	175	380 - 120	270	300

Los pozos de bombeo permiten extraer agua del sistema acuífero, produciendo cada uno de los pozos un cono de depresión. El radio de influencia de los pozos de bombeo depende de las propiedades hidrogeológicas del acuífero, principalmente de la conductividad hidráulica y en menor grado del coeficiente de almacenamiento (ver Figura 4.23). La depresión de las aguas subterráneas en el sector del rajo se alcanza a través de la superposición de los conos de depresión de los diferentes pozos de bombeo.

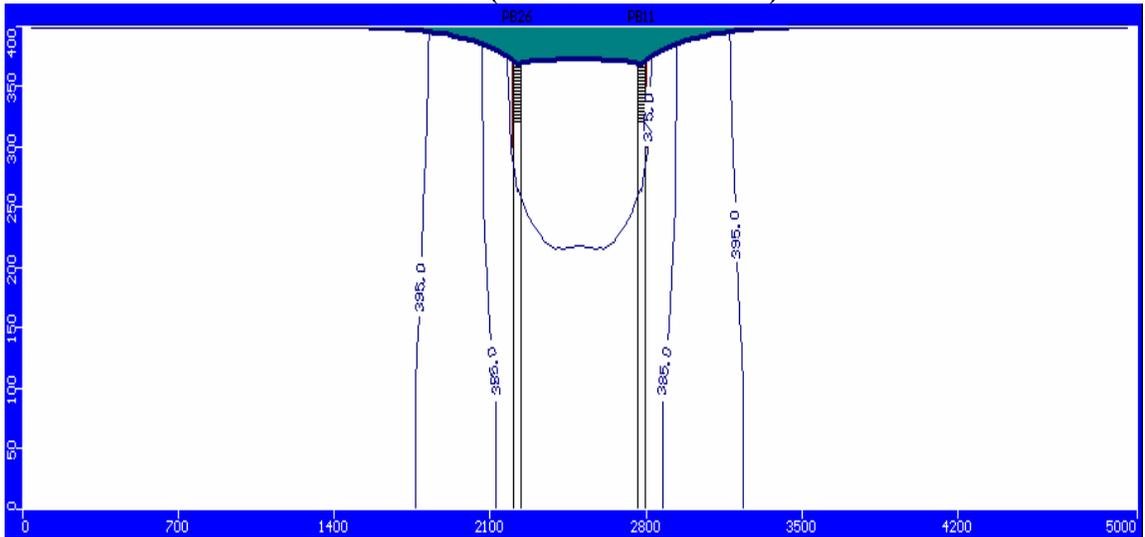
A diferencia de las anteriores condiciones de borde, para simular el drenaje del rajo minero a través de pozos de extracción, no es necesario inactivar las celdas de los estratos superiores del sector del rajo minero (segundo y tercer período de simulación), cuando las rejillas de los pozos de bombeo extraen agua de estratos inferiores.

En el primer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, una carga hidráulica inicial igual a la cota superior del terreno, en el caso hipotético “D” del drenaje del rajo minero, esta carga inicial tiene un valor de 400 msnm. Para el segundo período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del primer período de simulación y en el caso del tercer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del segundo período de simulación.

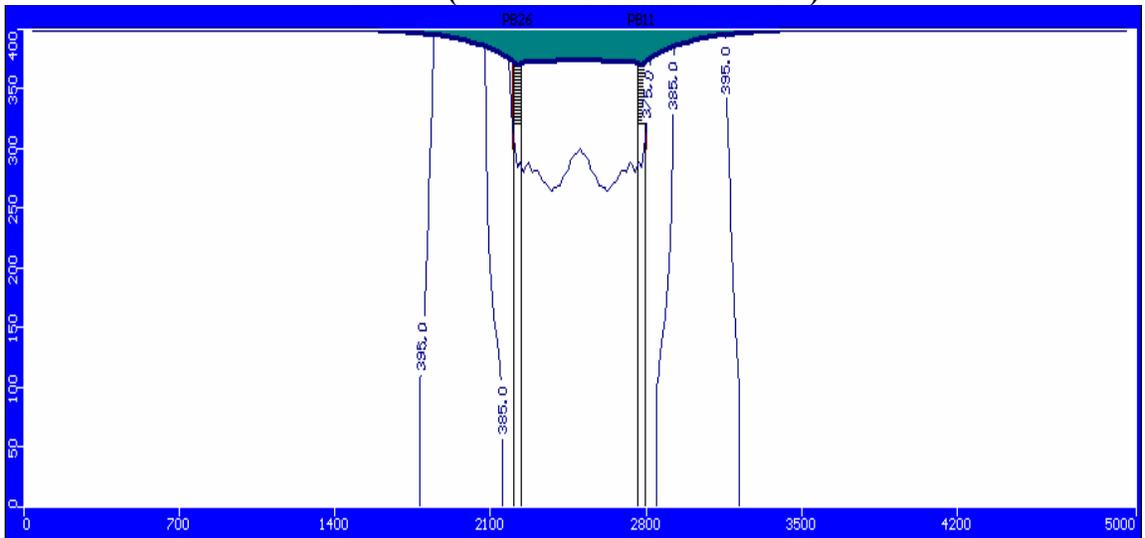
### ***Resultados***

En las Figuras 4.47 a 4.52 se presentan los resultados obtenidos de la simulación del caso hipotético “D” del drenaje del rajo minero a través de pozos de extracción con los programas de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT para los tres períodos de simulación.

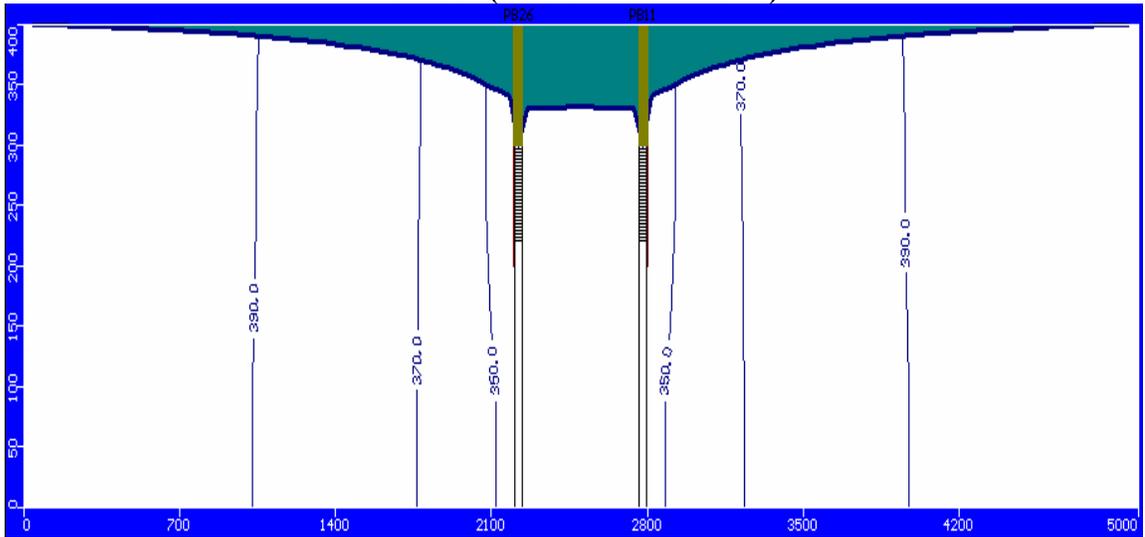
**Figura 4.47**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_1$  con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)**



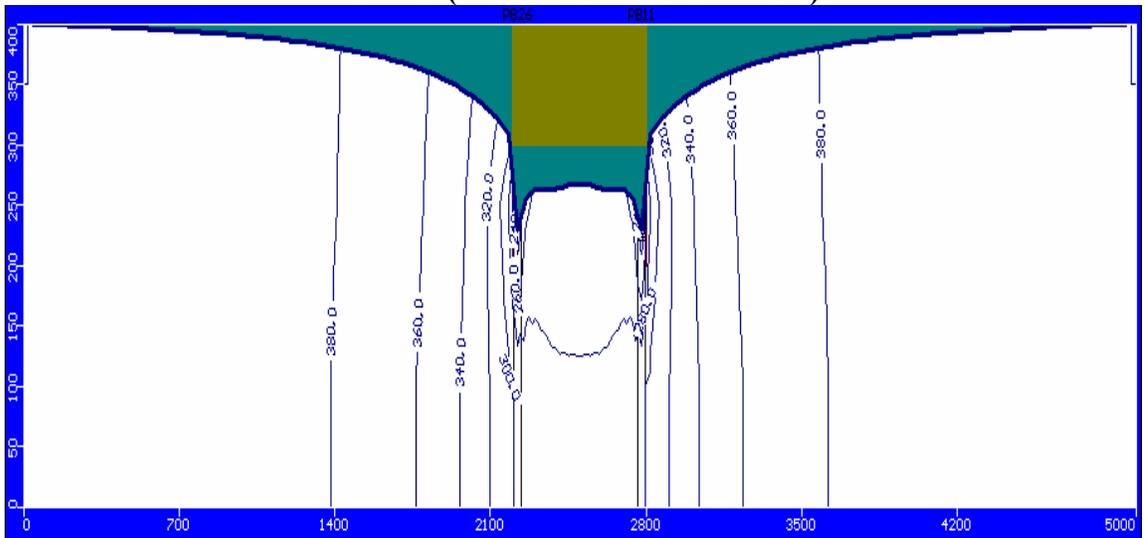
**Figura 4.48**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_1$  con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)**



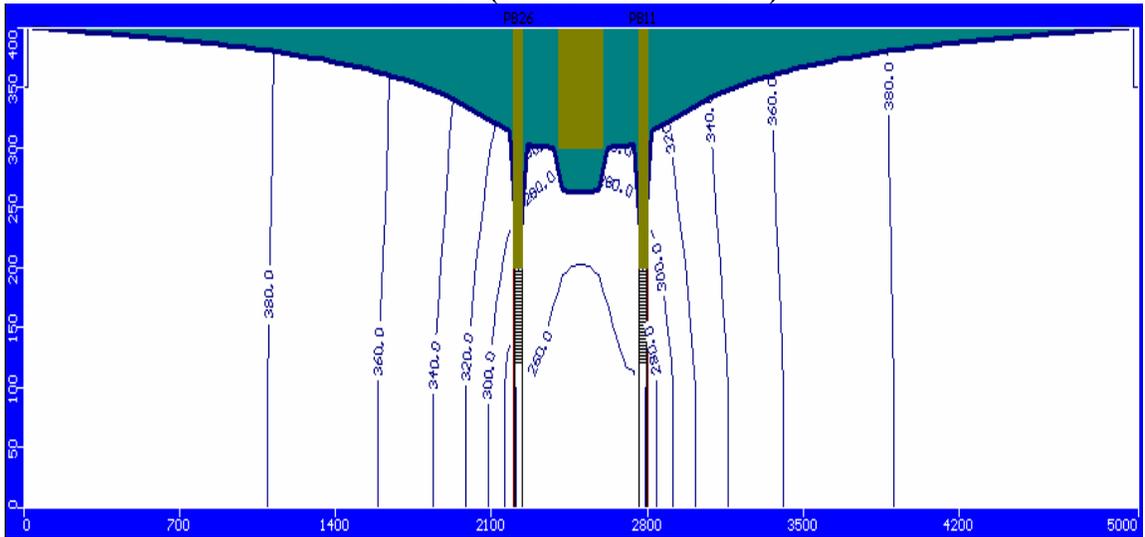
**Figura 4.49**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_2$  con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)**



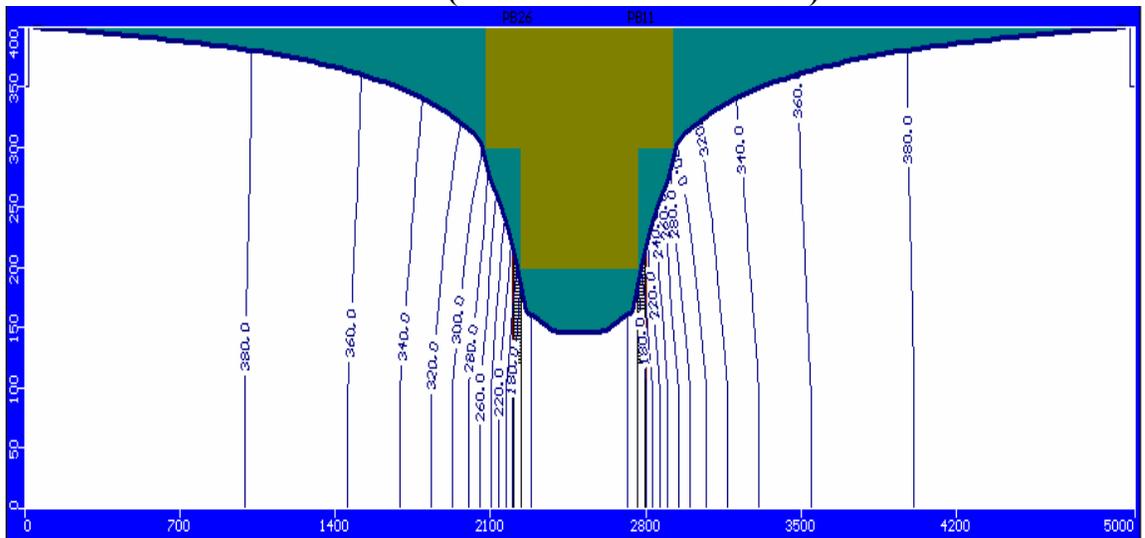
**Figura 4.50**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_2$  con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)**



**Figura 4.51**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Pozos de Bombeo (Visual MODFLOW)**



**Figura 4.52**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea Período  $t_3$  con Pozos de Bombeo (MODFLOW - SURFACT)**



En las Figuras 4.47 a 4.52 se observa que los resultados obtenidos con los programas Visual MODFLOW y MODFLOW-SURFACT de la simulación del rajo minero a través de pozos de bombeo difieren considerablemente entre sí, a pesar, de que en ambos casos se asignaron los mismos caudales de bombeo. El color oliva en las Figuras representa las celdas secas ocasionados por la sobreexplotación del bombeo.

Los resultados obtenidos con el Visual MODFLOW presentan menor descenso del nivel de las aguas subterráneas en el sector del rajo minero, no logrando la depresión de las mismas hasta el nivel necesario para hacer posible la construcción del rajo minero en el segundo y tercer período de simulación (los pozos de bombeo penetran más de un estrato acuífero).

En el caso del MODFLOW – SURFACT se alcanzan los niveles de depresión necesarios en los tres períodos de simulación, como se observa en la Tabla 4.26, donde se muestran los niveles de agua subterránea obtenidos en los pozos de observación con el Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT para los tres períodos de simulación.

**Tabla 4.26**  
**Niveles de Agua Subterránea en los Pozos de Observación**

Visual MODFLOW

Tiempo simulación	Niveles en Pozos Observación (msnm)		
	1	2	3
T1 (0-1 año)	372.73	371.42	371.34
T2 (1-10 años)	332.67	330.77	332.76
T3 (10-20 años)	255.92	261.75	258.45

MODFLOW – SURFACT

Tiempo simulación	Niveles en Pozos Observación (msnm)		
	1	2	3
T1 (0-1 año)	374.4	373.02	372.97
T2 (1-10 años)	267.77	270.84	263.22
T3 (10-20 años)	146.35	177.17	158.66

El programa Visual MODFLOW presenta problemas en sistemas acuíferos sobreexplotados por pozos de bombeo que penetran varios estratos acuíferos, debido a que representa los pozos de bombeo como pozos que penetran un solo estrato, esta representación no es correcta, porque no toma en cuenta la interconexión entre los estratos del pozo.

Uno de los problemas más significativo relacionado con esta aproximación, es que las celdas de la grilla son esencialmente desconectadas o aisladas cuando el nivel de agua desciende por debajo del fondo de la celda (por ejemplo, cuando la celda se seca). Esto reduce el caudal total bombeado de los pozos (como el caudal es distribuido inicialmente entre todas las celdas con rejillas) y uno o más pozos de bombeo tendrán menos del caudal total esperado.

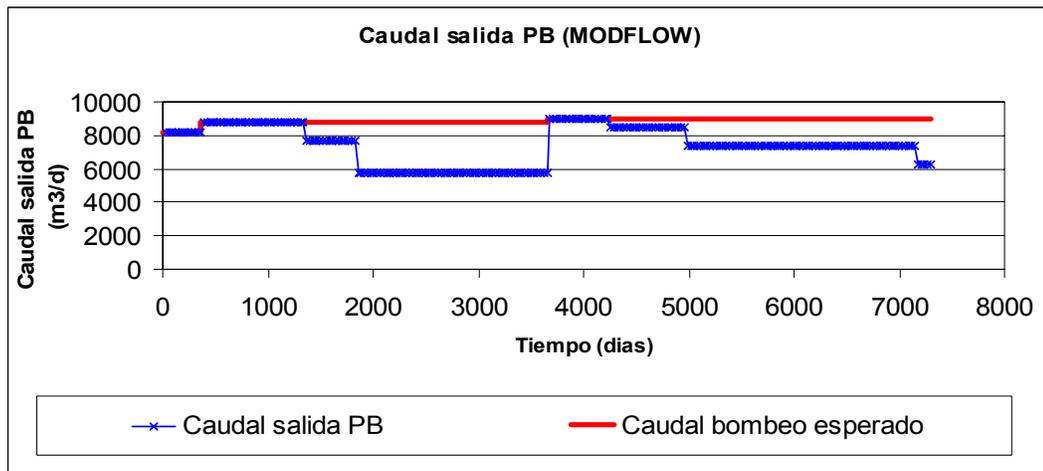
El programa MODFLOW – SURFACT soluciona este problema a través de la implementación de un nuevo paquete de pozo (FWL4), el cual simula los pozos de bombeo como tubos de fractura de alta conductividad, permitiendo la conexión de las celdas que están asociadas con los pozos.

En sistemas sobreexplotados, el caudal total de salida es automáticamente ajustado, cuando el nivel del agua en los pozos ha alcanzado el fondo del mismo. El MODFLOW-SURFACT redistribuye dinámicamente los caudales de bombeo a las restantes celdas activas, si una o más celdas se secan debido al bombeo. De este modo simula de manera más precisa los efectos reales de la sobreexplotación de un pozo que penetra varias capas.

Se realizó un análisis de los caudales de salida de los pozos de bombeo y se pudo comprobar, que efectivamente el programa MODFLOW – SURFACT redistribuye los caudales de bombeo a medida que las celdas del pozo se secan, como se puede observar en las Figuras 4.53 y 4.54. En las Figuras se encuentran graficados los caudales que se les asignó a los pozos de bombeo (Caudal bombeo esperado) y los caudales que están realmente extrayendo los pozos del sistema acuífero (Caudal salida PB). El programa MODFLOW – SURFACT mantiene el caudal de extracción asignado a los pozos de bombeo a lo largo del tiempo de los tres períodos de simulación. El Visual MODFLOW solo mantiene el caudal de extracción asignado a lo largo del primer período de simulación, en el segundo y tercer período de simulación solo lo mantiene al inicio de los períodos.

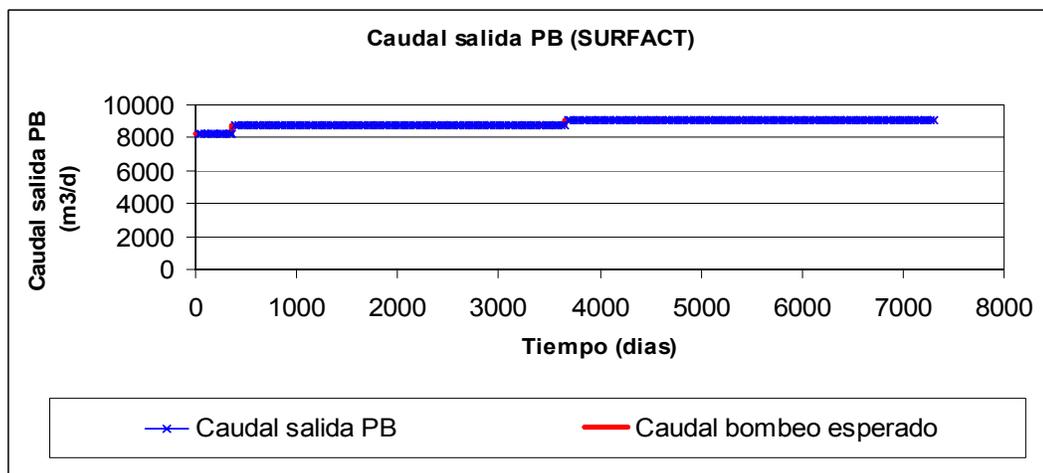
**Figura 4.53**

**Análisis de los Caudales de Salida de los Pozos de Bombeo del Visual MODFLOW**



**Figura 4.54**

**Análisis de los Caudales de Salida de los Pozos de Bombeo del MODFLOW - SURFACT**



## 5. APLICACIÓN A CASOS REALES

### 5.1 Introducción

En este capítulo se aplican, a modelos de simulación de casos reales de la minería chilena, los resultados obtenidos del análisis numérico de las condiciones de borde realizado en la modelación numérica de los casos hipotéticos. Como se mencionó anteriormente, la condición de borde de tipo dren es la que representa de manera más correcta el drenaje de un rajo minero. Los casos reales analizados en esta tesis corresponden a dos minas a cielo abierto, Andacollo y “LC”, más adelante se presenta una descripción detallada de la ubicación y características de estas minas.

El objetivo de la construcción de un modelo hidrogeológico principalmente es poder determinar las condiciones de flujos en el sistema acuífero. A continuación se presenta una breve descripción de las etapas necesarias para la elaboración de un modelo de simulación hidrogeológico:

*Primera etapa – Modelo conceptual:* Esta primera etapa está compuesta por tres pasos, los cuales permiten posteriormente elaborar un modelo robusto y representativo de la zona a modelar:

1. Identificar el problema y formular objetivos.
2. Definir el área de interés en base a revisión y recolección de datos disponibles.
3. Elaborar un modelo conceptual.

Se elabora en función de la información geológica, hidrogeológica, hidrológica e hidrogeoquímica disponible. El modelo conceptual debe incluir la extensión y límite del acuífero, la discretización vertical en función del número de estratos más adecuado, parámetros hidrogeológicos, pozos de bombeo e identificación de zonas y montos de descargas y recargas al sistema.

*Segunda etapa – Modelo numérico:* En la elaboración del modelo numérico se identifican cinco pasos relevantes:

1. Seleccionar un modelo matemático o numérico.
2. Idealizar el sistema físico y generar la grilla de modelación.
3. Incorporar propiedades hidrogeológicas y condiciones de borde.
4. Incorporar acciones externas (bombeos, descargas y recargas).
5. Calibración, validación y análisis de sensibilidad.

Es la elaboración del modelo de simulación numérico e incluye la incorporación en la estructura del software de los límites de la zona de modelación, la discretización horizontal y vertical, la distribución espacial de los parámetros hidrogeológicos, la asignación de los diferentes tipos de condiciones de borde y la incorporación de acciones externas al sistema modelado.

La segunda etapa se concluye con la calibración y validación del modelo numérico, para la cual es necesario seleccionar períodos de tiempos que cuenten con información suficiente. Para verificar la consistencia de los resultados entregados por el modelo de simulación, se debe realizar un análisis de sensibilidad y un balance hídrico. Este último, con el fin de comparar los resultados del balance con las estimaciones realizadas en los estudios hidrológicos e hidrogeológicos.

*Tercera etapa – Operación del modelo:* Es la etapa final en la construcción de un modelo hidrogeológico y comprende dos pasos principales:

1. Operación del modelo
2. Postauditoría

La operación del modelo consiste en plantear posibles escenarios futuros de acuerdo a la realidad existente y proyecciones de demandas y ofertas de los recursos hídricos.

La postauditoría implica el desarrollo de sistemas de monitoreos que permitan evaluar la eficiencia predictiva del modelo de simulación en plazos de 5 a 10 años.

Cabe resaltar, que durante el desarrollo de las etapas del modelo de simulación hidrogeológico es posible que surjan elementos que induzcan a la modificación de las etapas previamente desarrolladas.

## **5.2 Caso mina Andacollo**

### **5.2.1 Descripción general de la zona**

La cuenca de Andacollo, donde se encuentra ubicada la ciudad del mismo nombre, se ubica en la Provincia de Coquimbo, a 37 km en línea recta al S.E. de la ciudad de La Serena y a 30 km del Océano Pacífico.

Andacollo es una ciudad esencialmente minera y desarrollada a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, en función de la explotación de minerales de cobre y oro que se ha mantenido hasta la actualidad.

La IV Región, donde se ubica la cuenca, corresponde a un dominio semi-árido que marca una zona de transición entre el clima desértico de la zona norte y el clima mediterráneo de la zona centro-sur.

La precipitación media anual, comprendida entre los años 1963 y 1997, en el sector de estudio es del orden de 139.2 mm, y se concentra entre los meses de mayo a agosto. La temperatura media anual es de 18.8 °C, con valores extremos de 32.1 °C medido en diciembre y de -1.5 °C medido en agosto.

La cuenca de Andacollo encierra una hoya hidrográfica de aproximadamente 43 km<sup>2</sup> de superficie, su descarga natural se encuentra en el extremo noreste de ella, por la quebrada Andacollo. Esta última escurre en dirección este para descargar en la quebrada El Arrayán, la que a su vez es afluente del río Elqui.

La quebrada Andacollo es el principal curso de agua de la cuenca del mismo nombre. El drenaje de la cuenca de Andacollo es funcional sólo cuando llueve o por efecto del agua bombeada de las explotaciones mineras. El drenaje de la hoya es de tipo dendrítico, convergente hacia la quebrada Andacollo y formada por numerosas quebradas afluentes que se encuentran secas la mayor parte del año. Estas quebradas son de corto desarrollo, poco profundas, de pendientes relativamente empinadas de 2.5 a 5.0% y con tendencia a provocar escurrimientos torrenciales o de tipo

aluvionales si las precipitaciones son muy intensas. El escurrimiento encausado es de régimen temporal y solo se manifiesta en períodos de lluvia.

#### *5.2.1.1 Geología y geomorfología*

Desde el punto de vista geomorfológico, la región de Andacollo está ubicada en el Norte Chico, más allá del borde oriental de la Cordillera de la Costa de la región de Coquimbo. Ocupa una posición extrema en el límite occidental del monoclinado de rocas mesozoicas que constituye la estructura geológica de la parte central del Norte Chico, en el perímetro Vicuña/Ovalle.

La región de Andacollo forma parte de una pequeña cuenca tributaria de la hoya hidrográfica del río Elqui, que se sitúa en el interfluvio Elqui/Hurtado y está limitada por una serie de cimas de altura superior a 1000 m. Si se consideran las cotas de las partes bajas del relieve de la zona, el área de Andacollo ocuparía la franja situada entre las cotas 500 y 1000 m.

La mayor extensión de afloramientos de la cuenca de Andacollo lo constituyen rocas estratificadas. En general, ellas corresponden a andesitas en sus variedades de lavas, lavas brechosas y brechas, con intercalaciones menores de traquitas, ignimbritas y brechas sedimentarias.

Desde el punto de vista geológico, la secuencia correspondería al miembro 1 de la Formación Quebrada Marquesa de edad aptiana-albiana. Sobre el acantilado que limita la cuenca por el oeste, la secuencia anterior está sobreyaciendo a la Formación Arqueros y al este del Portezuelo Pichilingo, esta serie está en contacto con areniscas rojas, andesitas amigdaloides y areniscas amarillas que distinguen el paso del miembro 1 al miembro 2 de la Formación Quebrada Marquesa.

En general, esta secuencia estratigráfica forma un complejo volcánico-sedimentario con cambios de facies fuertes y rápidos, con niveles litológicos lenticulares que a veces hacen difícil seguir o comparar un determinado nivel o unidad.

En la cuenca de Andacollo se identifican tres tipos de cuerpos intrusivos: intrusivo de Tablalalume, Pórfido Andacollo y Diques que son responsables de una zona de alteración hidrotermal a la cual se asocia la mineralización cuprífera.

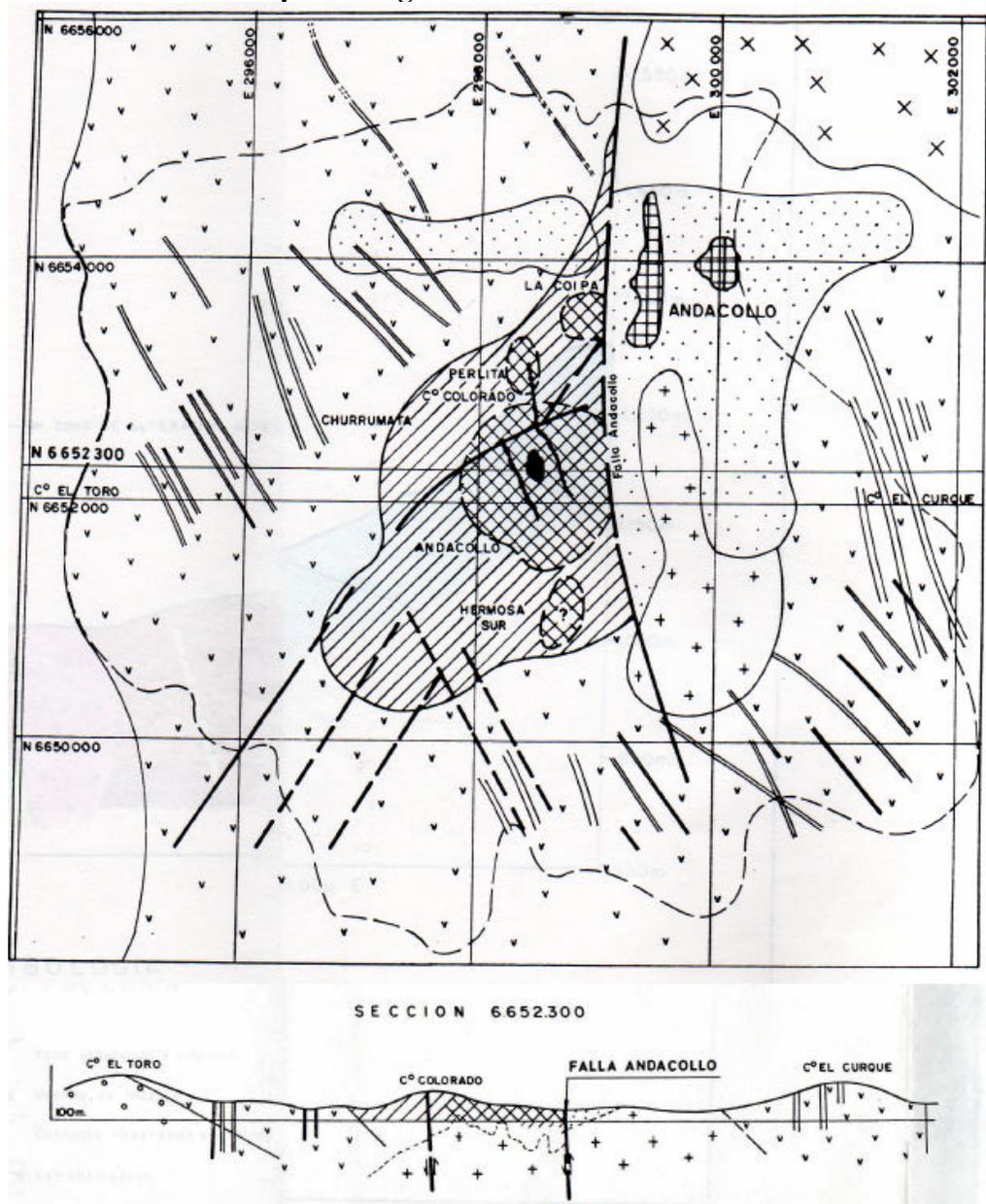
Los depósitos aluviales cubren el 20% del total de la superficie de la cuenca de Andacollo y están distribuidos hacia el centro y noreste de ella. En general, corresponden a gravas provenientes de la erosión de las rocas de la cuenca, principalmente andesitas en todas sus variedades a rocas intrusivas.

La potencia de los depósitos detríticos varía entre 1 y 10 m, pudiendo llegar hasta espesores de 20 a 30 m. Los depósitos no consolidados (Cuaternario) corresponden, principalmente a depósitos coluviales y en menor grado a depósitos aluviales de fondo de quebrada. Los depósitos coluviales corresponden a gravas pardas heterométricas, angulares a subangulares, generalmente disgregables, alcanzando un espesor máximo de 36 m. Los aluviales corresponden a material heterométrico y angulosos, que alcanzan un espesor máximo del orden de 2 m.

En el plano geológico de dominios estructurales se puede constatar la presencia de cuatro fallas mayores y otras tantas subordinadas. La presencia de fallas tiene una gran importancia sobre el

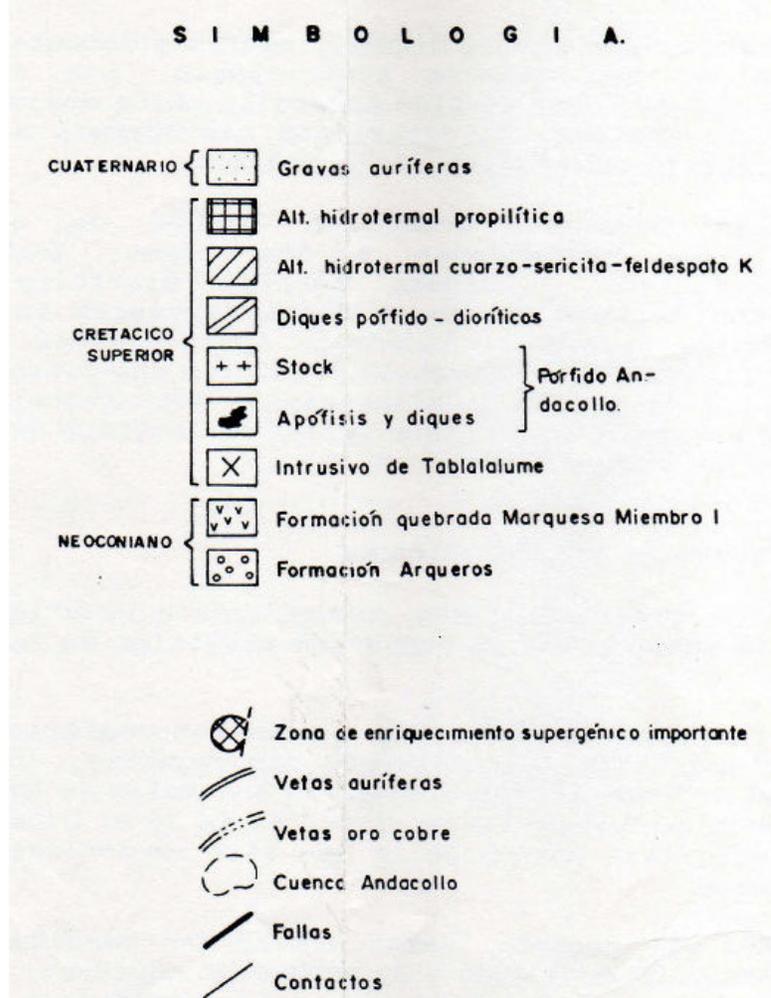
movimiento de las aguas subterráneas. Ello debido a que muchas veces las aguas se encuentran cubiertas con materiales arcillosos impermeables que le impiden el flujo. Por esta razón, pueden existir en la zona diversos acuíferos aislados unos de otro, producto de estas barreras impermeables. Dentro de las fallas más importantes se encuentra la Falla de Andacollo, la cual presenta una orientación prácticamente Norte-Sur y una inclinación casi vertical. Esta última separa al complejo minero en dos zonas de características diferentes. Otras fallas importantes son la Falla La Hermosa y el conjunto de fallas El Culebrón. En la Figura 5.1 se presenta un mapa geológico del sector de estudio.

**Figura 5.1**  
**Mapa Geológico del Sector de Andacollo**



Fuente: Estudio Hidrogeológico Proyecto Hipógeno

**Figura 5.1**  
**Mapa Geológico del Sector de Andacollo. Continuación.**



Fuente: Estudio Hidrogeológico Proyecto Hipógeno

### 5.2.1.2 Hidrogeología

En la cuenca de Andacollo se diferencian cuatro unidades con comportamiento hidrogeológico distinto. Estas unidades corresponden básicamente a: rocas fundamentales, depósitos aluviales, escombros de falda y suelos. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas unidades hidrogeológicas.

- **Rocas fundamentales:**

Las rocas fundamentales en si por su carácter masivo, no constituyen un acuífero, pero debido a su alto grado de fisuración, principalmente de la Unidad Andacollo, tienen capacidad de transportar cierta cantidad de agua a través de sus grietas.

La roca fundamental se encuentra usualmente cubierta por detritos y depósitos antrópicos generados por la actividad minera, pudiendo alcanzar un espesor que varia entre 1 y 10 m, pudiendo llegar a espesores de hasta 30 m. Esta cubierta puede constituir un acuífero ocasional, asociado a eventos de lluvia intensos durante los cuales esta capa se humedece y transfiere agua hacia la roca fundamental.

El fisuramiento de la roca fundamental es tan intenso que se puede denominar a esta unidad como Acuífero Andacollo, teniendo como características principales el ser un acuífero en rocas, que tienen grano de tamaño de bloques, de geometría angulosos y de mala selección. Este acuífero es el único que se presentaría en Andacollo y se extiende por toda la cuenca.

- ***Depósitos aluviales:***

Los depósitos aluviales presentan una mala selección y por el hecho de tener sus clastos muy grandes, angulosos, heterogéneos y con un cemento arcilloso, tienen una capacidad potencial limitada de constituir acuíferos. Además, el que estén topográficamente más altos, sumados a su baja permeabilidad, producen una recarga muy reducida o nula en los lugares donde se ubican.

- ***Escombros de Falda:***

Los escombros de falda también presentan sus clastos muy grandes, angulosos, y heterogéneos, lo que hace que tengan baja permeabilidad y su capacidad para constituir acuífero sea reducida. Su espesor es pequeño y muchas veces se presenta cementado y compacto.

Hidrogeológicamente esta unidad es casi impermeable; solamente en las zonas donde fue lavado presenta alguna permeabilidad, que sirve para que el agua escurra y así se infiltre hacia el acuífero de Andacollo.

- ***Suelos:***

En la cuenca de Andacollo se identifican dos tipos de suelos, arcillo-arenosos y maicillo. Estos suelos por su alto contenido de arcilla absorben agua pero no son capaces de transmitirla y por lo tanto su permeabilidad es baja, lo que los hace incapaces para constituir acuíferos, además de que su espesor es insignificante.

Para el estudio del flujo subterráneo es necesario conocer las propiedades hidrogeológicas del acuífero, entre las cuales destacan la conductividad hidráulica, transmisibilidad y el almacenamiento. Los valores de estas propiedades se obtuvieron mediante pruebas de bombeo, así como pruebas de descenso o infiltración en diversos piques y sondajes de exploración de la zona.

Las pruebas de infiltración realizadas por Robles (1975) y ARCADIS Geotécnica (2005) en diversos piques y sondajes de exploración permitieron determinar las conductividades hidráulicas de las diversas secciones o estratos analizados, las cuales van desde 0.02 m/d a 0.43 m/d (SIGA, 2006).

La transmisibilidad y el almacenamiento del acuífero fueron calculados mediante pruebas de bombeo realizadas por Robles (1975) en diversos piques, encontrándose para la primera propiedad hidrogeológica valores que van desde 4.21 m<sup>2</sup>/d a 62.98 m<sup>2</sup>/d. Los valores encontrados para el almacenamiento del acuífero oscilan entre 0.12% y 0.32 %. Se destaca el hecho de que el flujo subterráneo no depende del tipo de roca sino más bien del nivel de fracturamiento de ésta (SIGA, 2006).

El análisis del flujo subterráneo se basa en el plano de isofreáticas obtenidos de mediciones del nivel freático en piques y sondajes de la cuenca de Andacollo para dos años específicos, 1975 y 2005.

De las mediciones realizadas en terreno por Robles (1975) y ARCADIS Geotécnica (2005) se pudo concluir que en todos los piques o sondajes, en los cuales se midió el nivel freático, éste se encontró en la roca fundamental. Además, se pudo constatar el efecto significativo de las fallas que contienen material arcilloso impermeable del sector sobre los flujos subterráneos, esto se aprecia en la Falla de Andacollo, donde las líneas de flujo se desarrollan paralela a la falla.

La información disponible para la zona de Andacollo indica que la recarga de la cuenca está constituida básicamente por el proceso de infiltración de las precipitaciones locales. Se puede afirmar debido a la escasa vegetación existente en la cuenca, que las pérdidas por evapotranspiración son despreciables. De igual forma, al no existir escurrimientos permanentes, lagunas o tranques, las pérdidas por evaporación pueden también despreciarse.

Los escurrimientos superficiales se ven favorecidos por la baja permeabilidad de los suelos y las importantes pendientes de las quebradas que actúan como red de drenaje, de manera que el agua aportada por las precipitaciones escurre en un alto porcentaje hacia la quebrada de Andacollo y luego hacia el río Elqui.

El agua que no sale del sistema a través de los procesos recién señalados, se infiltra hacia los acuíferos, a través de grietas, fracturas, planos de contacto, escombros de falda y directamente por los piques existentes en Andacollo.

Considerando una infiltración del 10% de la precipitación anual se estimaron dos valores de caudales medios de recarga, 14 l/s y 19.3 l/s. La diferencia de los valores se debe, a que el segundo valor de recarga fue estimado con una precipitación anual que fue calculada con una serie de datos de mayor extensión.

La descarga del acuífero de Andacollo tiene una componente artificial y otra natural. La primera se debe al bombeo para proveer de agua a las actividades mineras y la segunda al drenaje subterráneo natural del acuífero hacia la quebrada de Andacollo, por donde drenan las aguas superficiales.

El gasto subterráneo hacia la quebrada de Andacollo sería aproximadamente de 0.2 l/min por metro lineal de la sección de descarga de la cuenca. Este valor corresponde a un gradiente hidráulico de 1% y a una transmisibilidad promedio de 30 m<sup>2</sup>/día. La sección de descarga se ubica bajo la cota 1100 msnm con una longitud de 2 km. Por lo tanto, la descarga de agua subterránea natural sería de unos 6 l/s.

Para el caso de la descarga artificial, se estimó el caudal bombeado a través de un balance hídrico de largo plazo, es decir, continuidad entre la recarga y la descarga. Suponiendo que la recarga se estimó en 14 l/s, se obtiene un caudal de descarga artificial de 8 l/s. Suponiendo que la descarga subterránea se ha mantenido constante y dado que la estimación actual de la infiltración es de 19 l/s, se tiene que la descarga artificial alcanzaría a 13 l/s.

## 5.2.2 Modelo conceptual adoptado para la cuenca de Andacollo

Considerando toda la información disponible de la cuenca de Andacollo se ha considerado adoptar un área de estudio que incluye toda la cuenca aportante desde el punto de vista

hidrológico, tomando como límites físicos del sistema subterráneo a las cumbres más altas o divisoria de aguas superficiales de la cuenca.

La información hidrogeológica indica que la cuenca de Andacollo está constituida principalmente por roca fundamental, la que se encuentra cubierta por detritos y depósitos antrópicos generados por la actividad minera. Esta cubierta puede constituir un acuífero ocasional, en eventos de lluvia intensos durante los cuales esta capa se humedece y transfiere agua hacia la roca fundamental.

A partir de la información anterior se ha adoptado un modelo conceptual, en el cual se tiene un medio acuífero en roca fracturada, el cual es asimilable a un acuífero tradicional (sedimentario), en el cual el flujo del agua subterránea se realiza a través de la matriz del suelo (poros). Lo anterior permite adoptar la ley de Darcy, con valores de conductividad hidráulica o transmisibilidad equivalentes a la de un medio poroso tradicional. Este enfoque permite el uso de herramientas matemáticas como Visual MODFLOW para desarrollar un modelo de simulación numérica que permita estudiar el comportamiento del flujo subterráneo.

El modelo conceptual de la cuenca de Andacollo considera una capa superior de acuífero fracturado de 150 a 200 m de espesor, ubicado sobre un basamento de roca sana con una conductividad equivalente aproximadamente de  $10^{-5}$  m/d. Las conductividades hidráulicas finales se determinaron por medio de un proceso de calibración, en el se utilizaron los niveles de agua subterránea medidos por Robles en el año 1975.

Para la recarga al sistema subterráneo se consideró un valor intermedio del balance hídrico anteriormente nombrado, la cual alcanza a 16 l/s. La calibración inicial del modelo se realizará con la información de los niveles de aguas subterráneas del año 1975 considerando una situación de régimen permanente y para la validación se utilizará la información del año 2005.

### 5.2.3 Modelo numérico de la cuenca de Andacollo

Para el modelo numérico de la cuenca de Andacollo se ha supuesto que el sistema de aguas subterráneas en la cuenca se puede asimilar a un medio poroso tradicional, lo que permite utilizar herramientas clásicas en la modelación de estos sistemas. En este caso particular se han utilizado los programas Visual MODFLOW 4.2 y MODFLOW – SURFACT 2.2.

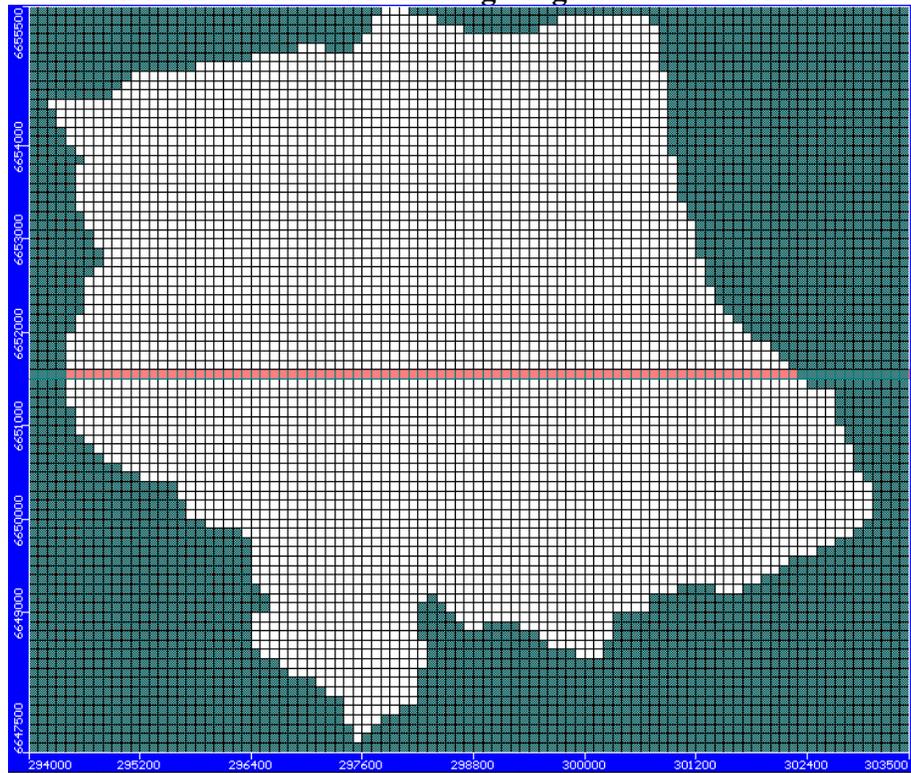
El objetivo de la modelación numérica del sistema hídrico subterráneo de la cuenca de Andacollo es analizar la evolución y el comportamiento de los niveles de agua subterránea en la cuenca debido al drenaje del rajo minero.

#### 5.2.3.1 Descripción del modelo numérico

El sistema acuífero de la cuenca de Andacollo se ha discretizado horizontalmente mediante una malla de diferencias finitas homogénea, la cual está conformada con celdas cuadradas de 100 m x 100 m. Los límites de la zona de modelación coinciden con las divisorias de aguas de las cuencas de drenaje superficial.

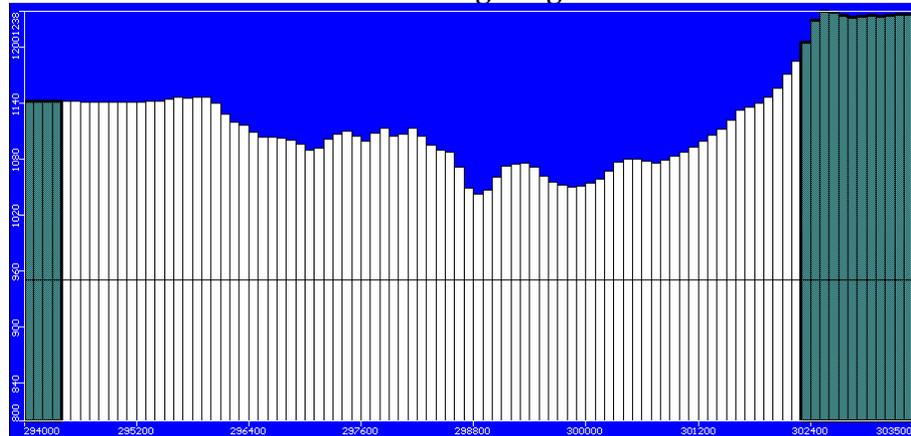
La Figura 5.2 muestra una vista en planta de la malla utilizada para el modelo numérico, la zona de color blanco corresponde al área del acuífero, es decir, celdas activas en las que es posible el flujo de aguas subterráneas, el resto de las celdas corresponden a celdas inactivas (condición de no flujo).

**Figura 5.2**  
**Vista en Planta del Modelo Hidrogeológico Cuenca de Andacollo**



La discretización espacial vertical está compuesta por dos estratos acuíferos, correspondiendo el primero de ellos a una roca fracturada con espesor variable entre 50 y 200 m y un estrato inferior de 150 m de espesor constituido por roca de baja conductividad hidráulica. La superficie del estrato 1 se obtuvo a partir de información topográfica. Los límites inferior del estrato 1 e inferior del estrato 2 fueron definidas arbitrariamente como un plano recto en las cotas 950 y 800 msnm, respectivamente. Para efectos de la modelación se ha supuesto que el estrato superior se comporta como acuífero libre, mientras que el estrato inferior estaría confinado. La Figura 5.4 muestra un corte vertical del acuífero, el cual se localiza en la posición indicada en rojo en la Figura 5.3.

**Figura 5.3**  
**Vista en Corte del Modelo Hidrogeológico Cuenca de Andacollo**



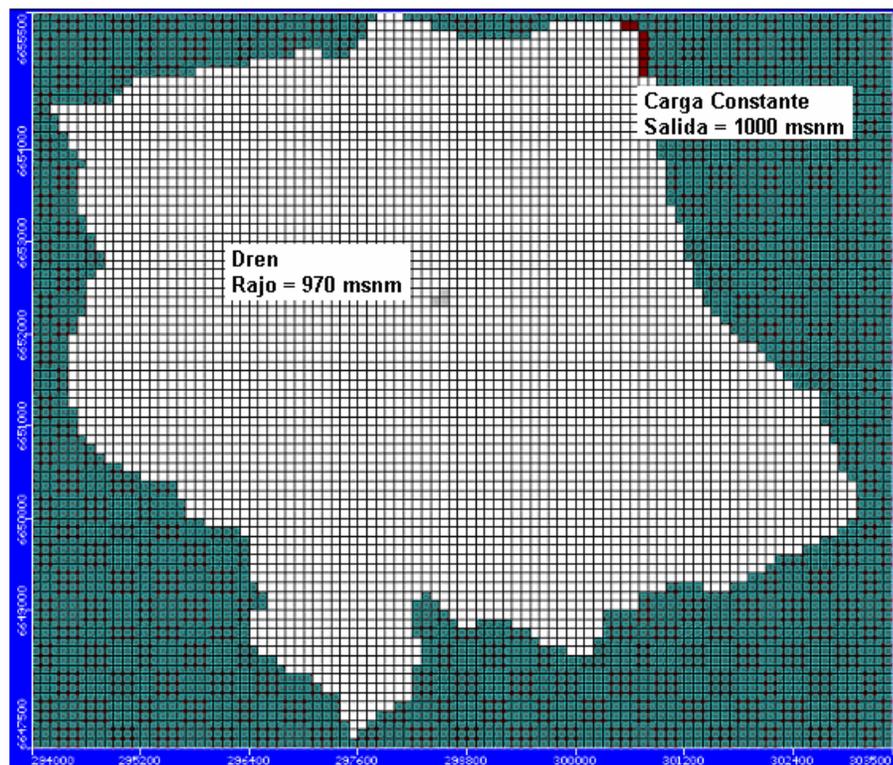
Existen datos de las propiedades hidrogeológicas en algunos sectores del acuífero, pero dada la naturaleza del medio poroso, las propiedades hidrogeológicas no pueden ser extendidas en forma areal como se haría en un relleno sedimentario, sino que solo constituyen valores de referencia para el proceso de calibración. El rango de valores para la conductividad va desde 0.00017 m/d hasta 1.5 m/d.

La Falla de Andacollo corresponde a una zona de baja conductividad hidráulica (impermeable) que separa los sectores este y oeste de la cuenca. Esta situación se consideró en el modelo hidrogeológico, asignándole a esta zona una conductividad hidráulica de  $10^{-4}$  m/d.

Para el modelo hidrogeológico de la cuenca de Andacollo se han considerado condiciones de borde diferentes para las fases de calibración y validación, las que están asociadas a las situaciones históricas de los años 1975 y 2005.

Las condiciones de borde para la modelación hidrogeológica del año 1975 corresponden a sectores con niveles de agua conocidos. A partir de esta información se ha estimado que la salida de la cuenca tiene un nivel de agua equivalente a 1000 msnm, mientras que en el sector del rajo el nivel de agua característico alcanzaba a 970 msnm. En la Figura 5.4 se observa la ubicación de las condiciones de borde para el año 1975. Estos valores no representan necesariamente el nivel de agua exacto en los puntos que se indica sino un valor aproximado que permite establecer condiciones regionales de escurrimiento del agua subterránea.

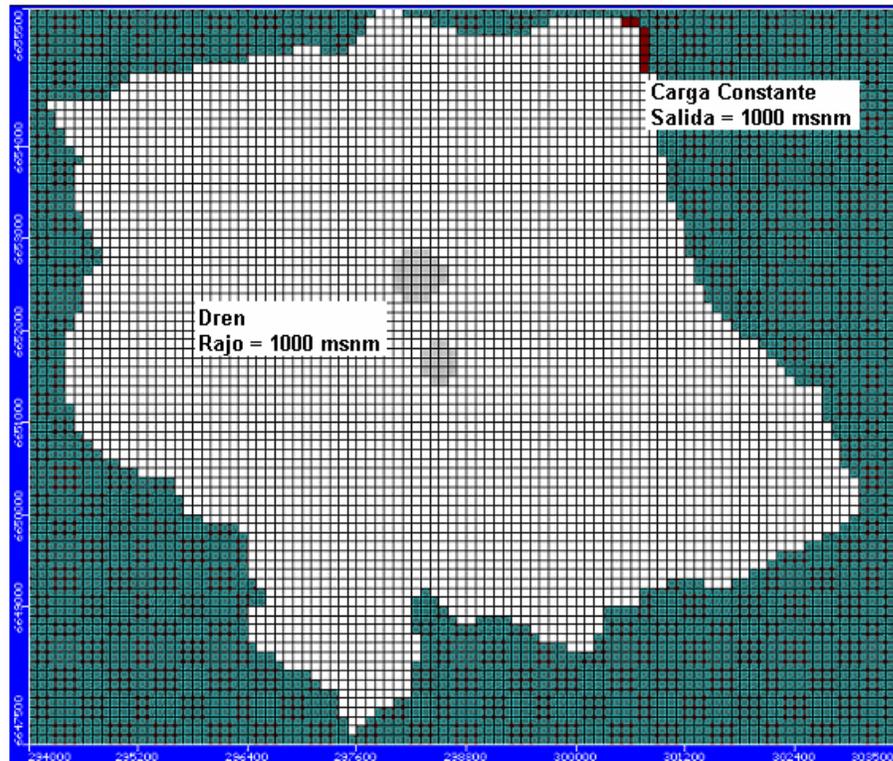
**Figura 5.4**  
**Condiciones de Borde – Situación Año 1975**



Para la simulación del año 2005 se estimó, que el rajo tenía una mayor extensión y por lo tanto afectaba un mayor sector del acuífero. Para este caso se consideró la distribución de condiciones de borde de nivel conocido que se indica en la Figura 5.5, en la cual se establece la presencia de

dos zonas bajas con niveles de agua equivalentes a 1000 msnm y se ha mantenido constante la condición de borde en la salida de la cuenca.

**Figura 5.5**  
**Condiciones de Borde – Situación Año 2005**



En el caso, de las acciones externas se debe considerar la información de bombeos, recargas naturales o artificiales y descargas. En este caso, se debe disponer de datos medidos en terreno o estimados a partir de información secundaria que permitan cuantificar los montos de estas acciones.

Para los efectos del modelo de simulación se ha supuesto un caudal de recarga de 16 l/s, el que se ha considerado que se reparte de manera homogénea en el área de modelación. Lo anterior entrega una tasa de recarga homogénea de 11 mm/año.

La descarga natural de la cuenca se produce hacia el sector noreste y el caudal de descarga se ha estimado del orden de 6 l/s, lo que deberá ser preservado en el modelo hidrogeológico.

En la zona existen extracciones de agua subterráneas mediante bombeos en pequeñas captaciones, la información de los caudales extraídos no es confiable, por ello su incorporación en el modelo hidrogeológico puede introducir sesgo. Por esta razón, se ha considerado manejar todas las extracciones artificiales por medio de los flujos que se producen hacia la zona del rajo.

### 5.2.3.2 Calibración

En la fase de calibración del modelo de simulación de la cuenca de Andacollo se consideró representativa la situación del año 1975, la que representa una condición de equilibrio, en la cual los caudales de recarga son similares a los caudales de salida naturales y artificiales del sistema

acuifero. Para efectos de la modelación, se consideró que la situación anteriormente descrita, puede ser representada a través de una simulación en régimen permanente, lo que permite enfocar el ajuste de los parámetros solo en los valores de la conductividad hidráulica.

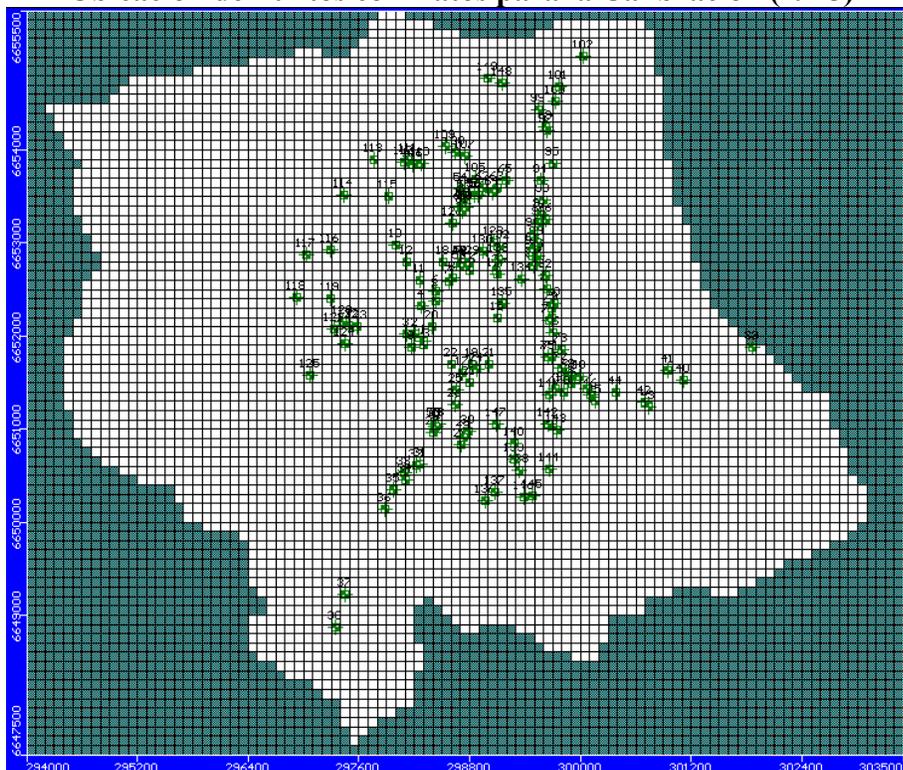
La calibración del modelo de simulación se realizó a través del programa Visual MODFLOW, el cual cuenta con una gran aceptación a nivel mundial por diversos organismos fiscalizadores para la simulación del flujo de agua subterránea, entre estos organismos se encuentra la Dirección General de Aguas de Chile.

Los parámetros hidrogeológicos utilizados en el modelo de simulación se observan en la Tabla 5.1. Durante la fase de calibración se utilizaron las condiciones de borde presentadas en la Figura 5.4 y una recarga total de 16 l/s, la que se distribuyó uniformemente sobre toda el área de la cuenca. Para la fase de calibración se dispone de 147 puntos con información de niveles medidos de agua subterránea, los cuales se pueden apreciar en la Figura 5.6.

**Tabla 5.1**  
**Propiedades Hidrogeológicas Cuenca de Andacollo**

	<b>Estrato 1</b>	<b>Estrato 2</b>
<b>Ss (1/m)</b>	1.2E-04	1.2E-04
<b>Sy</b>	0.3	0.3
<b>Eff. Por.</b>	0.3	0.3
<b>Tot. Por.</b>	0.3	0.3

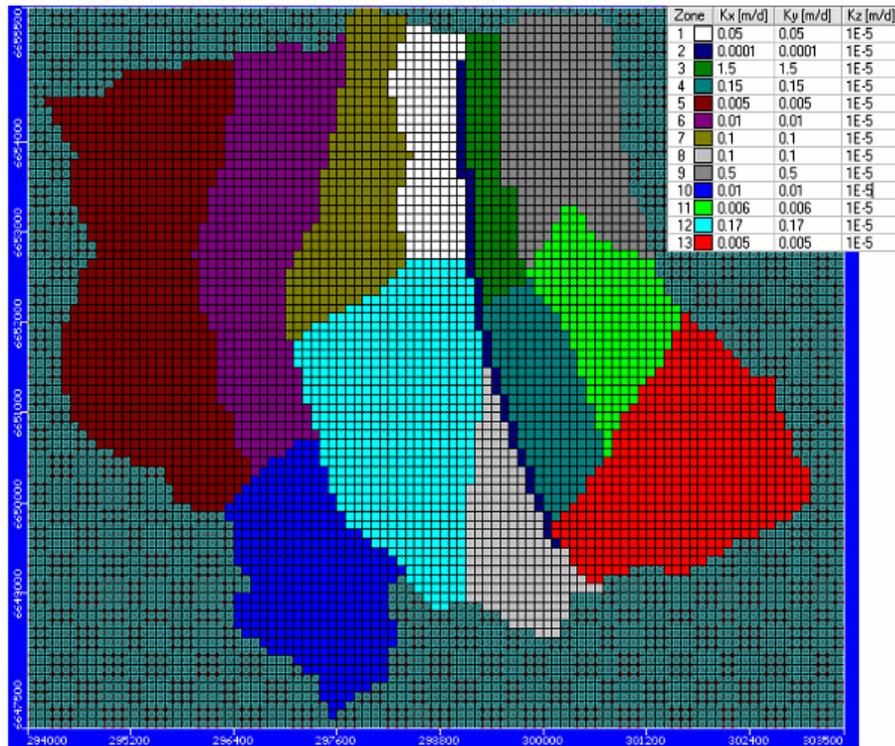
**Figura 5.6**  
**Ubicación de Puntos con Datos para la Calibración (1975)**



En esta fase se modificaron los valores de la conductividad hidráulica hasta conseguir que los valores medidos y simulados de las variables de estado, que en este caso son los niveles de agua

en los 147 puntos, fueran lo más parecidos posibles entre ellos. La distribución final de la conductividad hidráulica obtenida del proceso de calibración para el primer estrato se presenta gráficamente en una vista en planta en la Figura 5.7. En el segundo estrato, se obtuvo un único valor de conductividad hidráulica para toda el área de modelación de  $10^{-5}$  m/d. Cabe mencionar, que los valores de conductividad hidráulica que se obtuvieron en el proceso de calibración para el primer estrato van entre 0.0001 m/d y 1.5 m/d, lo que corresponde con los datos obtenidos en pruebas de terreno en la cuenca de Andacollo.

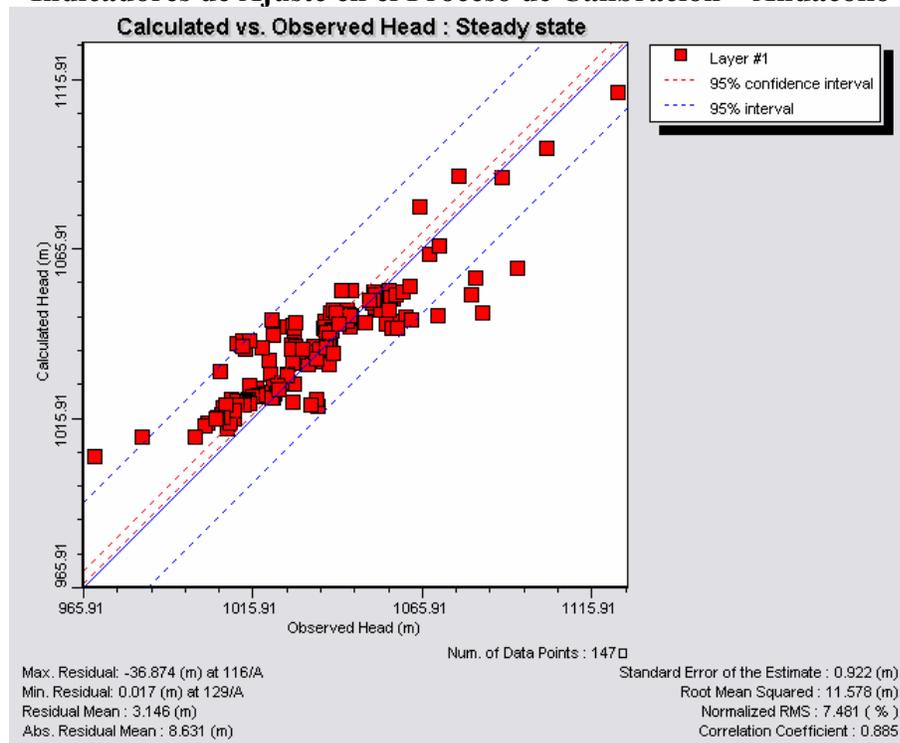
**Figura 5.7**  
**Distribución Final de Conductividades Hidráulicas – Andacollo**



La calibración del modelo se la realizó mediante el proceso de prueba y error, obteniendo un ajuste global satisfactorio entre los valores medidos y simulados. El ajuste se mide a través de indicadores de bondad de ajuste, siendo el indicador más utilizado para medir la calidad del ajuste el Normalized RMS (Root Mean Squared), el cual alcanzó un valor de 7.5%, lo que se considera como adecuado para una calibración en condiciones de régimen permanente.

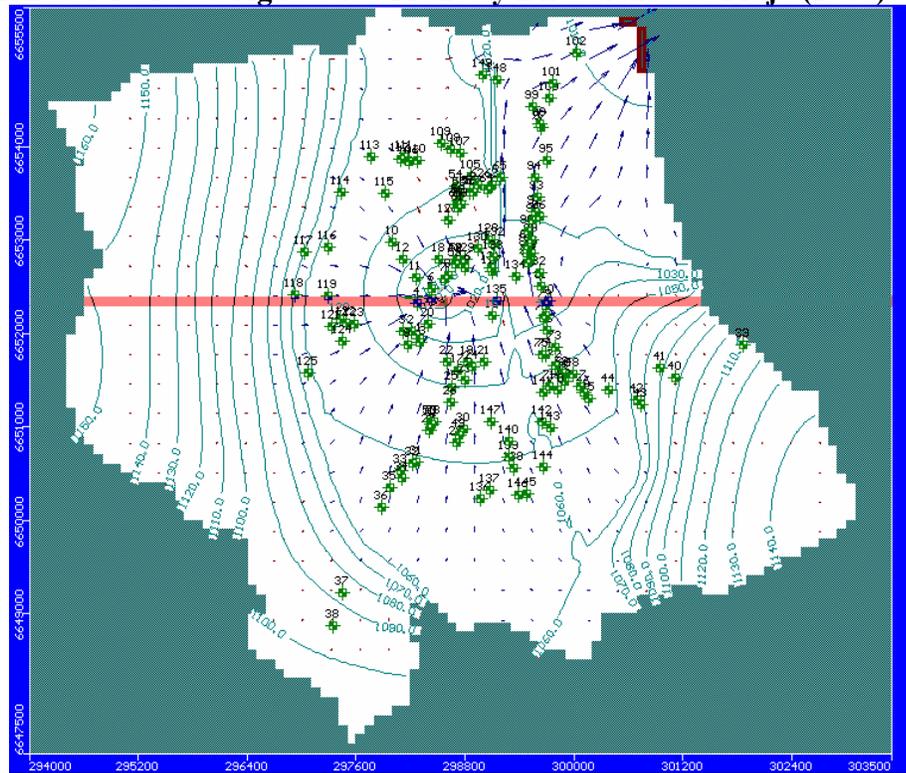
La Figura 5.8 resume los principales indicadores de ajuste para el proceso de calibración y muestra una comparación gráfica entre los valores medidos y simulados de los niveles de agua en la cuenca de Andacollo.

**Figura 5.8**  
**Indicadores de Ajuste en el Proceso de Calibración – Andacollo**

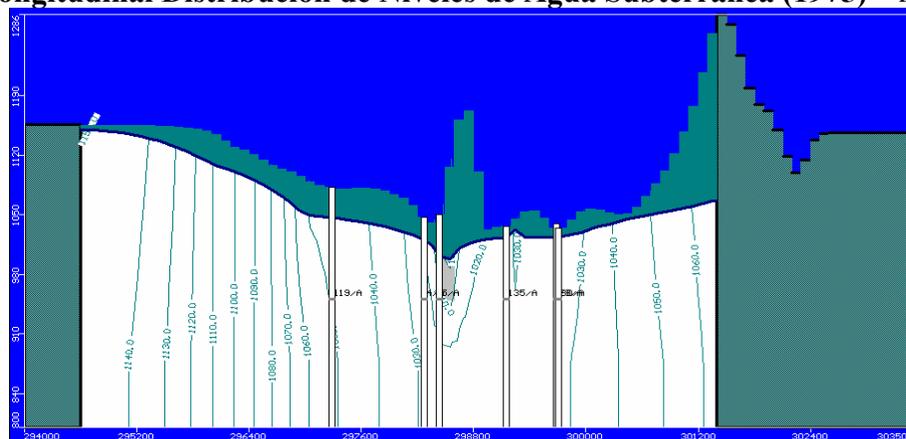


En la Figura 5.9 se presentan los niveles de agua subterránea simulados al final de la etapa de calibración, donde además se incluyen los vectores de velocidad, los cuales indican la dirección de los flujos de agua subterránea en el acuífero. Se observa la generación de una zona de descensos de los niveles de agua en la zona del rajo minero y un flujo de salida hacia fuera de la cuenca. La Figura 5.10 muestra un corte longitudinal de la etapa final de calibración, el cual se localiza en la posición indicada en rojo en la Figura 5.9, la cual corresponde a la zona del rajo minero.

**Figura 5.9**  
**Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo (1975) – Andacollo**



**Figura 5.10**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea (1975) – Andacollo**



Se realizó un balance hídrico del modelo de Andacollo para evaluar los flujos subterráneos en el sistema acuífero, generando tres zonas de balance: la Zona 1 corresponde a toda el área de modelación, la Zona 2 corresponde a los flujos a través de la condición de borde de salida y la Zona 3 corresponde a los flujos hacia la zona del rajo en el año 1975. La Tabla 5.2 presenta los resultados obtenidos del balance hídrico.

Los resultados de este balance son coincidentes con la información generada para el balance hídrico de la zona de estudio, el cual indica que el caudal de salida desde la cuenca de Andacollo es aproximadamente igual a 6 l/s.

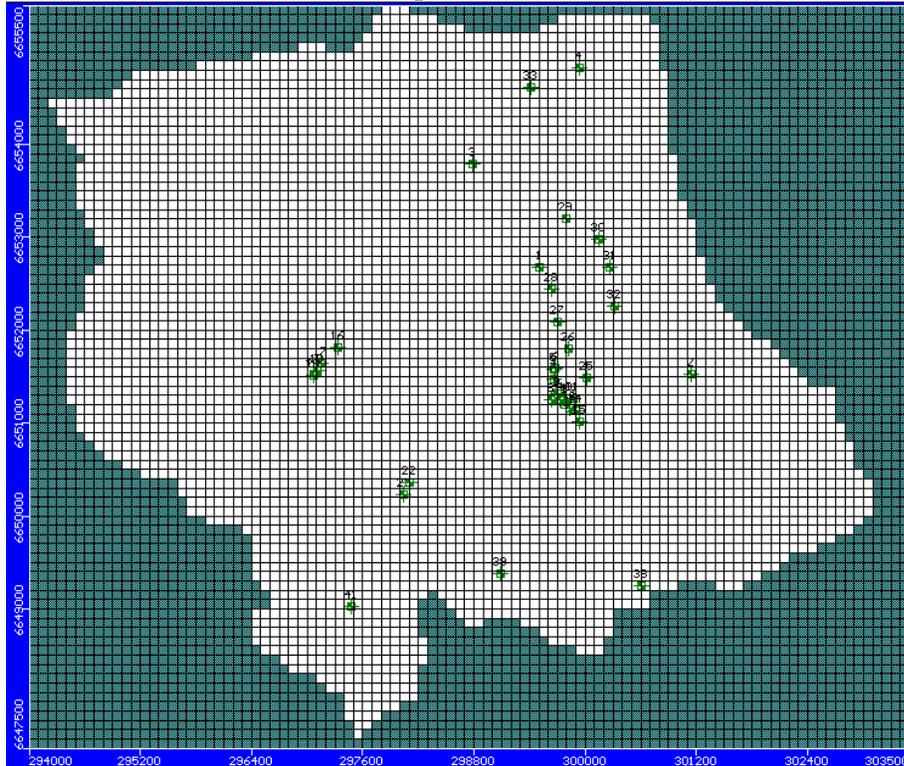
**Tabla 5.2**  
**Balance Hídrico de la Cuenca de Andacollo (1975)**

Elemento	Caudal	
	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	1388.50	16.1
<b>Rajo</b>	869.23	10.1
<b>Salida</b>	520.24	6.0

### 5.2.3.3 Validación

Como complemento a la fase de calibración se llevó a cabo la validación del modelo hidrogeológico. Para efectos de la validación se consideró la información de niveles de agua subterránea recolectada el año 2005, la cual abarcó un total de 36 puntos, los que se ubican en las posiciones señaladas en la Figura 5.11. Las condiciones de borde utilizadas en esta fase se observan en la Figura 5.7.

**Figura 5.11**  
**Ubicación de Puntos con Datos para la Validación (2005) – Andacollo**



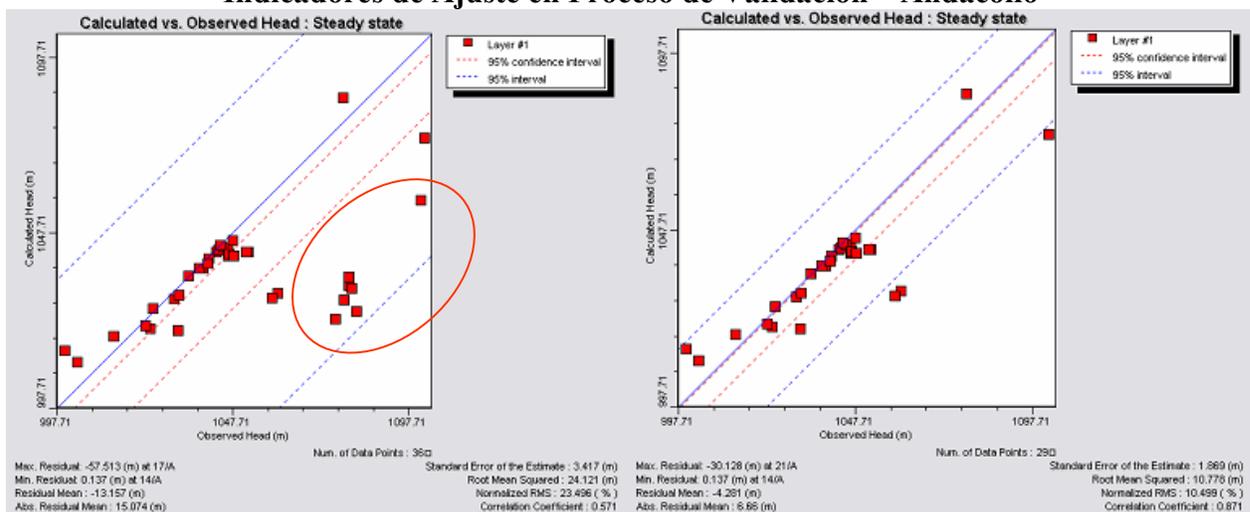
En el proceso de validación, al igual que en la calibración, se consideró que el sistema acuífero se encuentra en equilibrio, lo que posibilita considerar una condición de régimen permanente. La hipótesis de equilibrio no se encuentra tan alejada de la realidad, puesto que se demostró con investigación de terreno que el uso de agua en esta cuenca no es tan elevado, y que actualmente el abastecimiento de agua potable se realiza a través de una línea de impulsión con recursos extraídos desde fuera de la cuenca de Andacollo.

Al utilizar los valores de la conductividad hidráulica obtenidos en la fase de calibración se observan algunos sectores en los cuales existe un efecto directo de la condición de borde del rajo

minero (dren), lo que afecta la correcta reproducción de algunos puntos con valores medidos de nivel de agua subterránea. La Figura 5.12 muestra los resultados originales del proceso de validación y se observa claramente que existen diversos puntos que escapan totalmente a la tendencia del resto de los valores.

Al analizar estos valores y los puntos que representan en la Figura 5.11 se puede concluir que ellos están afectados por la condición de borde del rajo. Además, cabe mencionar que el acuífero de Andacollo se caracteriza por ser un medio rocoso fracturado, donde el flujo subterráneo ocurre a través de las fracturas, por lo que no todos los puntos medidos pertenecen a la misma red de flujo y por consiguiente no están conectados entre sí. Lo anteriormente expuesto impide reproducir de mejor manera los niveles medidos.

**Figura 5.12**  
**Indicadores de Ajuste en Proceso de Validación – Andacollo**



Para mejorar la reproducción de los niveles medidos se eliminaron algunos puntos que se encontraban en la situación anteriormente descrita, reduciendo el número de puntos con datos medidos a 29, lo que entrega un Normalizado RMS de 10.5%, el cual se puede considerar adecuado para la fase de validación. En la Tabla 5.3 se presenta el balance hídrico para el sistema acuífero para la situación de equilibrio del año 2005.

**Tabla 5.3**  
**Balance Hídrico de la Cuenca de Andacollo (2005)**

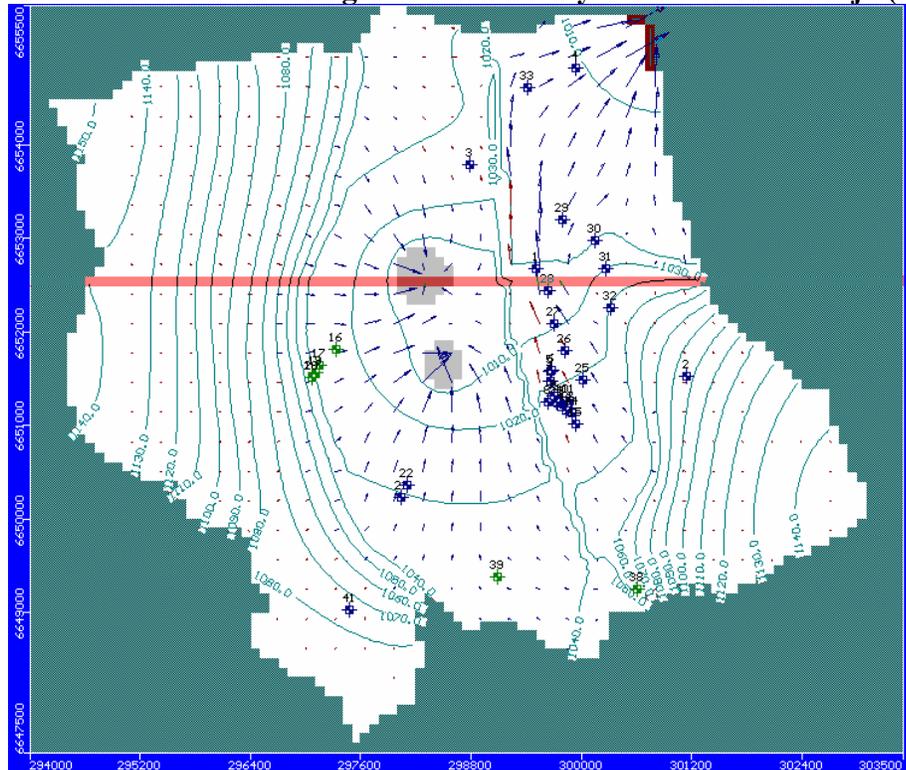
Elemento	Caudal	
	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	1375.50	15.9
<b>Rajo</b>	908.28	10.5
<b>Salida</b>	467.21	5.4

Este resultado muestra que el caudal de salida desde la cuenca de Andacollo se ha reducido en aproximadamente un 10%, lo que proviene en parte de una reducción en la recarga total debido al aumento del área del rajo, lo que limita la extensión de la zona de recarga por precipitaciones.

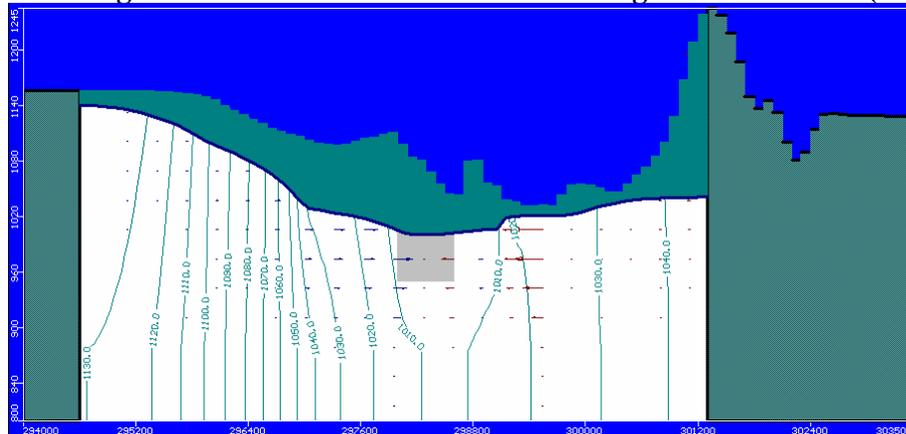
Por otra parte, se tiene que producto del aumento de la extensión del rajo el caudal drenado hacia el mismo aumentó desde 10.1 l/s en el año 1975 hasta 10.5 l/s en el año 2005. La combinación de ambos efectos provoca la disminución observada del caudal de salida de la cuenca de Andacollo.

En la Figura 5.13 se presentan los niveles de agua subterránea y los vectores de velocidad simulados al final de esta etapa. La Figura 5.14 muestra un corte longitudinal de la etapa final de validación, el cual se localiza en la posición indicada en rojo en la Figura 5.13, la cual corresponde a la zona del rajo minero de mayor extensión.

**Figura 5.13**  
**Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo (2005)**



**Figura 5.14**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea (2005)**



#### 5.2.3.4 Análisis de sensibilidad

Los procesos de calibración y validación permitieron construir un modelo de simulación numérico que reproduce de manera adecuada la distribución espacial de los niveles de agua subterránea y los caudales de escurrimiento hacia el rajo minero y la salida de la cuenca de Andacollo.

Como última actividad en la construcción del modelo de simulación hidrogeológico se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, en el cual se evaluó la solución del modelo para diversos valores de la conductancia del dren. La conductancia es un parámetro de la condición de borde de tipo dren que describe la pérdida de carga entre el dren y el sistema de agua subterránea, es decir, condiciona la entrada de agua al dren. Como se mencionó anteriormente, en la mayor parte de las situaciones, la información requerida para calcular la conductancia del dren no está disponible, por lo que en este análisis de sensibilidad, el modelo de simulación se operó en régimen permanente para valores de conductancia entre 1000 y 0.001 m<sup>2</sup>/d.

En la Tabla 5.4 se presentan los resultados obtenidos del balance hídrico realizado para diferentes valores de la conductancia del dren obtenidos con el modelo de simulación en régimen permanente en la situación del año 1975 (calibración). Se observa que a medida que el valor de la conductancia va disminuyendo, el caudal de extracción del rajo (dren) disminuye y el caudal de salida de la cuenca de Andacollo aumenta. Con una conductancia de 0.001 m<sup>2</sup>/d el caudal de salida del rajo es de 0 l/s, debido a que la zona acuífera donde se encuentra el rajo presenta una conductividad hidráulica superior a la conductancia del dren, por lo tanto el dren no es capaz de extraer agua del sistema acuífero, porque opone mayor resistencia al flujo del agua que el acuífero en sí.

**Tabla 5.4**  
**Balance Hídrico para Diferentes Conductancias - Andacollo**

Elemento	Caudal													
	C=1000		C=100		C=10		C=1		C=0.1		C=0.01		C=0.001	
	m <sup>3</sup> /d	l/s												
<b>Recarga Total</b>	1388.5	16.1	1388.5	16.1	1388.5	16.1	1388.5	16.1	1388.5	16.1	1388.5	16.1	1388.5	16.1
<b>Rajo</b>	893.8	10.3	893.0	10.3	869.3	10.1	496.1	5.7	97.9	1.1	9.1	0.1	0.9	0.0
<b>Salida</b>	495.7	5.7	496.5	5.7	520.2	6.0	893.5	10.3	1305.2	15.1	1380.5	16.0	1388.6	16.1

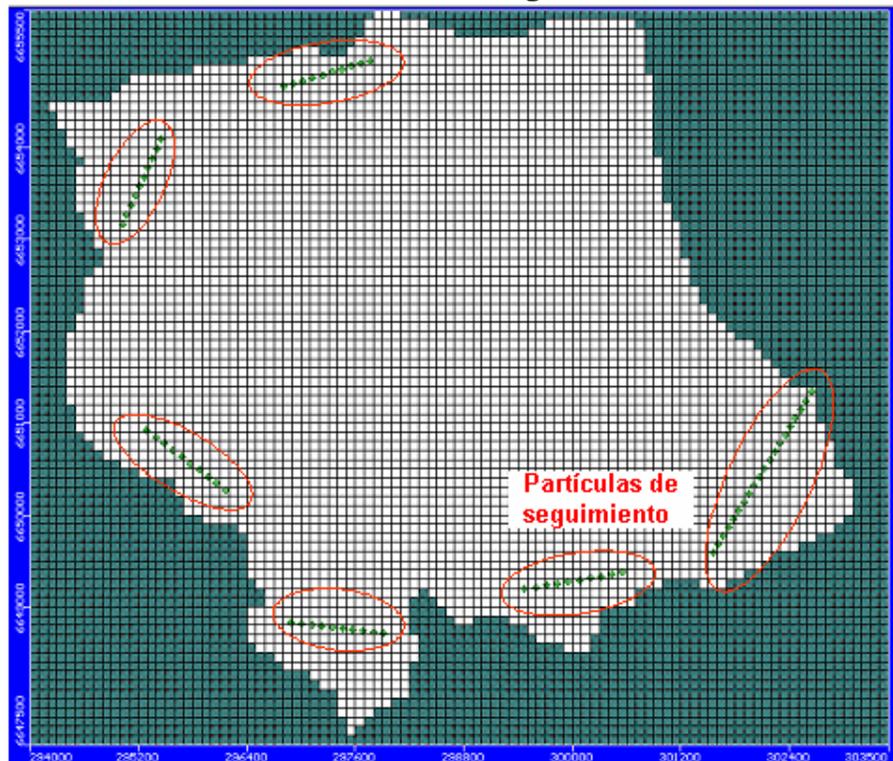
La condición de borde de dren podría compararse análogamente con el funcionamiento de una tubería, en la cual la conductancia vendría a ser la válvula de paso de agua que se puede ir abriendo o cerrando para regular el flujo de agua. En el caso que el valor de la conductancia del dren sea menor a la conductividad hidráulica del sector donde se encuentra la condición de borde de tipo dren, la válvula de paso de agua se encontraría cerrada y el flujo de agua a ser extraído por el dren del sistema acuífero sería casi o completamente nulo. En el caso contrario, cuando el valor de la conductancia es mayor a la conductividad hidráulica del sector donde se encuentra el dren y a medida que se va abriendo la válvula de paso (incremento conductancia) el flujo a ser extraído va aumentando, hasta llegar a un punto, en el que aunque se siga abriendo la válvula, el flujo extraído por el dren no aumentará, porque el flujo de salida por el dren en ese caso se encontrará condicionado por la permeabilidad del material que conforma al acuífero en el sector de la condición de borde (ver Tabla 5.4). En la cuenca de Andacollo la conductividad hidráulica del sector acuífero donde se encuentra el dren es de 0.17 m/d (ver Figura 5.7).

Se utilizó el programa computacional MODPATH para realizar el seguimiento de partículas en los datos de salida de la simulación de los flujos subterráneos en régimen permanente obtenidos usando el Visual MODFLOW en el análisis de sensibilidad de la conductancia del dren. El programa MODPATH utiliza un esquema semi-analítico de rastreo de partículas. El método está basado en la suposición de que cada componente direccional de la velocidad varía linealmente dentro de la celda en su propia dirección de coordenada. Esta suposición permite obtener una expresión analítica que describe el flujo de la partícula dentro de la celda. Esto permite calcular la posición inicial de una partícula en cualquier lugar de una celda, las coordenadas de cualquier otro punto a lo largo de su línea de trayectoria dentro de la celda y el tiempo de viaje entre ellos.

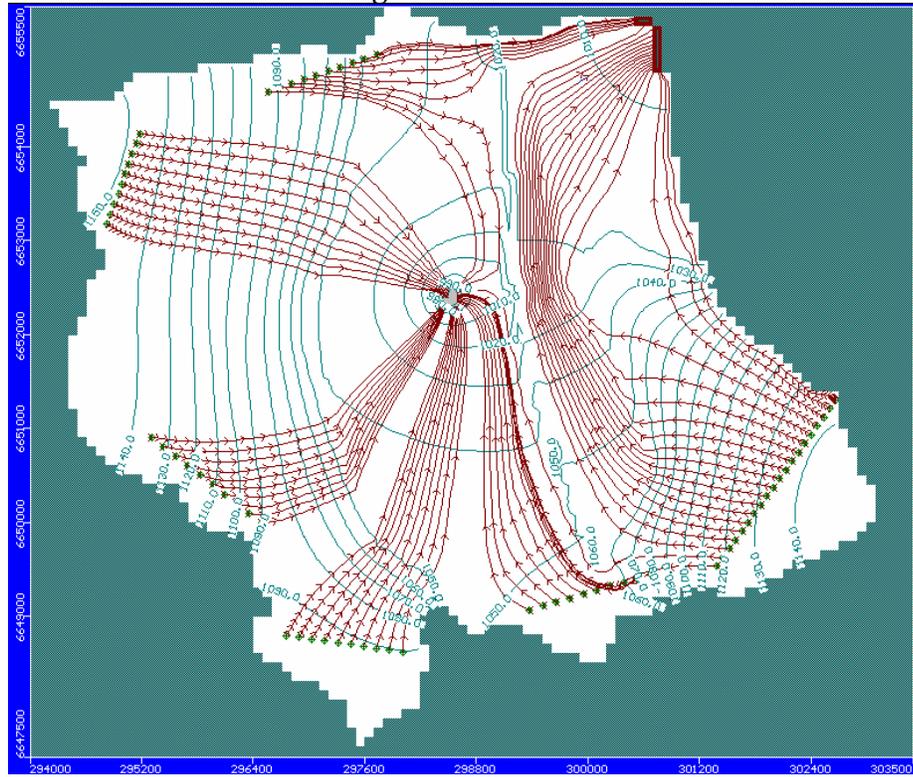
En la Figura 5.15 se muestra la posición inicial de las partículas antes de iniciar el proceso de seguimiento. Las Figuras 5.16 a 5.19 muestran los resultados obtenidos del seguimiento de las partículas y las zonas de capturas de flujo del rajo minero (dren) y de la salida de la cuenca (carga constante) del modelo hidrogeológico de la cuenca de Andacollo al final del proceso de simulación en la situación del año 1975. Se puede observar que con una conductancia de 1000 m<sup>2</sup>/d el agua subterránea del sector Oeste de la cuenca (sector rajo) casi en su totalidad fluye hacia el rajo minero, a medida que se va disminuyendo el valor de la conductancia se observa que el agua subterránea comienza a fluir hacia la salida de la cuenca, hasta llegar al punto de que toda el agua subterránea fluye hacia la salida de la cuenca (conductancia de 0.01 y 0.001 m<sup>2</sup>/d) (ver Anexo Digital Figuras AX.43 a AX.49).

Cabe resaltar, que en las Figuras 5.16 a 5.19 se observa claramente que la Falla de Andacollo funciona como una barrera impermeable entre el sector Este y Oeste de la cuenca del mismo nombre, por consiguiente el drenaje del rajo minero no afecta directamente los niveles de agua subterránea en el sector Este de la cuenca.

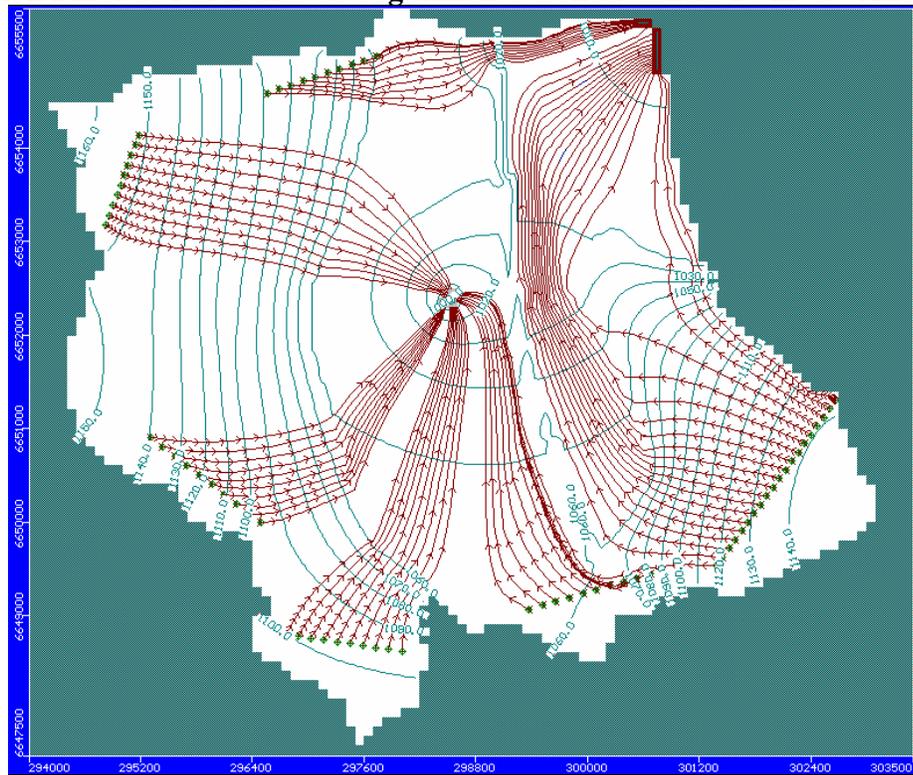
**Figura 5.15**  
**Posición Inicial Partículas de Seguimiento - Andacollo**



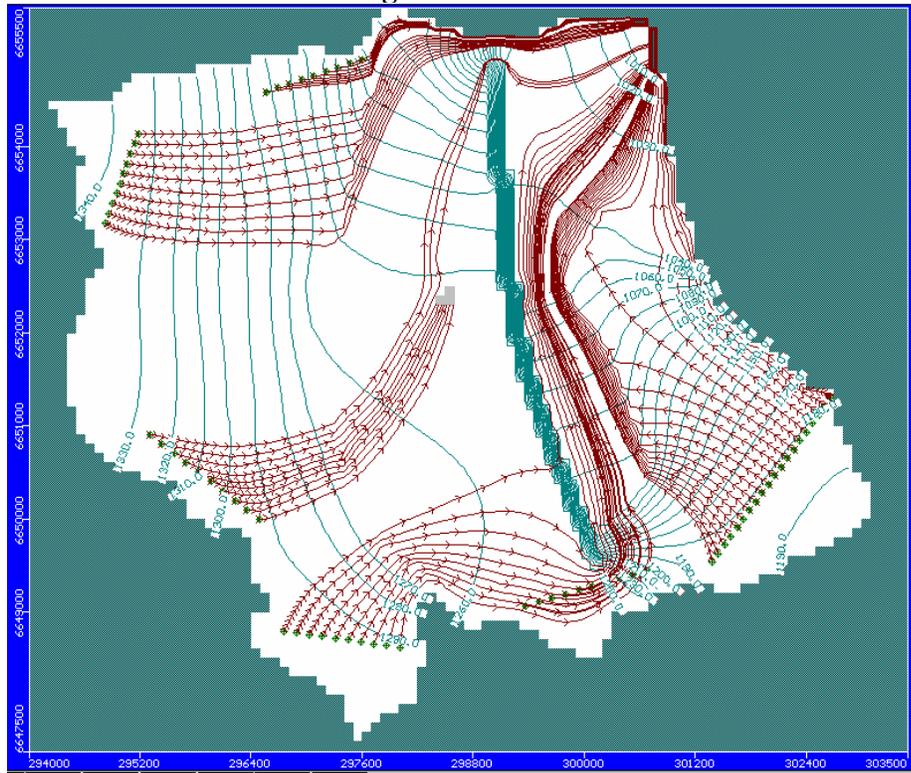
**Figura 5.16**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 1000 m<sup>2</sup>/d - Andacollo**



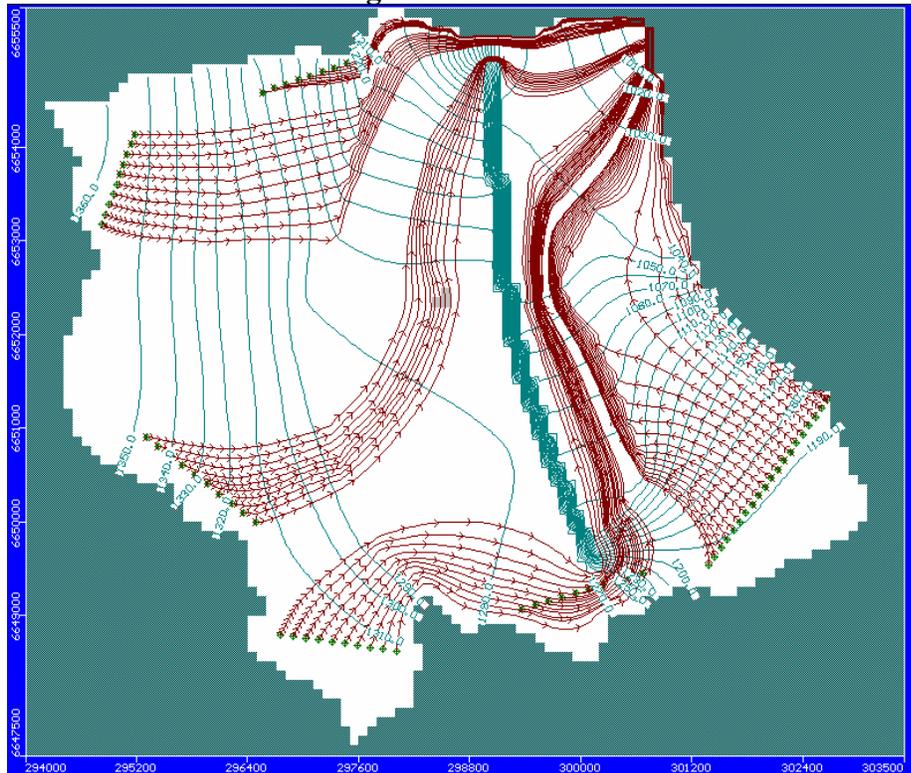
**Figura 5.17**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 10 m<sup>2</sup>/d - Andacollo**



**Figura 5.18**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.1 m<sup>2</sup>/d - Andacollo**



**Figura 5.19**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 0.001 m<sup>2</sup>/d - Andacollo**



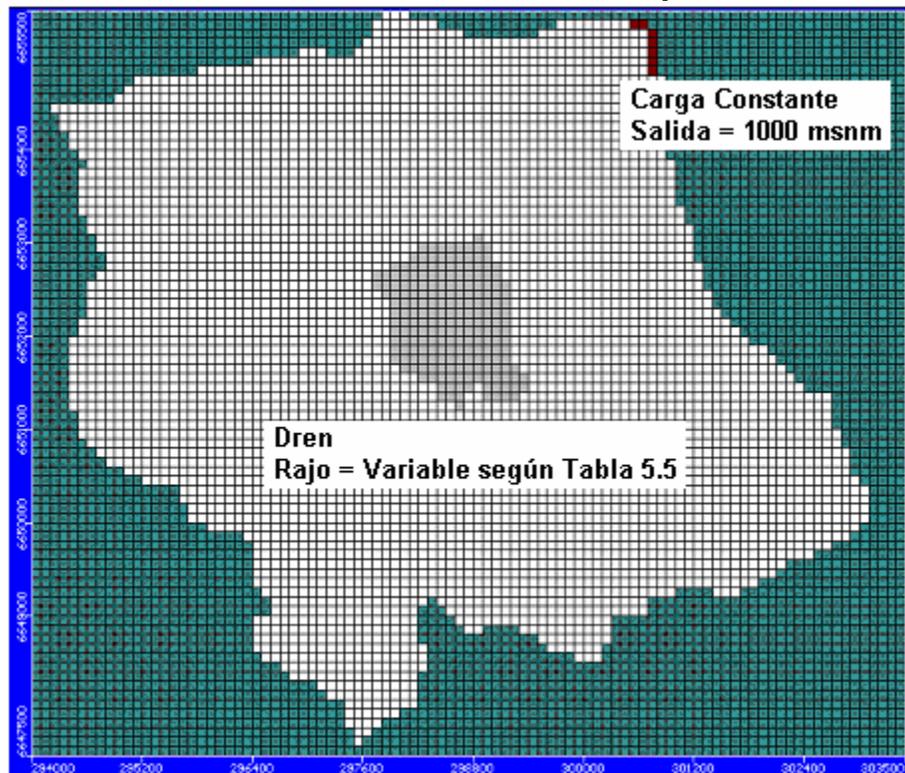
### 5.2.3.5 Operación del modelo de simulación

Una vez que el modelo de simulación hidrogeológico fue calibrado y validado se lo utilizó para evaluar los posibles cambios e impactos físicos en el sistema de aguas subterráneas debido a la expansión del rajo minero en la cuenca de Andacollo. Específicamente se analizó el efecto de la profundización del rajo sobre los niveles de agua subterránea y los caudales aportantes al rajo y de salida de la cuenca de Andacollo.

Para analizar los efectos causados por la profundización del rajo minero en la cuenca de Andacollo se realizaron algunas modificaciones en el modelo hidrogeológico con respecto a las fases de calibración y validación. Estas modificaciones permiten incorporar en el modelo de simulación los cambios que la profundización y extensión del rajo ocasionarían en el sistema acuífero.

La primera modificación realizada en el modelo hidrogeológico es la extensión espacial del rajo minero, como se observa en la Figura 5.20, en la cual el rajo abarca una área mucho mayor que en los años 1975 (Figura 5.4) y 2005 (Figura 5.5). Esta área se mantendrá constante a lo largo de toda la fase de operación.

**Figura 5.20**  
**Condiciones de Borde en la Fase de Operación**



La segunda modificación implementada en el modelo de simulación es el valor de la condición de borde de dren. La elevación del dren representa la cota del fondo del rajo minero, es decir, la profundidad del mismo. Se utilizaron seis períodos de simulación con diferentes valores de elevación del dren, para de este modo poder representar de manera gradual la profundización del rajo minero a través del tiempo. En la Tabla 5.5 se observan los valores de las elevaciones del

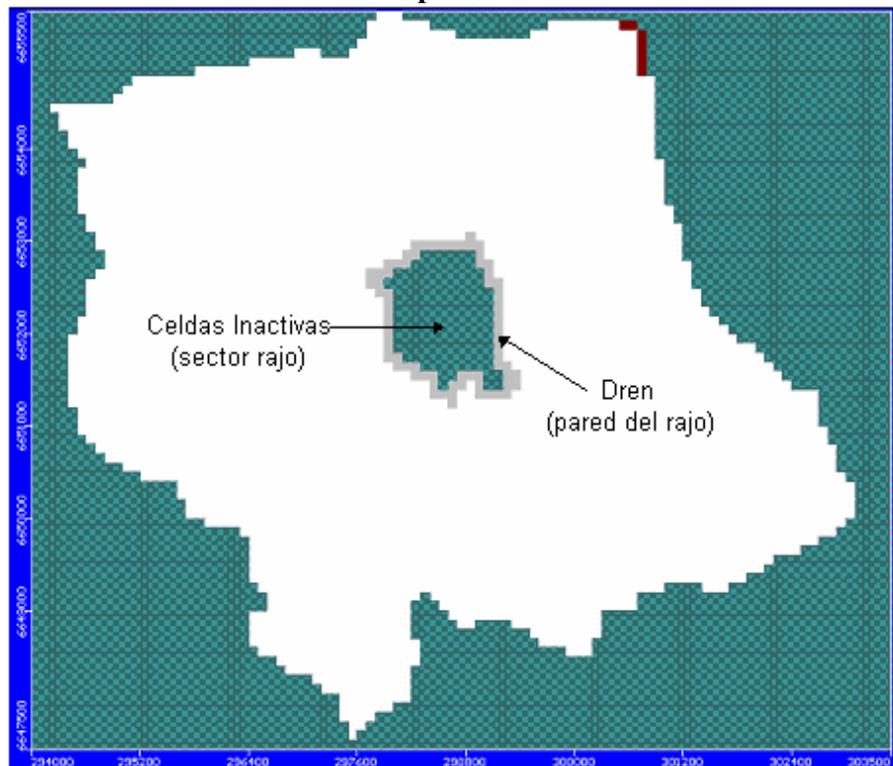
dren para los diferentes períodos de simulación y la ubicación de los mismos en los estratos acuíferos. A diferencia de las fases de calibración y validación que se simularon en régimen permanente, en la fase de operación las simulaciones se realizaron en régimen transiente.

**Tabla 5.5**  
**Valores de la Condición de Borde de Dren en la Fase de Operación**

Tiempo simulación	Elevación dren (msnm)	Ubicación en el estrato
T <sub>1</sub> (3 años)	1000	primero
T <sub>2</sub> (6 años)	980	primero
T <sub>3</sub> (9 años)	970	primero
T <sub>4</sub> (12 años)	960	primero
T <sub>5</sub> (15 años)	955	primero
T <sub>6</sub> (30 años)	850	segundo

Cabe mencionar que para la simulación del drenaje del rajo minero con la condición de borde de dren en la fase de operación, cuando la elevación del dren se encuentra en el segundo estrato acuífero (sexto período de simulación), es necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer estrato acuífero e incorporar la filtración lateral en las paredes del rajo minero. La filtración lateral se la representó como una condición de borde de dren en los bordes del rajo en el primer estrato acuífero como se observa en la Figura 5.21. El valor utilizado del dren en el primer estrato acuífero corresponde a la cota inferior del primer estrato más 1 metro de elevación.

**Figura 5.21**  
**Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral**

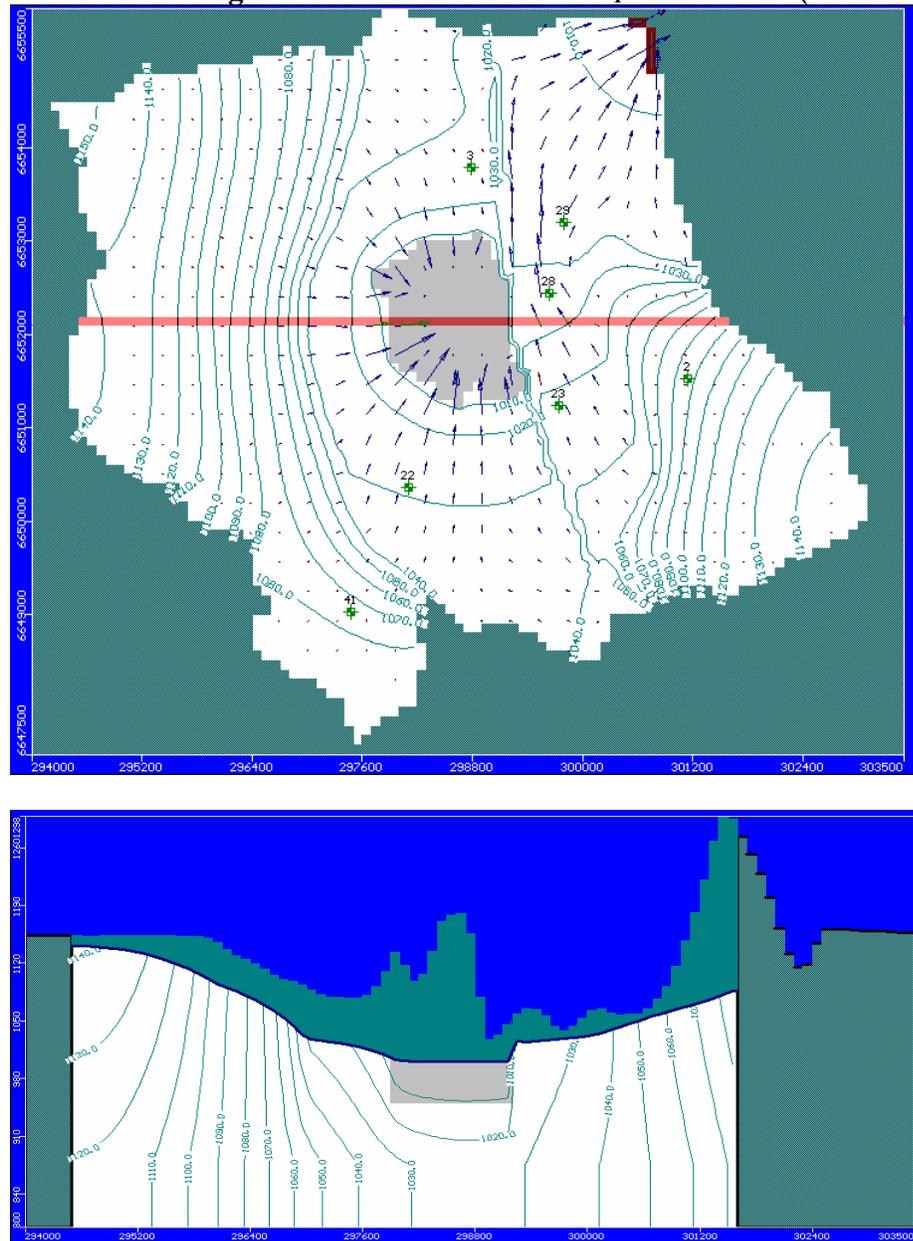


En el primer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica final de la fase de validación. Para el segundo período de simulación se utilizó como condición de

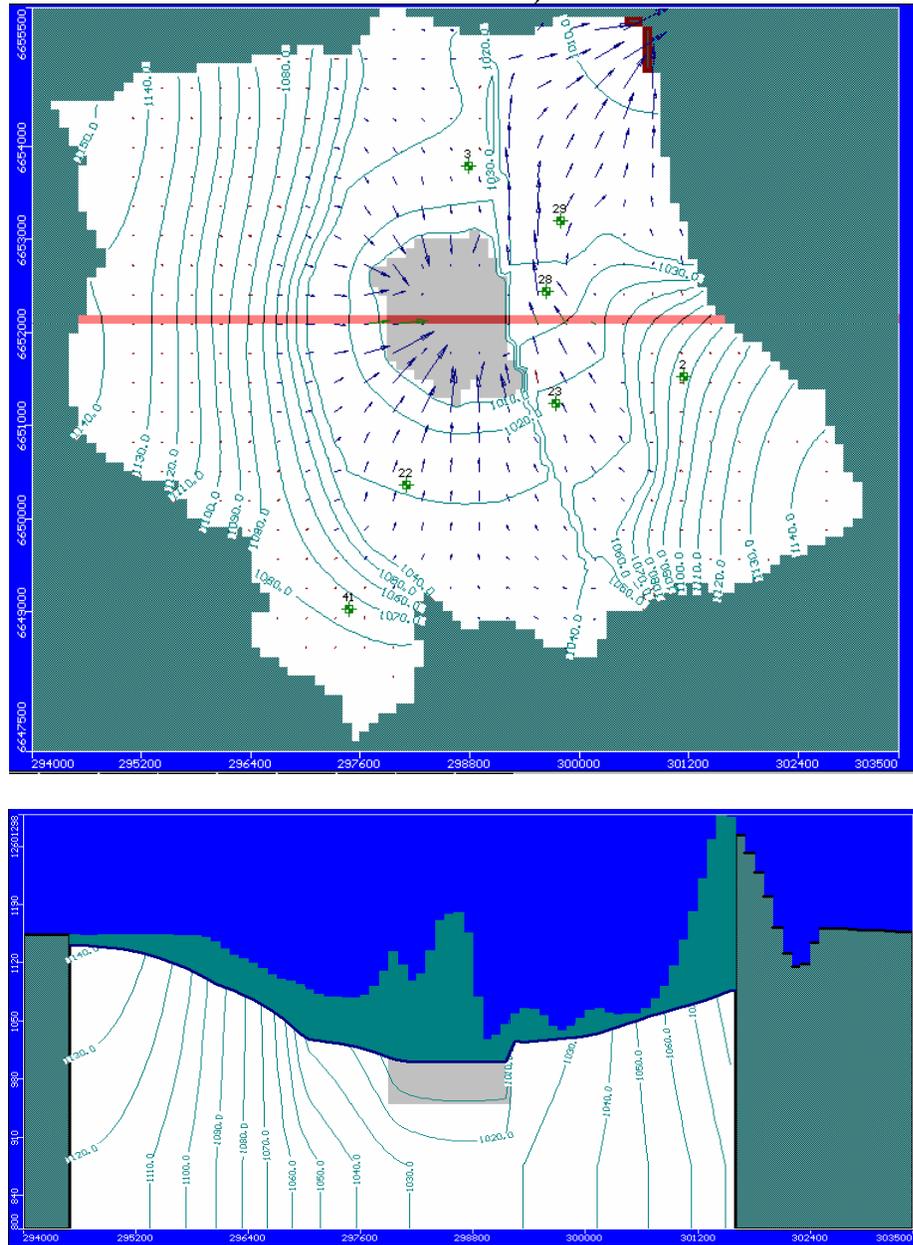
borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del primer período de simulación y así sucesivamente para el resto de los períodos de simulación.

En las Figuras 5.22 a 5.25 se presentan los resultados de los niveles de agua subterráneas y los vectores de velocidad obtenidos a través de los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT en el primer y último período de simulación vistos en planta para el drenaje del rajo minero en la cuenca de Andacollo durante la etapa de operación. También se observan cortes longitudinales, los cuales se localizan en la posición indicada en rojo en las vistas en plantas. En el Anexo Digital en las Figuras AX.50 a AX.61 se presentan todos los períodos de simulación de la fase de operación del modelo hidrogeológico de Andacollo.

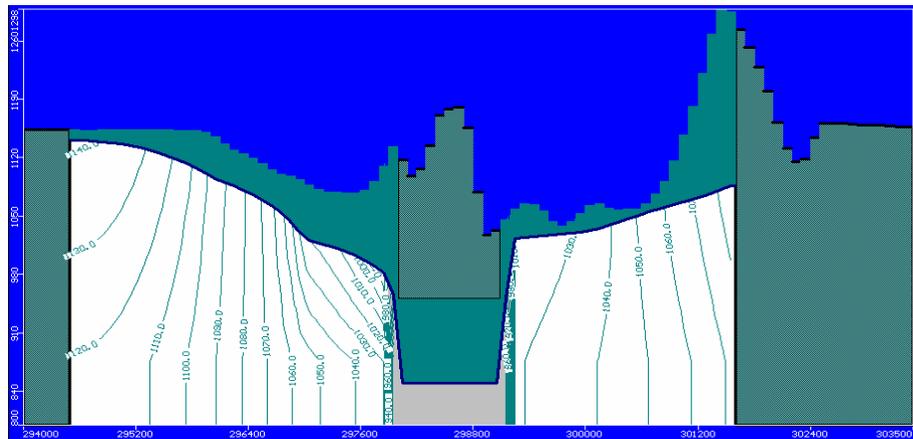
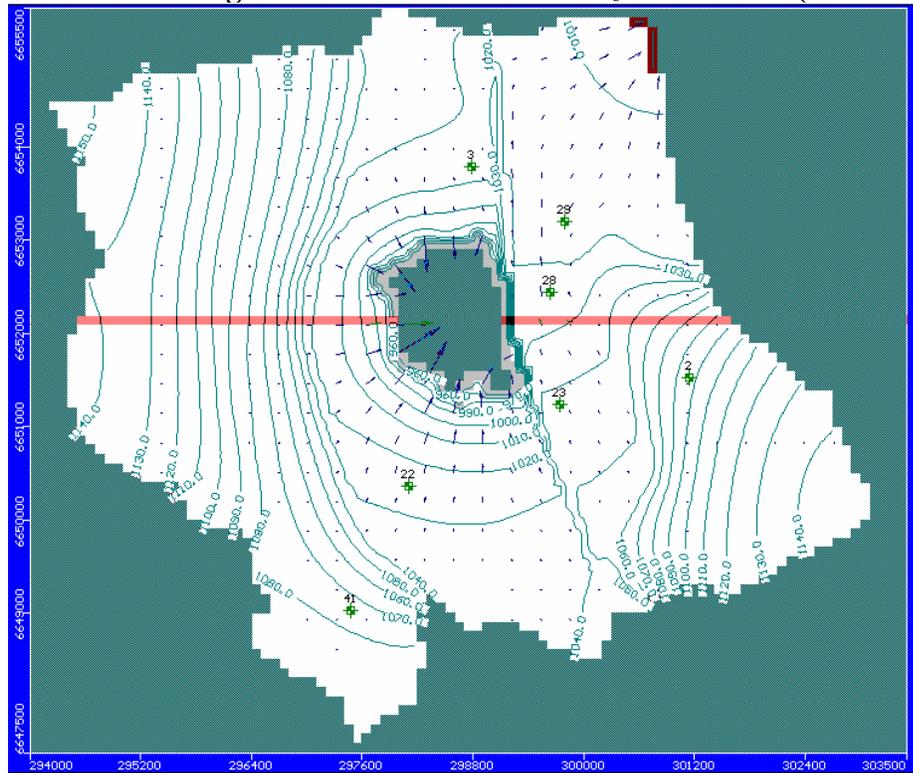
**Figura 5.22**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_1$  – Andacollo (Visual MODFLOW)**



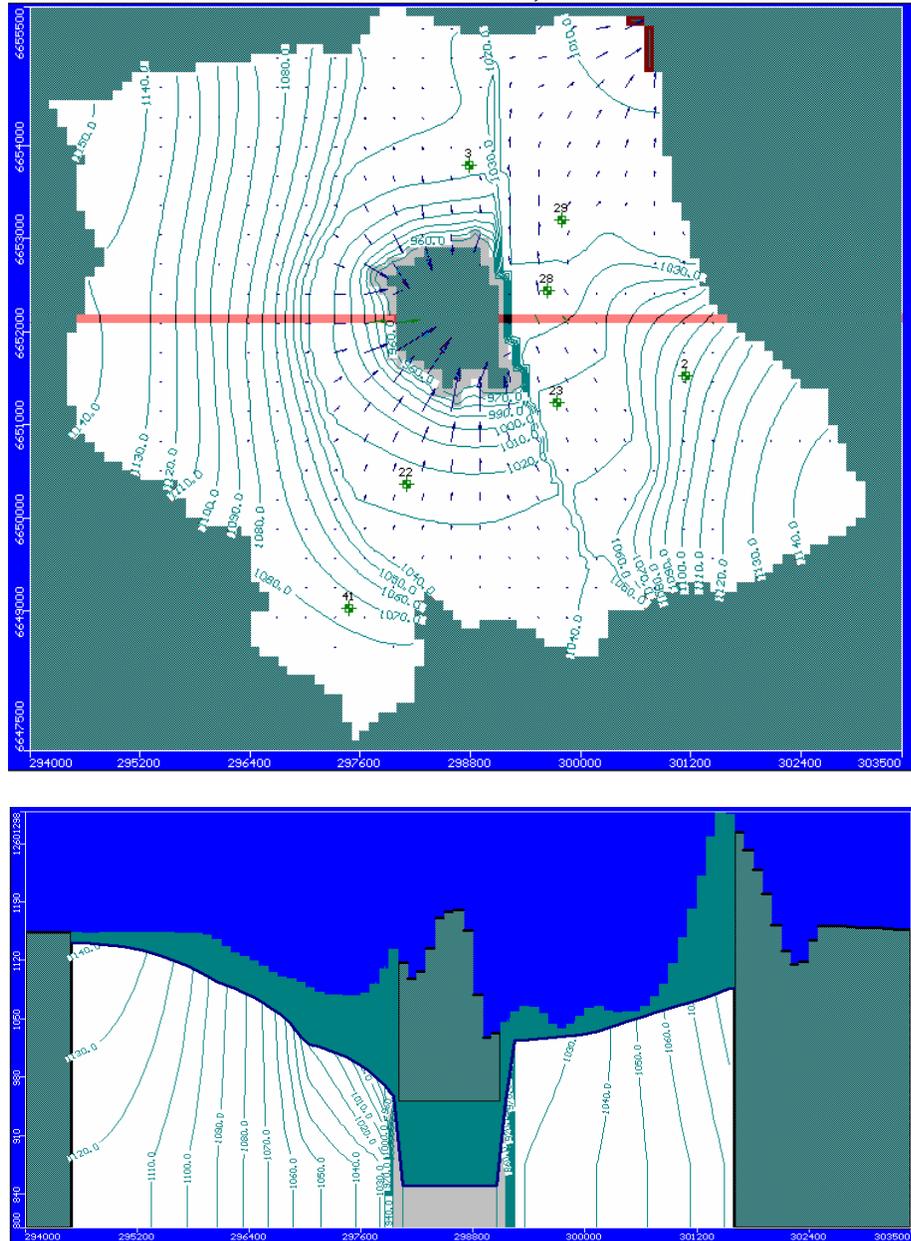
**Figura 5.23**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_1$  – Andacollo (MODFLOW - SURFACT)**



**Figura 5.24**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_6$  – Andacollo (Visual MODFLOW)**



**Figura 5.25**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_6$  – Andacollo (MODFLOW - SURFACT)**

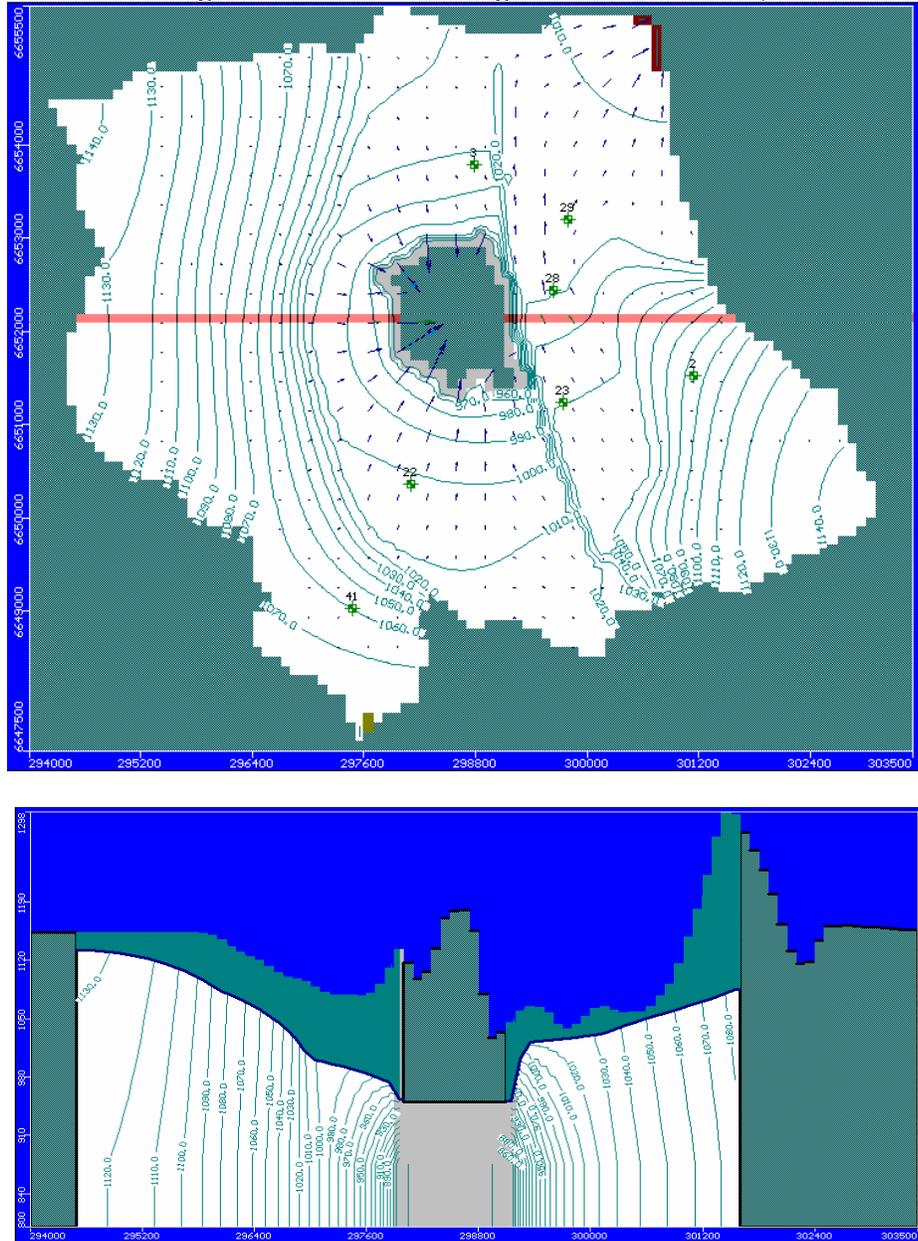


En las Figuras anteriores de los niveles de agua subterránea simulados se observa el descenso de los niveles de agua en el acuífero debido a la profundización del rajo minero en el primer y último período de simulación de la etapa de operación. Se observa que a medida que el rajo alcanza mayores profundidades el área afectada por el drenaje se incrementa. En este caso específico del drenaje de la mina a cielo abierto en Andacollo los niveles de agua subterránea simulados obtenidos con los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT son bastantes similares como se discutirá más adelante.

Para analizar el efecto de la profundización del rajo también se realizó una simulación en régimen permanente con la profundidad máxima alcanzada por el rajo (850 msnm). Los resultados de esta simulación se utilizarán para comparar la situación de equilibrio del sistema acuífero con los

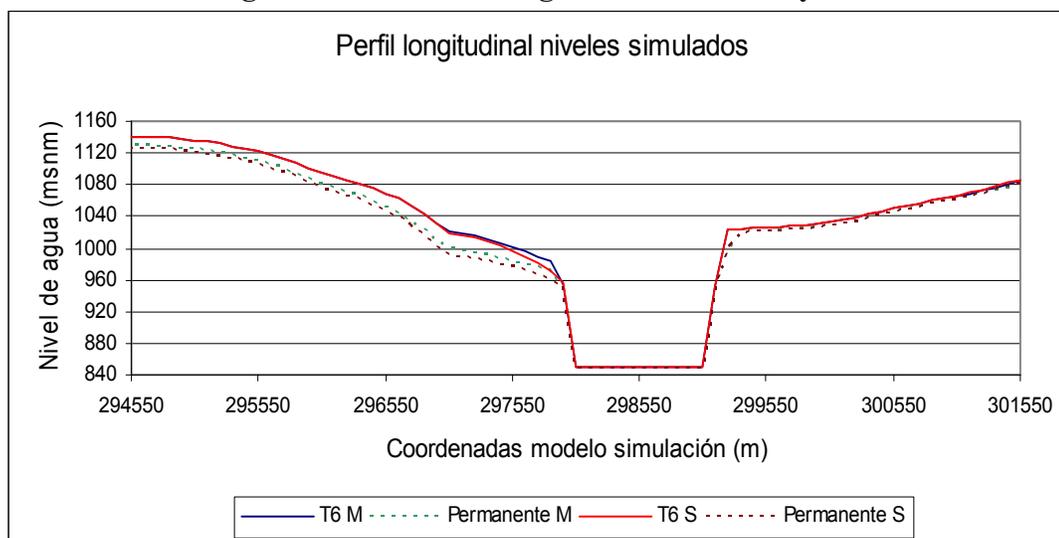
resultados obtenidos en el último período de simulación en régimen transiente. En las Figuras 5.26 y 5.27 se muestran en planta los niveles de agua subterránea y los vectores de velocidad obtenidos en la simulación en régimen permanente. También se observan cortes longitudinales, los cuales se localizan en la posición indicada en rojo en las vistas en plantas.

**Figura 5.26**  
**Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente (Visual MODFLOW)**





**Figura 5.28**  
**Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente y Transiente**

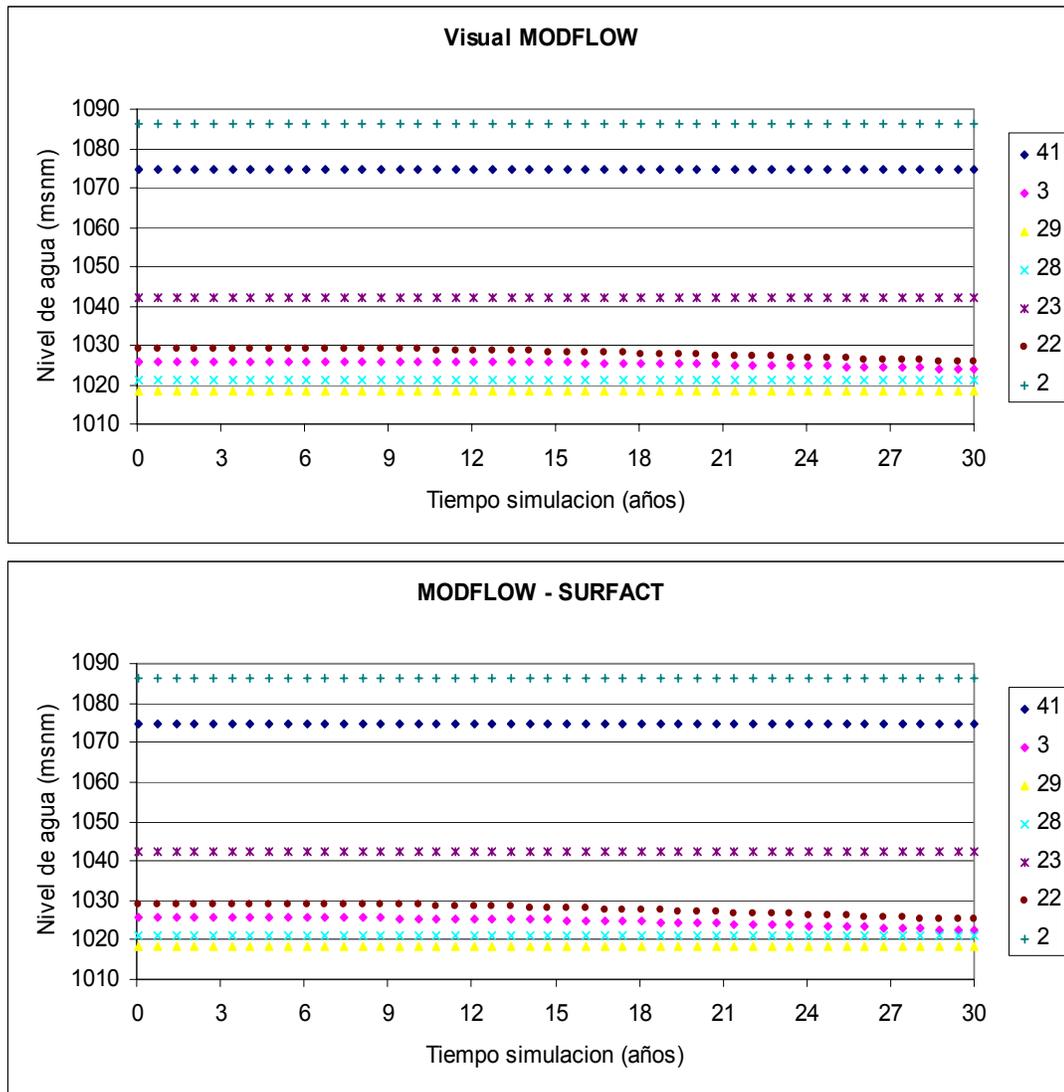


En la Figura 5.28 se observa que los niveles de aguas subterráneas simulados en el sector oeste del rajo con el programa MODFLOW – SURFACT tanto en régimen permanente como en transiente son levemente de menor magnitud (mayor descenso) que los niveles simulados con el Visual MODFLOW. La diferencia en los resultados obtenidos a través del Visual MODFLOW y el MODFLOW-SURFACT se debe a que ambos programas abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas, como se explicó en el capítulo anterior.

En las Figuras 5.22 a 5.27 de la distribución de niveles de aguas subterráneas simulados vistos en planta en la etapa de operación, se observa la ubicación de pozos de observación cercanos al rajo minero y al este del mismo (sector pueblo de Andacollo). Como se ha mencionado, en el acuífero en estudio se encuentra ubicada la Falla de Andacollo, la cual se caracteriza por presentar una conductividad hidráulica muy pequeña.

Los pozos de observación se incorporaron en el modelo hidrogeológico con el objetivo de analizar los efectos de la profundización del rajo sobre los niveles de agua subterránea a lo largo de los diferentes períodos de simulación en régimen transiente. La evolución de los niveles del agua subterránea en los pozos de observación se presenta en las Figura 5.29.

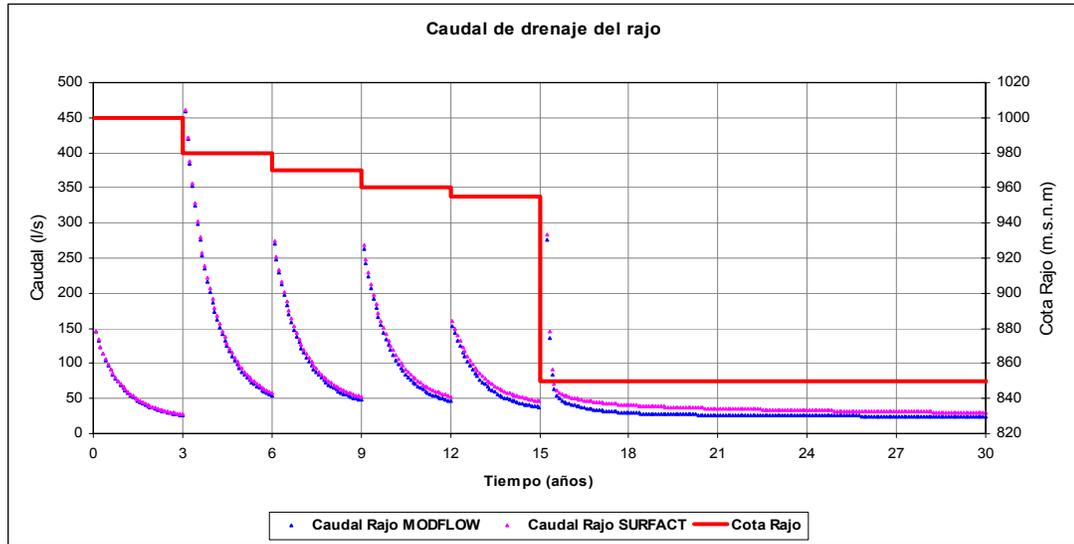
**Figura 5.29**  
**Evolución Temporal de Niveles de Agua Subterránea en Pozos de Observación**



Los resultados de este análisis muestran una situación muy diferente entre los pozos situados al este de la Falla de Andacollo (2, 23, 28 y 29) con respecto a los del sector oeste (3, 22 y 41). Se observa que los niveles en los pozos 2, 23, 28 y 29 no se ven afectados por la presencia del rajo, debido a que la Falla de Andacollo actúa como una barrera hidráulica. Con respecto, a los pozos ubicados al oeste, en el pozo 22 se comienza a observar un descenso en sus niveles a partir del décimo año de operación y en el pozo 3 a partir del dieciseisavo año. El pozo 41 no se ve afectado por el drenaje del rajo minero debido a que se encuentra en un sector alejado del rajo.

Al realizar el balance hídrico y analizar específicamente el caudal de salida del rajo, el caudal de salida a través del rajo es mayor en el caso del MODFLOW - SURFACT, esto debido al mayor gradiente hidráulico y área drenada que se obtiene con esta herramienta computacional. En la Figura 5.30 se observan los caudales de salida para las diferentes simulaciones realizadas en régimen transiente durante la profundización del rajo.

**Figura 5.30**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero**



Durante la etapa de operación el rajo minero inducirá la incorporación de aguas subterráneas hacia su interior debido a la creación de gradientes hidráulicos de gran magnitud. En la Figura anterior se observa que en los primeros períodos de tiempo se presentan caudales grandes, debido en gran parte a drenaje de agua almacenada en sus inmediaciones, lo que se va reduciendo paulatinamente a valores más estables, los que son aportados por flujos locales y drenaje de sectores más alejados desde el rajo.

En la Tabla 5.6 se observa el balance hídrico de la cuenca de Andacollo al final de la simulación de la etapa de operación en régimen transiente, cuando el rajo alcanza su máxima profundidad. El caudal de Recarga Total y el de Almacenamiento corresponden a entradas al sistema acuífero, mientras que el caudal del Rajo y el de Salida de la Cuenca corresponden a salidas del sistema en estudio.

Con este balance hídrico se verifica que el caudal de salida del rajo minero obtenido con el programa MODFLOW – SURFACT es mayor al obtenido con el Visual MODFLOW. Esto se debe a que los programas utilizados en este análisis abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas. Cabe mencionar, que gran parte del caudal de salida del rajo minero corresponde a agua subterránea almacenada en las inmediaciones del rajo. Se observa que el caudal de Salida de la Cuenca de 5.4 l/s se mantiene igual al obtenido en la etapa de validación del modelo hidrogeológico.

**Tabla 5.6**  
**Balance Hídrico Cuenca de Andacollo – Régimen Transiente**

Elemento	Caudal			
	MODFLOW		SURFACT	
	m <sup>3</sup> /d	l/s	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	1324.00	15.3	1324.00	15.3
<b>Almacenamiento</b>	1225.94	14.2	1729.15	20.0
<b>Rajo</b>	2084.50	24.1	2587.40	29.9
<b>Salida de la Cuenca</b>	467.46	5.4	466.48	5.4

En la Tabla 5.7 se presenta el balance hídrico de la cuenca de Andacollo para la máxima profundidad a ser alcanzada por el rajo minero en una situación de equilibrio del sistema acuífero. También en esta situación el caudal de salida del rajo obtenido con el MODFLOW – SURFACT es superior al alcanzado con el Visual MODFLOW. Si se comparan los caudales de salida del rajo en las simulación de los años 1975 (6.0 l/s) y 2005 (5.4 l/s), con la situación del rajo en su máxima profundidad, se concluye que la profundización del rajo resultará en una reducción paulatina de los caudales de salida desde la cuenca de Andacollo.

**Tabla 5.7**  
**Balance Hídrico Cuenca de Andacollo – Régimen Permanente**

Elemento	Caudal			
	MODFLOW		SURFACT	
	m <sup>3</sup> /d	l/s	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	1324.00	15.3	1324.00	15.3
<b>Rajo</b>	906.70	10.5	923.01	10.7
<b>Salida de la Cuenca</b>	417.31	4.8	401.02	4.6

Cabe mencionar, que bajo la profundidad de 955 msnm los caudales de salida del rajo y de la cuenca no se ven alterados por el drenaje del rajo, esto se debe a que el estrato superior del acuífero es el que conduce el agua subterránea, mientras que el estrato inferior (roca menos fracturada), se caracteriza por presentar una menor capacidad de conducción hidráulica. El resultado refleja la situación de este medio poroso no tradicional (roca fracturada), cuya fuente de recarga es la precipitación directa sobre la superficie, la cual se moviliza en los estratos más someros del suelo.

En el caso específico del rajo minero de Andacollo, el área afectada por el drenaje obtenida con el programa MODFLOW - SURFACT es mayor, presentando gradientes hidráulicos levemente mayores y por consiguiente el caudal de extracción del rajo minero es mayor, como se verificó mediante el balance hídrico y los niveles de aguas subterráneas simulados.

### 5.3 Caso mina “LC”

#### 5.3.1 Descripción general de la zona

La cuenca “LC” se ha supuesto ubicada en la parte alta de la Cordillera de Los Andes, esta zona corresponde al típico ambiente cordillerano caracterizado por cerros de gran altura labrados por el modelado glacial, como son los valles y los circos glaciares.

El sistema estudiado se ha esquematizado en la Figura 5.31, en la que se observa la delimitación de la cuenca “LC”, siendo sus límites los siguientes: por el nor-noreste el interfluvio Quebrada A, por el oeste el río B y por el este-sureste la divisoria de aguas del Cordón C.



El sector se extiende hacia el este a partir del río B, a una cota superior a los 3000 msnm, de modo que incluso bajo esa altura, los mecanismos del periglacialismo son permanentes desde el momento en que la temperatura baja de 0° C.

En el área de estudio no existen formas ni depósitos de evidente origen glaciar. Los afloramientos rocosos, afectados en mayor o menor grado por la gelifracción, son morfológicamente aparentes en la medida que se han comportado como materiales resistentes a la erosión diferencial, siendo visibles en la zona cuando constituyen prominencias topográficas, o materializan puntos culminantes en los interfluvios. En esa misma óptica, las rocas del Cretácico Inferior – Jurásico Superior, situadas en el sector oriental de la zona de estudio, han actuado como materiales resistentes, formando prominencias rocosas que desvían el escurrimiento encausado del sector.

Desde el punto de vista geológico, a continuación se describen los aspectos más relevantes del área de estudio, con énfasis en las unidades de suelo y roca, y las principales estructuras.

Las unidades de suelos encontradas en el sector corresponden a depósitos no consolidados fluviales, aluviales y coluviales. Muchos de estos depósitos por su origen periglacial son depósitos coluviales.

Los depósitos fluviales se encuentran rellenando los actuales cauces de los ríos y quebradas, están compuestos por gravas y arenas con algunos niveles de limos y arcillas, presentando un importante redondeamiento y esfericidad y una alta permeabilidad.

Los depósitos aluviales indiferenciados se encuentran rellenando los valles y algunas quebradas, están compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas con clastos con algo de redondeamiento y esfericidad, presentando una alta permeabilidad en sus facies gruesas y una menor en sus facies más finas.

Los depósitos coluviales indiferenciados se encuentran cubriendo las laderas de los cerros y en especial aquellos sectores con cambio de pendiente, compuestos por materiales provenientes de la meteorización “in situ” del sustrato rocoso con una variada granulometría, bajo redondeamiento y buena selección, presentando una permeabilidad de media a alta.

Las unidades de rocas encontradas en el sector corresponden a rocas estratificadas y rocas intrusivas. Las rocas estratificadas más antiguas del sector son del Paleozoico Superior y las más modernas, sin considerar los sedimentos cuaternarios no consolidados, son del Terciario Superior-Cuaternario Inferior. Actualmente, las formaciones pre-terciarias ocupan los bajos topográficos, es decir, laderas y fondos de valles, mientras las gravas se disponen sobre los interfluvios.

Las rocas intrusivas encontradas en el sector corresponden a basamento Paleozoico y a rocas intrusivas terciarias. El basamento Paleozoico corresponde a granitos de grano grueso, granodioritas y dioritas con gneis y migmatitas subordinadas que afloran inmediatamente al oriente y al sur de río B. Las rocas intrusivas terciarias se presentan en pequeños afloramientos dispersos en la parte central-norte del área; corresponden a granitos, dioritas, pórfidos granodioríticos, dioríticos y tonalíticos. Estos intrusivos son los responsables de la mineralización del depósito de cobre en el sector.

Las estructuras tectónicas reconocidas en el sitio son tanto de carácter regional como local; estas últimas están asociadas a las primeras por pertenencia a un determinado dominio estructural. Al interior de este conjunto de estructuras se combinan fallas inversas con fallas normales. Se han reconocido dos sistemas principales, uno NS y otro NW. Desde el punto de vista regional, las fallas de mayor relevancia son las NS; éstas, al igual que en otros lugares del territorio nacional controlan tanto la morfología como la mineralización. El sistema NW, comprendido mayoritariamente por fallas normales o en extensión, controla la mineralización y el emplazamiento de los intrusivos, vetas, patrón de alteración y los stockworks en el sector.

### 5.3.1.2 Hidrogeología

En la cuenca “LC” se han reconocido dos sistemas de aguas subterráneas principales: una unidad de flujo en los depósitos o rellenos sedimentarios, localizada en la base y márgenes de las quebradas que forman parte de “LC”; y una unidad de flujo fracturado asociado a las rocas basales intrusivas y volcánicas que se ubican por debajo de los depósitos sedimentarios. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de estas unidades hidrogeológicas.

- **Relleno sedimentario:**

Está compuesto por la cubierta detrítica periglacial, depósitos fluviales, depósitos aluviales indiferenciados y coluviales indiferenciados. Los espesores para los depósitos sedimentarios identificados son entre menos de un metro a más de 30 m.

La cubierta detrítica periglacial tiene un espesor  $< 2$  m, constituida por clastos angulosos de tamaño variable desde centímetros hasta metros. La permeabilidad estimada para la cubierta detrítica es del orden de  $10^{-1}$  a 1 m/d. Por su alta permeabilidad esta unidad permite que el agua se infiltre hacia las unidades inferiores. No es considerada un potencial acuífero, ya que no es capaz de almacenar el agua.

Los depósitos fluviales, son depósitos no consolidados, compuestos por gravas y arenas con algunos niveles de limos y arcillas con un importante redondeamiento y esfericidad y una permeabilidad estimada del orden de  $10^{-1}$  a 1 m/d.

Los depósitos aluviales indiferenciados están compuestos por sedimentos no consolidados, gravas, arenas, limos y arcillas con clastos con algo de redondeamiento y esfericidad y una permeabilidad estimada del orden de  $10^{-2}$  a 1 m/d.

Los depósitos coluviales indiferenciados provenientes de la meteorización “in situ” del sustrato rocoso tienen una variada granulometría, bajo redondeamiento y buena selección y una permeabilidad media a alta, menor que 1 m/d.

- **Basamento rocoso:**

Está compuesto por una gruesa secuencia de depósitos polimícticos y roca fracturada. Los espesores del basamento rocoso varían considerablemente de un lugar a otro, alcanzando en algunos lugares más de 300 m.

Los depósitos polimícticos están compuestos por gravas, arenas y limos de origen fluvio-aluvial con algunas intercalaciones de ignimbritas, las que presentan un bajo grado de consolidación. Por su bajo grado de compactación, su constitución y origen, su permeabilidad estimada se encuentra en el rango de  $10^{-1}$  a 1 m/d.

Las rocas que forman parte de la zona de estudio tienen un alto grado de fracturamiento y son rocas blandas a moderadamente duras. En el sector existen tramos de rocas permeables a muy permeables, con permeabilidades (K) entre  $10^{-2}$  a  $10$  m/d, rocas semipermeables con K entre  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  m/d, y rocas impermeables con K inferiores a  $10^{-3}$  m/d.

Para la caracterización de las propiedades hidrogeológicas (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) se utilizó información proveniente de sondajes, calicatas, estudios geofísicos y geológicos realizados en el sector. Para la estimación de las propiedades hidrogeológicas en la cuenca "LC" se utilizó información de Ensayos de Lugeon, Lefranc, pruebas de infiltración y de bombeo en diversos sondajes. También se utilizó información de pruebas de infiltración de tipo Porchet para obtener información sobre la permeabilidad más superficial.

La información de las pruebas de infiltración realizadas en diversos sondajes permitieron determinar las conductividades hidráulicas de las diversas secciones o estratos analizados. Los valores de conductividad hidráulica obtenidos muestran que dentro de los estratos de suelos superficiales existe una alta conductividad hidráulica variando entre  $10^{-1}$  a  $100$  m/d y en la medida que se observan ensayos realizados en muestras más profundas los valores de conductividad hidráulica disminuyen, variando desde  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$  m/d. Esto último indicaría que los estratos de suelos inferiores presentan un mayor grado de consolidación y resistencia al flujo de agua.

La transmisibilidad y el almacenamiento del acuífero fueron calculados mediante información de pruebas de bombeo realizadas en diversos sondajes, encontrándose para la primera propiedad hidrogeológica valores que van desde  $0.05$  m<sup>2</sup>/d a  $0.20$  m<sup>2</sup>/d. El valor encontrado para el almacenamiento del acuífero es del orden del 5%. Durante la prueba de bombeo no se detectaron cambios en los niveles de agua subterránea a lo largo de su desarrollo.

El análisis del flujo subterráneo se basa en las curvas equipotenciales obtenidas de mediciones del nivel freático en sondajes y calicatas para el año 2007. A partir de las curvas equipotenciales y considerando también la topografía del sector de "LC", es posible establecer un comportamiento general de los flujos subterráneos, los cuales están orientados principalmente desde las laderas hacia el fondo de las quebradas y desde allí hacia el punto de salida de "LC".

La precipitación que cae en la cuenca "LC" controla las variaciones de caudales superficiales y sustenta la recarga que alimenta al sistema acuífero existente. Las variaciones principales en los caudales superficiales ocurren en los meses de verano producto de los deshielos, los cuales en parte se infiltran hacia el acuífero.

El balance hídrico realizado para el área de estudio, indica una recarga media anual efectiva al sistema de aguas subterráneas del orden de  $10$  a  $20$  mm/año. El balance hídrico incorpora las pérdidas evapotranspirativas de los sectores con y sin vegas.

### 5.3.2 Modelo conceptual adoptado

Sobre la base de la información geológica, tanto en superficie como en sub-superficie y la información de pruebas hidráulicas para determinar parámetros hidrogeológicos, se concluye que el sector en estudio alberga un acuífero libre dispuesto en los fondos de los valles y que sobreyace a un sistema acuífero fracturado que se presenta en rocas ígneas y volcánicas.

En la cuenca “LC” se han reconocido tres unidades hidrogeológicas principales, las que se apoyan sobre un nivel de roca sana. Para efectos de este análisis se ha incluido la roca basal como una cuarta unidad hidrogeológica. Las unidades hidrogeológicas identificadas en el área de estudio son las que se indican a continuación.

- **Unidad hidrogeológica I:**

Alberga parte del acuífero libre y está conformada por depósitos fluviales, aluviales y coluviales de fondo de quebrada. Se encuentra localizada a lo largo de toda el área de estudio. Su espesor aproximado es de 15 m, presentando una permeabilidad horizontal de 1 m/d y de  $10^{-1}$  m/d en la vertical, debido a las diferencias entre las distintas capas de suelo.

- **Unidad hidrogeológica II:**

Conformada por rocas intrusivas y volcánicas muy fracturadas y/o permeables, con un orden de permeabilidad de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$  m/d. Su espesor aproximado es de 25 a 30 m, cercanos a los lechos de quebradas principales y hasta 70 m como máximo para los sectores lejanos de éstas.

- **Unidad hidrogeológica III:**

Corresponde al tramo más profundo del acuífero libre, constituido también por rocas intrusivas y volcánicas. Su espesor aproximado es de 50 a 100 m, con conductividades hidráulicas entre  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  m/d.

- **Unidad hidrogeológica IV:**

Conformada por roca basal que se encuentra sana y/o escasamente fracturada, caracterizándose por ser impermeable. El espesor considerado para esta unidad corresponde a 1200 m, con una permeabilidad variable entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  m/d.

Cabe mencionar que las conductividades hidráulicas finales se determinaron por medio de un proceso de calibración.

Para la recarga al sistema subterráneo se consideró la tasa de recarga promedio en la cuenca que es de 20 mm/año, lo que corresponde a una recarga total de 29 l/s.

### 5.3.3 Modelo numérico de la cuenca “LC”

Para el modelo numérico de la cuenca “LC” se ha supuesto que el sistema de aguas subterráneas en la cuenca se puede asimilar a un medio poroso tradicional, lo que permite utilizar herramientas clásicas en la modelación de estos sistemas. En este caso particular, se han utilizado los programas Visual MODFLOW 4.2 y MODFLOW – SURFACT 2.2.

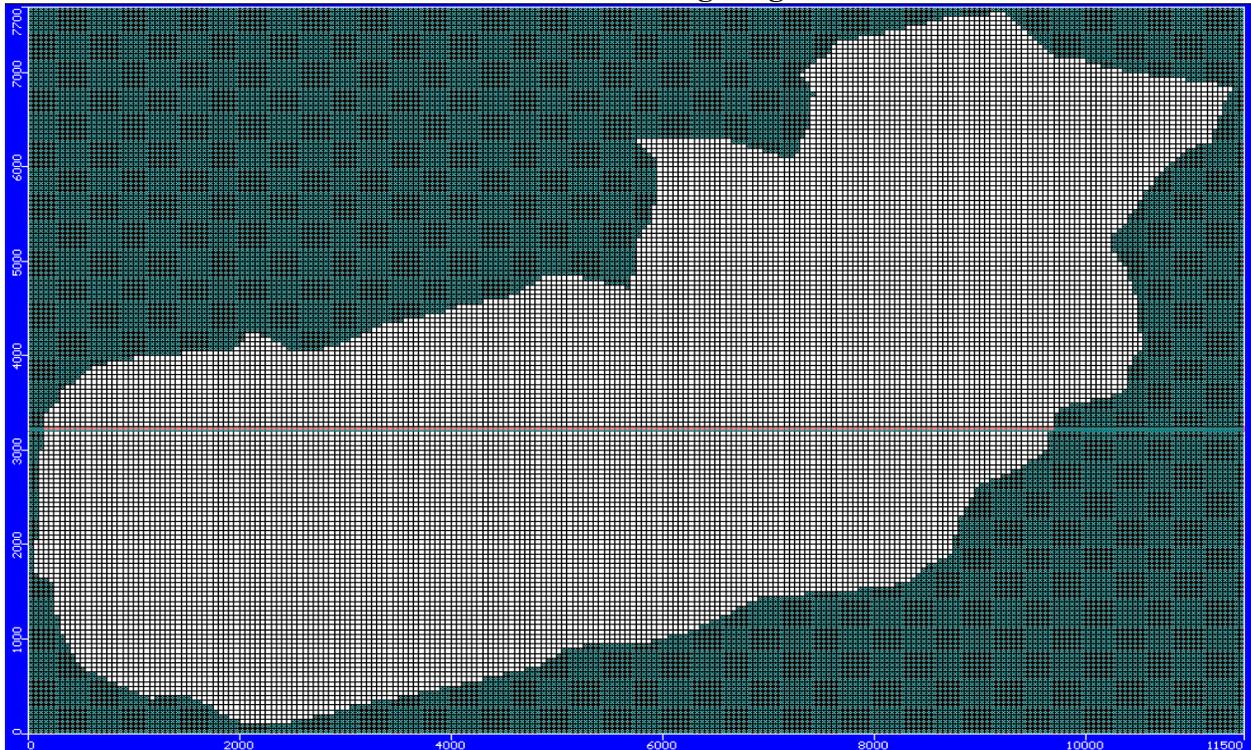
El objetivo de la modelación numérica del sistema hídrico subterráneo de la cuenca “LC” es evaluar los potenciales impactos del drenaje del rajo minero sobre los niveles de agua subterránea en las inmediaciones.

#### 5.3.3.1 Descripción del modelo numérico

El sistema acuífero de la cuenca “LC” se ha discretizado horizontalmente mediante una malla de diferencias finitas con elementos regulares, la cual está conformada con celdas cuadradas de 50 m x 50 m. Los límites de la zona de modelación coinciden con las divisorias de aguas de las cuencas

de drenaje superficial. La Figura 5.32 muestra una vista en planta de la grilla de simulación utilizada para el modelo numérico, la zona de color blanco corresponde al área del acuífero.

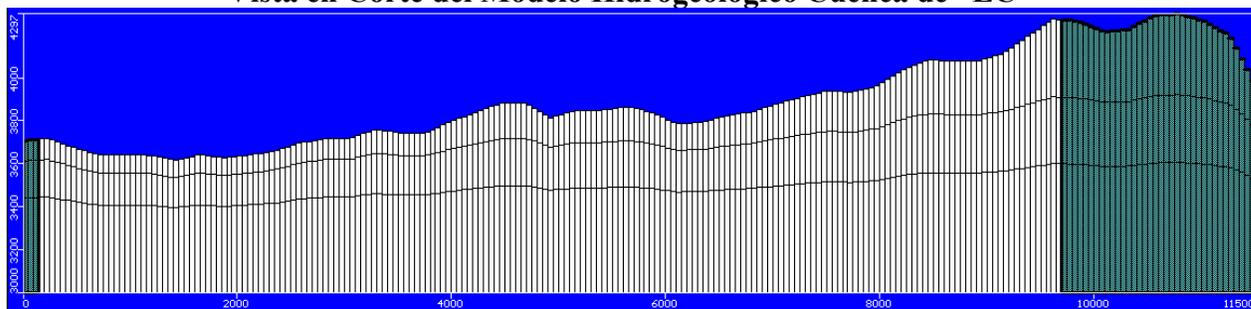
**Figura 5.32**  
**Vista en Planta del Modelo Hidrogeológico Cuenca “LC”**



Para la discretización espacial vertical inicialmente se consideró un sistema acuífero constituido por cuatro estratos, de acuerdo a las unidades hidrogeológicas definidas en el modelo conceptual del sistema acuífero.

Para reducir los problemas numéricos asociados a la solución del problema real, se agruparon los dos primeros estratos, en un estrato equivalente. El espesor del estrato equivalente es la suma de los dos primeros estratos identificados para el modelo conceptual y las propiedades hidrogeológicas asignadas a éste representan el efecto hidráulico de los dos primeros estratos. De este modo se minimizan las áreas con zonas secas y los problemas de convergencia. La Figura 5.33 muestra un corte vertical del acuífero, el cual se localiza en la posición indicada en rojo en la Figura 5.32. En la vista en corte se aprecia que cada estrato sigue la forma del terreno.

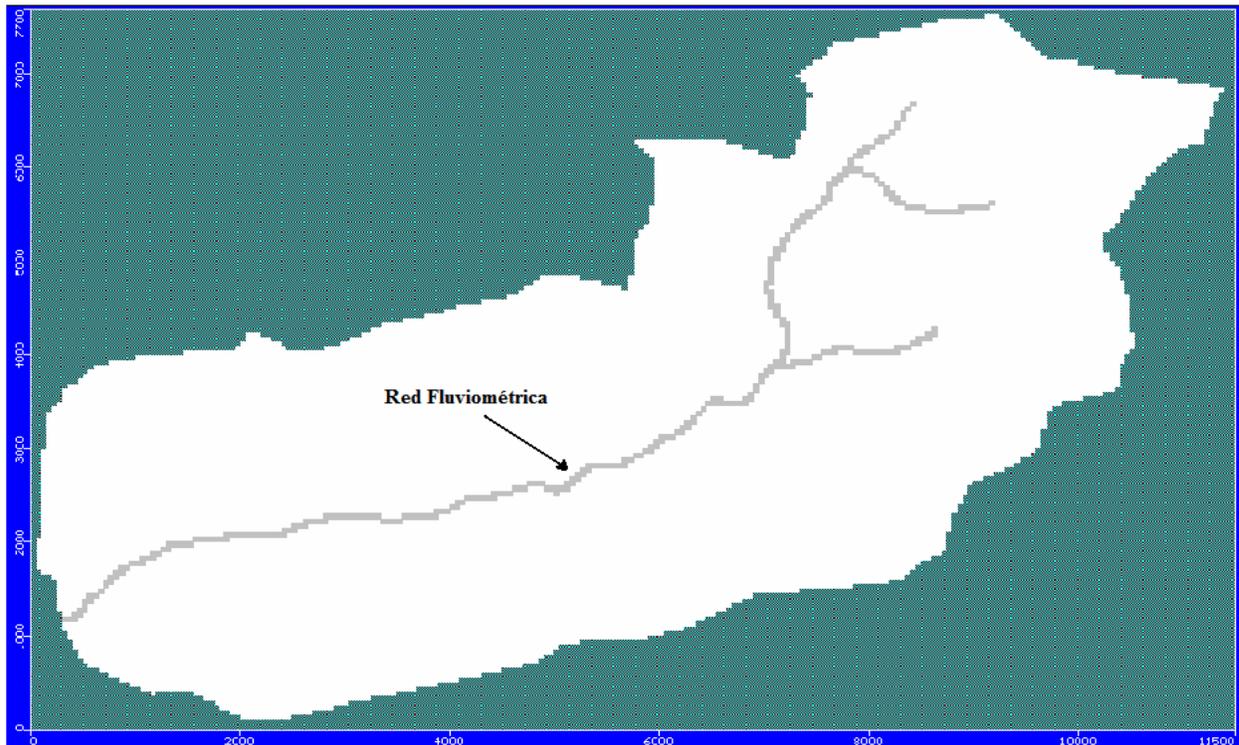
**Figura 5.33**  
**Vista en Corte del Modelo Hidrogeológico Cuenca de “LC”**



Las propiedades hidrogeológicas han sido estimadas en algunos sectores aislados a partir de ensayos de infiltración, pruebas de tipo “slug test” y ensayos de Lugeon en sondajes geotécnicos. El rango obtenido para la conductividad hidráulica va desde  $10^{-3}$  m/d hasta  $10^{-9}$  m/d. Los valores finales de la conductividad hidráulica serán posteriormente calibrados para lograr el ajuste de los niveles de agua subterránea medidos y simulados.

La condición de borde utilizada para representar la fluviometría de la cuenca “LC” es de tipo dren. En este caso particular, se supone que todas las recargas desde los cauces principales hacia el acuífero son calculadas por un modelo superficial, de modo que no es necesario incorporar de manera explícita un sistema de evaluación para la recarga específica que provendría de la infiltración del lecho de éstos, puesto que la condición de borde de tipo dren se caracteriza por no permitir la infiltración o recarga de aguas desde el cauce hacia el acuífero. Los parámetros utilizados por esta condición de borde son la conductancia del lecho de los cauces y la elevación del dren en cada celda, la última corresponde al nivel de terreno en la celda. La Figura 5.34 muestra la red fluviométrica que se incorporó al modelo de simulación hidrogeológico.

**Figura 5.34**  
**Red Fluviométrica Cuenca de “LC”**



Para el modelo hidrogeológico de la cuenca de “LC” se han considerado las mismas condiciones de borde para las fases de calibración y validación.

En el caso, de las acciones externas se debe considerar la información de bombeos, recargas naturales o artificiales y descargas. En este caso, se debe disponer de datos medidos en terreno o estimados a partir de información secundaria que permitan cuantificar los montos de estas acciones.

Para la recarga al sistema subterráneo se consideró la tasa de recarga promedio en la cuenca que es de 20 mm/año, lo que corresponde a una recarga total de 29 l/s.

En la zona de estudio no existen pozos de extracción de agua y el río corresponderá a una zona de afloramiento o de descarga de aguas subterráneas.

### 5.3.3.2 *Calibración*

En la fase de calibración del modelo de simulación hidrogeológico se ha considerado que el sistema acuífero se encuentra en una situación de equilibrio, en la cual los niveles de agua subterránea son el resultado de un equilibrio de los flujos de entrada y salida del sistema. Esta consideración se basa en que la información medida en los pozos de observación no muestra grandes variaciones del nivel estático en el período de análisis.

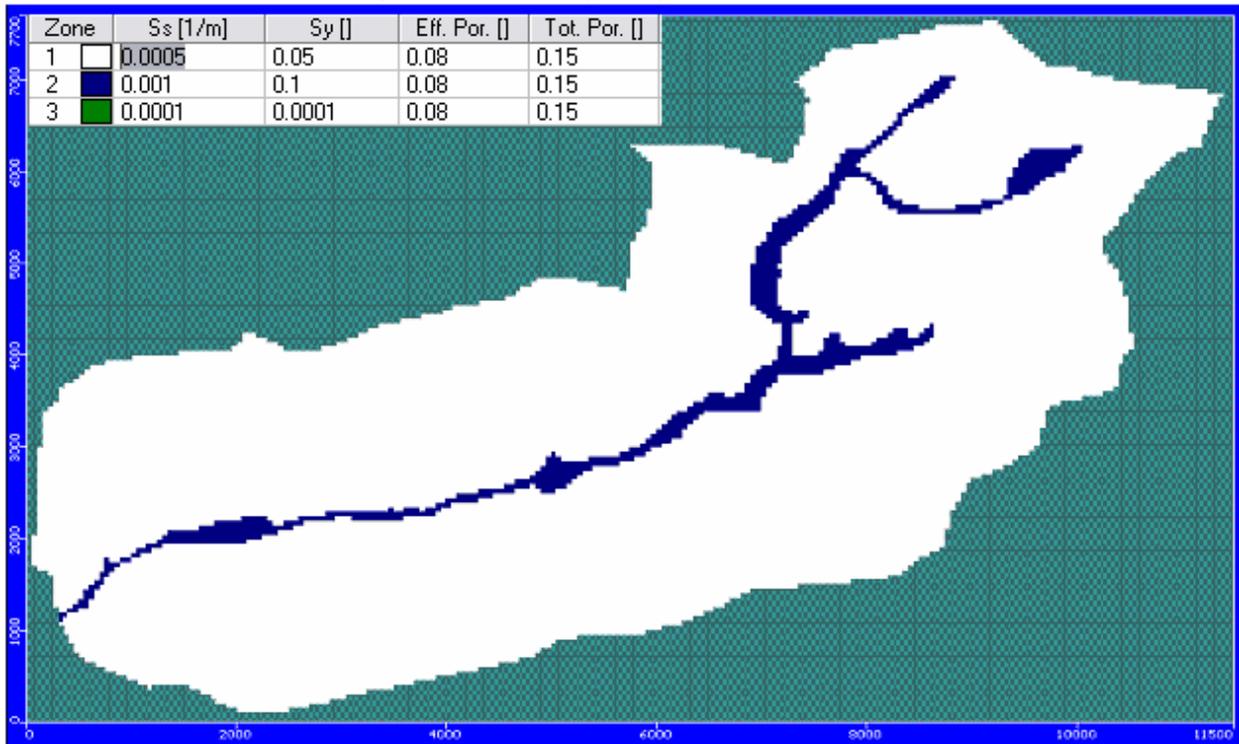
Para efectos de la modelación se considera que esta situación se puede representar a través de una simulación en régimen permanente, lo que permite enfocar el ajuste de los parámetros en los valores de la conductividad hidráulica.

La información disponible de niveles de aguas subterráneas medidos se ha separado en dos conjuntos de datos, uno de los cuales se utiliza para la calibración y el segundo para la validación del modelo. El primer conjunto de datos corresponden a los niveles de agua subterránea más confiables y el segundo conjunto considera todos los sondajes y pozos mineros que se midieron durante las campañas de terreno.

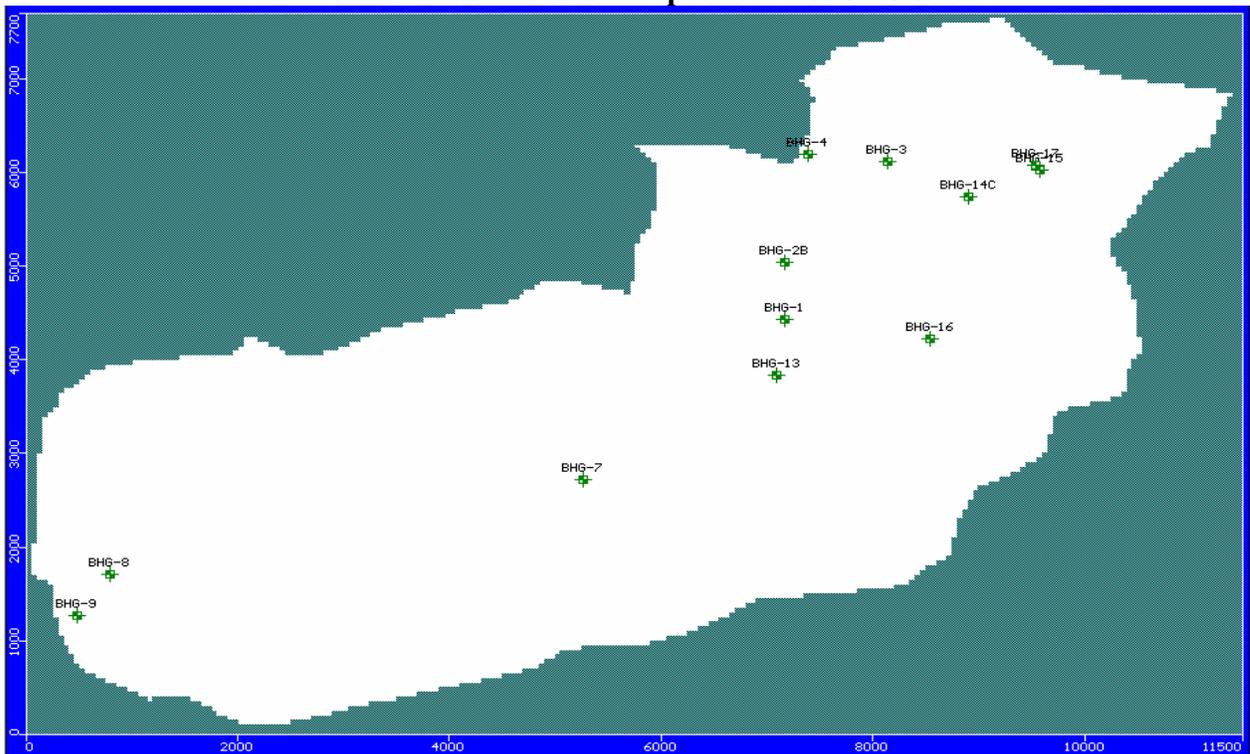
La calibración del modelo de simulación se la realizó a través del programa Visual MODFLOW, el cual se mencionó anteriormente, cuenta con una gran aceptación a nivel mundial por diversos organismos fiscalizadores para la simulación del flujo de agua subterránea, entre estos organismos se encuentra la Dirección General de Aguas de Chile.

Los parámetros hidrogeológicos utilizados en el modelo de simulación se observan en la Figura 5.35, en la cual la zona 3 (verde) corresponde a las propiedades del estrato 2 y 3. Durante la fase de calibración se utilizaron las condiciones de borde presentadas en la Figura 5.34 y una recarga total de 20 mm/año, la que se distribuyó uniformemente sobre toda el área de la cuenca. Para la fase de calibración se dispone de 12 puntos con información de niveles medidos de agua subterránea, los cuales se pueden apreciar en la Figura 5.36.

**Figura 5.35**  
**Propiedades Hidrogeológicas Cuenca “LC”**

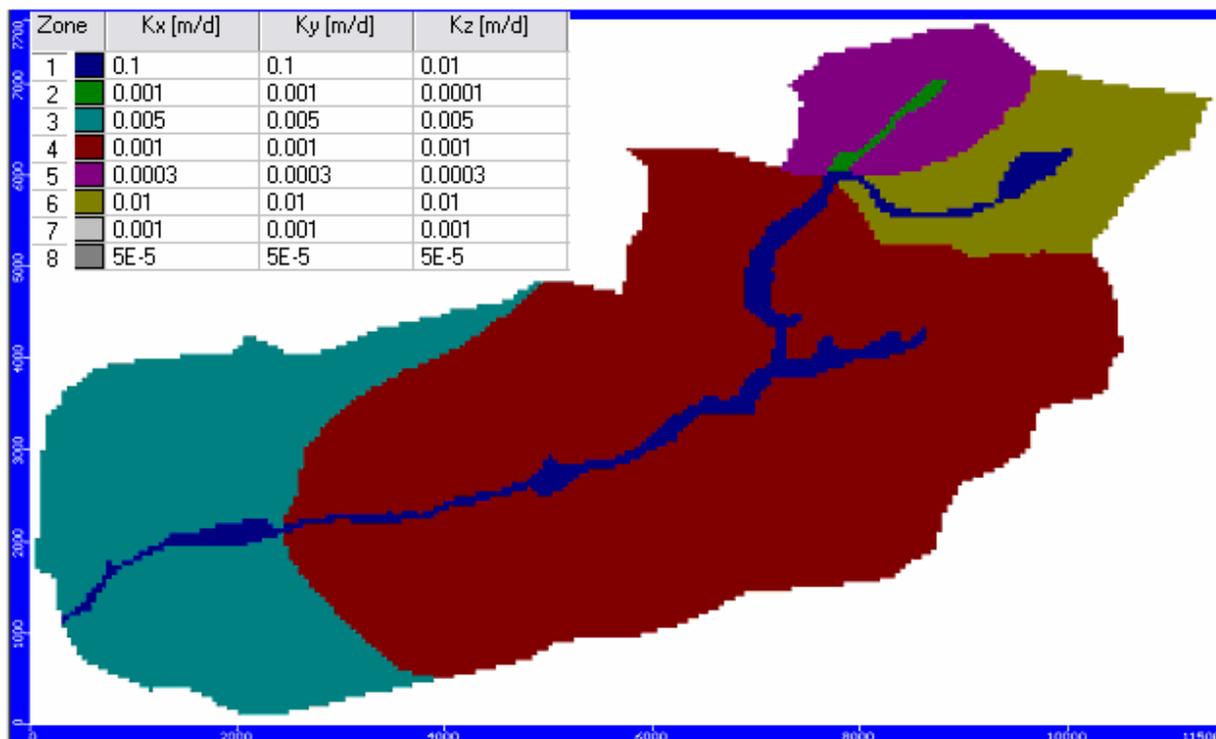


**Figura 5.36**  
**Ubicación de Puntos con Datos para la Calibración “LC”**



Durante la fase de calibración se modificaron los valores de la conductividad hidráulica hasta conseguir que los valores medidos y simulados de los niveles de agua en los 12 puntos fueran lo más parecidos posibles entre ellos. Las modificaciones de la conductividad hidráulica se realizaron dentro de los rangos indicados previamente para cada unidad hidrogeológica. La distribución final de la conductividad hidráulica obtenida del proceso de calibración para el primer estrato se presenta gráficamente en una vista en planta en la Figura 5.37. En el segundo y tercer estrato, se obtuvo un único valor de conductividad hidráulica para cada estrato, los cuales fueron de 0.001 m/d y  $5 \times 10^{-5}$  m/d, respectivamente.

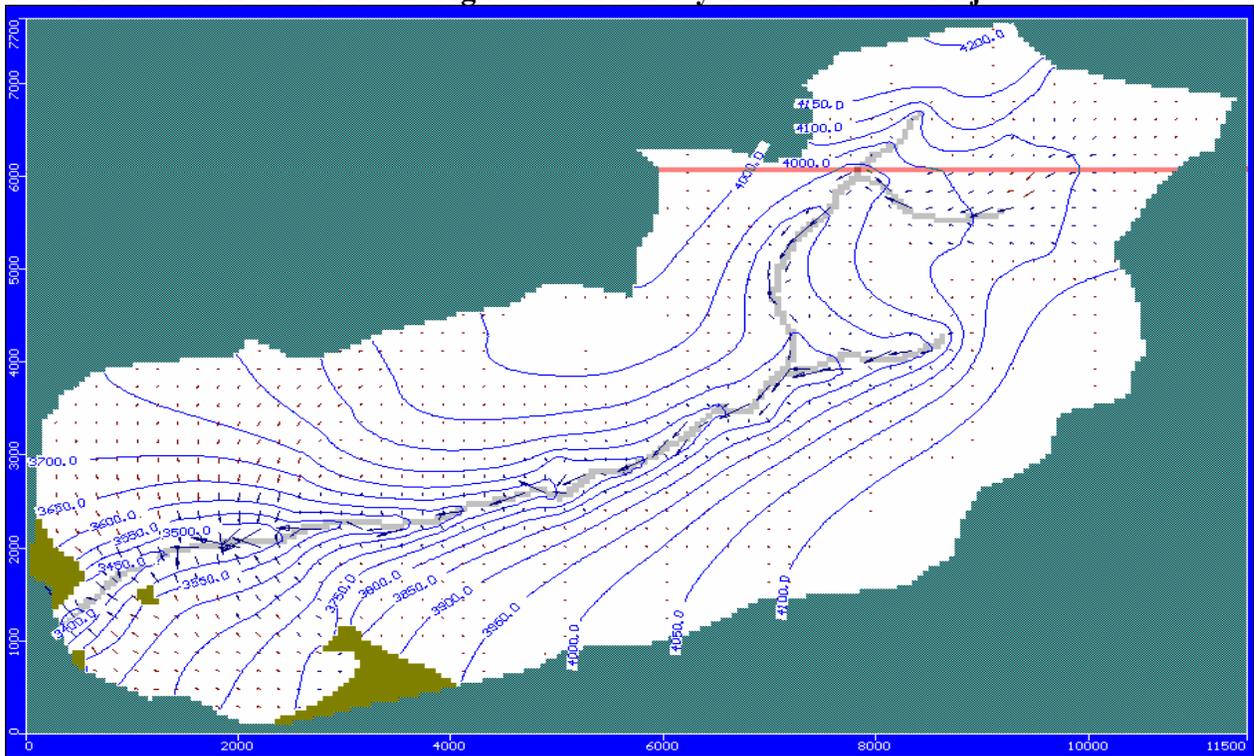
**Figura 5.37**  
**Distribución Final de Conductividades Hidráulicas – “LC”**



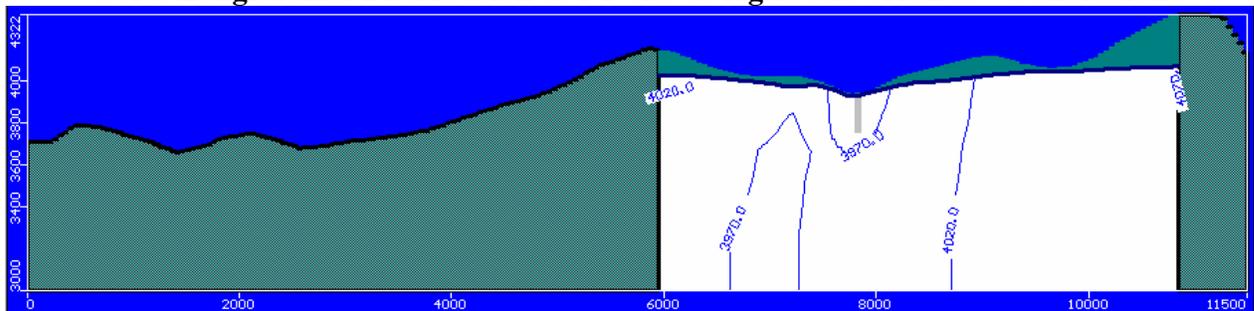
La calibración del modelo se realizó mediante el proceso de prueba y error, obteniendo un ajuste global satisfactorio entre los valores medidos y simulados. El ajuste se mide a través de indicadores de bondad de ajuste, siendo el indicador más utilizado para medir la calidad del ajuste el Normalized RMS (Root Mean Squared), el cual alcanzó un valor de 2.82%, lo que se considera como adecuado para una calibración en condiciones de régimen permanente. La Figura 5.38 resume los principales indicadores de ajuste para el proceso de calibración y muestra una comparación gráfica entre los valores medidos y simulados de los niveles de agua en la cuenca “LC”.



**Figura 5.39**  
**Distribución de Niveles de Agua Subterránea y Direcciones de Flujo - Calibración**



**Figura 5.40**  
**Corte Longitudinal Distribución de Niveles de Agua Subterránea – Calibración**



Se realizó un balance hídrico del modelo de “LC” para evaluar los flujos subterráneos en el sistema acuífero, generando dos zonas de balance: la Zona 1 corresponde a toda el área de modelación y la Zona 2 corresponde a los flujos a través de la condición de borde de tipo dren, la cual representa los cauces superficiales principales. La Tabla 5.8 presenta los resultados obtenidos del balance hídrico.

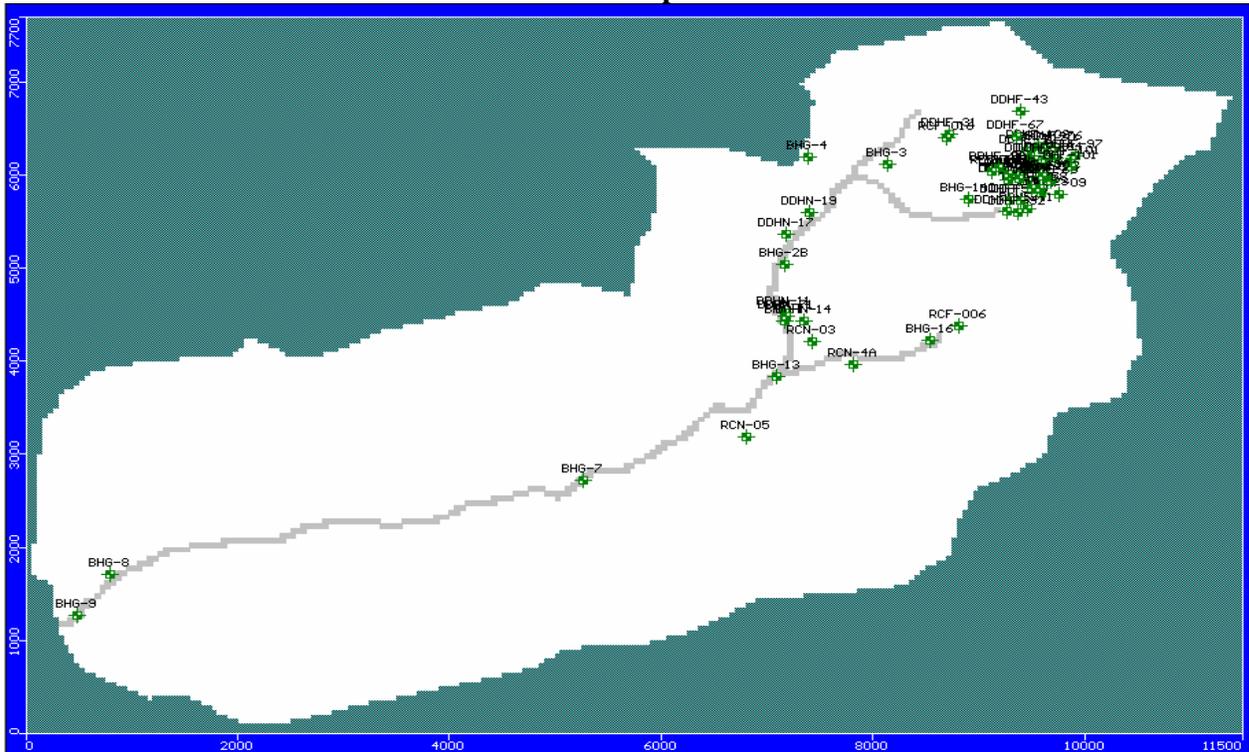
**Tabla 5.8**  
**Balance Hídrico de la Cuenca “LC”**

Elemento	Caudal	
	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	2469.20	28.6
<b>Cauces Superficiales</b>	2469.93	28.6

### 5.3.3.3 Validación

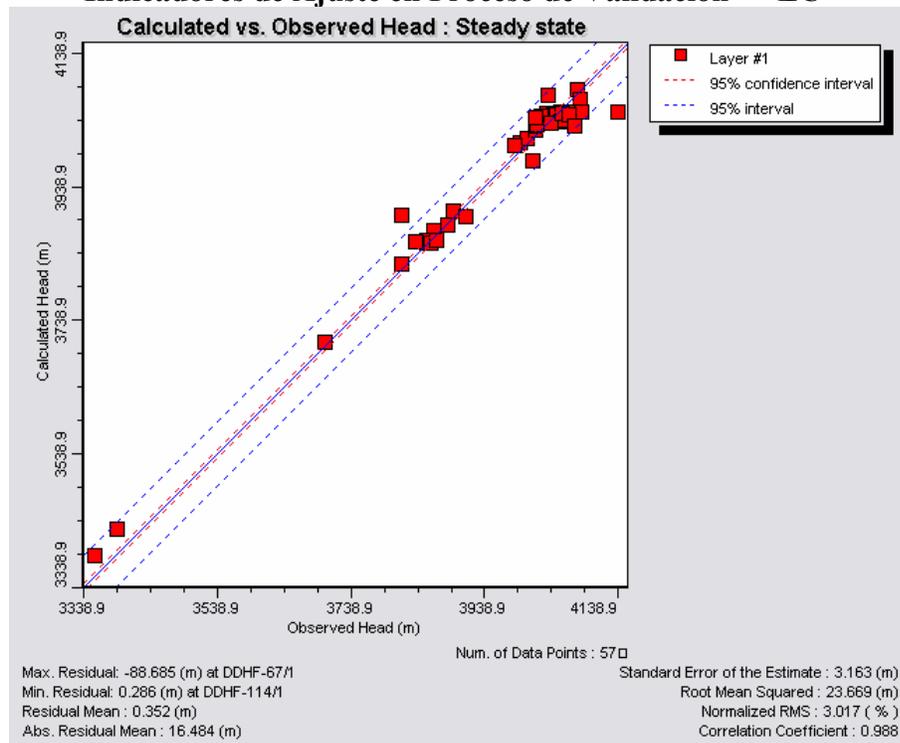
Como complemento a la fase de calibración se llevó a cabo la validación del modelo de simulación hidrogeológico. En esta fase se incorporó la información de niveles de agua subterránea que fueron medidos en 45 pozos, calicatas y sondajes físicos en la cuenca “LC”, los que se ubican en las posiciones señaladas en la Figura 5.41.

**Figura 5.41**  
**Ubicación de Puntos con Datos para la Validación – “LC”**



En la Figura 5.42 se observa el buen ajuste que presentan los 57 puntos disponibles (total de los dos conjuntos de datos disponibles) en el área de interés, con un valor del RMS Normalizado de 3.0%.

**Figura 5.42**  
**Indicadores de Ajuste en Proceso de Validación – “LC”**



#### 5.3.3.4 *Análisis de sensibilidad*

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad fue necesario incorporar en el modelo hidrogeológico el futuro rajo minero, el cual se representó con la condición de borde de tipo dren. En esta fase se evaluó la solución del modelo hidrogeológico para diversos valores de la conductancia del dren en la cuenca “LC”. La elevación del dren, la cual representa la cota de fondo del rajo, en este análisis corresponde a 3950 msnm.

La conductancia es un parámetro de la condición de borde de tipo dren que describe la pérdida de carga entre el dren y el sistema de agua subterránea. Como se mencionó anteriormente, en la mayor parte de las situaciones, la información requerida para calcular la conductancia del dren no está disponible, por lo cual en este análisis el modelo de simulación se operó en régimen permanente para valores de conductancia entre 100 y 0.00001 m<sup>2</sup>/d.

En la Tabla 5.9 se presentan los resultados obtenidos del balance hídrico realizado para diferentes valores de la conductancia del dren obtenidos con el modelo de simulación en régimen permanente. Se puede observar que a medida que el valor de la conductancia va disminuyendo el caudal de extracción del rajo (dren) disminuye. Con una conductancia de 0.00001 m<sup>2</sup>/d el caudal de salida del rajo es de 0 l/s, debido a que la zona acuífera donde se encuentra el rajo presenta una conductividad hidráulica superior a la conductancia del dren, por lo tanto, el dren no es capaz de extraer agua del sistema acuífero, porque opone mayor resistencia al flujo del agua que el acuífero en sí.

**Tabla 5.9**  
**Balance Hídrico para Diferentes Conductancias**

Elemento	Caudal (l/s)							
	C=100	C=10	C=1	C=0.1	C=0.01	C=0.001	C=0.0001	C=0.00001
<b>Recarga Total</b>	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3
<b>Rajo</b>	2.7	2.1	2.0	2.0	1.7	0.7	0.1	0.0
<b>Cauces Sup.</b>	24.3	24.3	24.3	24.4	24.6	25.6	26.2	26.3

Como se mencionó anteriormente, la condición de borde de dren podría compararse análogamente con el funcionamiento de una tubería, en la cual la conductancia vendría a ser la válvula de paso de agua que se puede ir abriendo o cerrando para regular el flujo de agua. En el caso que el valor de la conductancia del dren sea menor a la conductividad hidráulica del sector donde se encuentra el dren, la válvula de paso de agua se encontraría cerrada y el flujo de agua a ser extraído por el dren sería casi o completamente nulo.

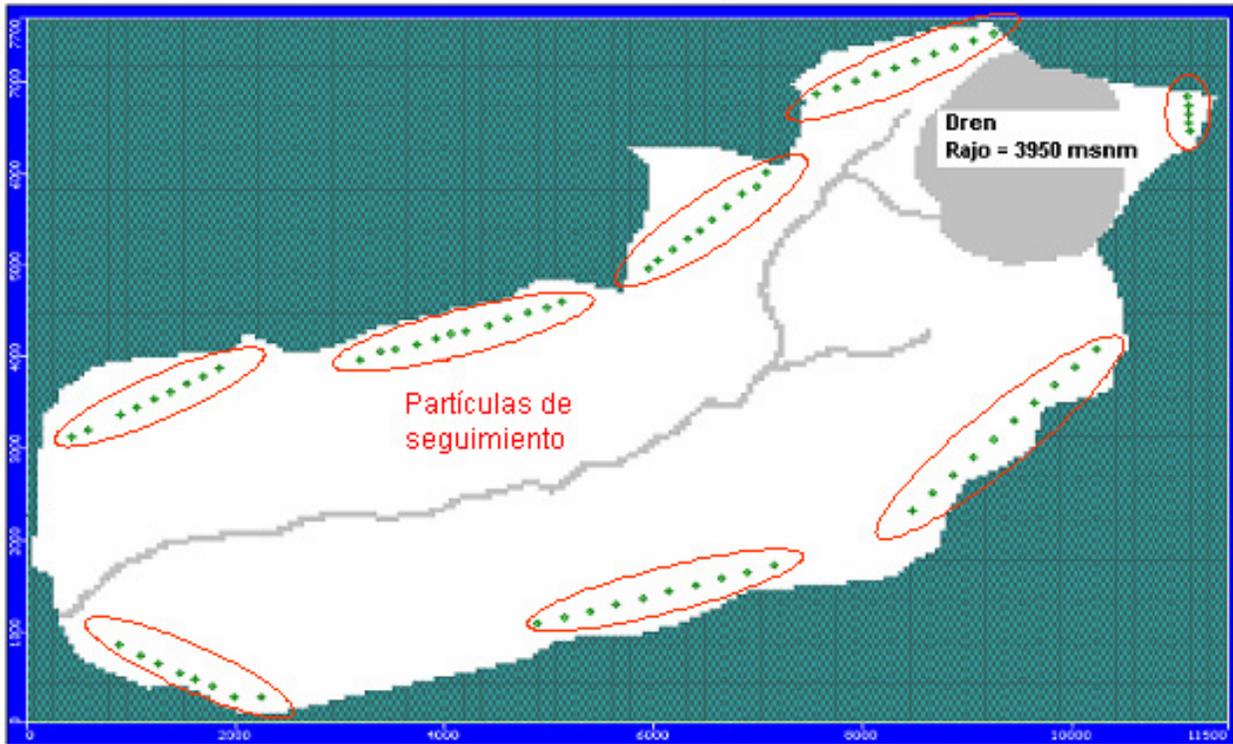
En el caso contrario, cuando el valor de la conductancia es mayor a la conductividad hidráulica, a medida que se va abriendo la válvula de paso (incremento conductancia) el flujo a ser extraído va aumentando. Hasta llegar al punto, en el que aunque se siga abriendo la válvula, el flujo extraído por el dren no aumentará, porque el flujo de salida en ese caso se encontrará condicionado por la permeabilidad del material que conforma el acuífero en el sector de la condición de borde (ver Tabla 5.9). En la cuenca “LC” la conductividad hidráulica del sector acuífero donde se encuentra el dren va de 0.0003 m/d a 0.01 m/d (ver Figura 5.37).

En el análisis de sensibilidad de la conductancia del dren se utilizó el programa computacional MODPATH para realizar el seguimiento de partículas en los datos de salida de la simulación de los flujos subterráneos en régimen permanente obtenidos a través del Visual MODFLOW. El programa MODPATH utiliza un esquema semi-analítico de rastreo de partículas, el cual permite realizar el seguimiento de partículas a lo largo de su trayectoria durante el período de simulación.

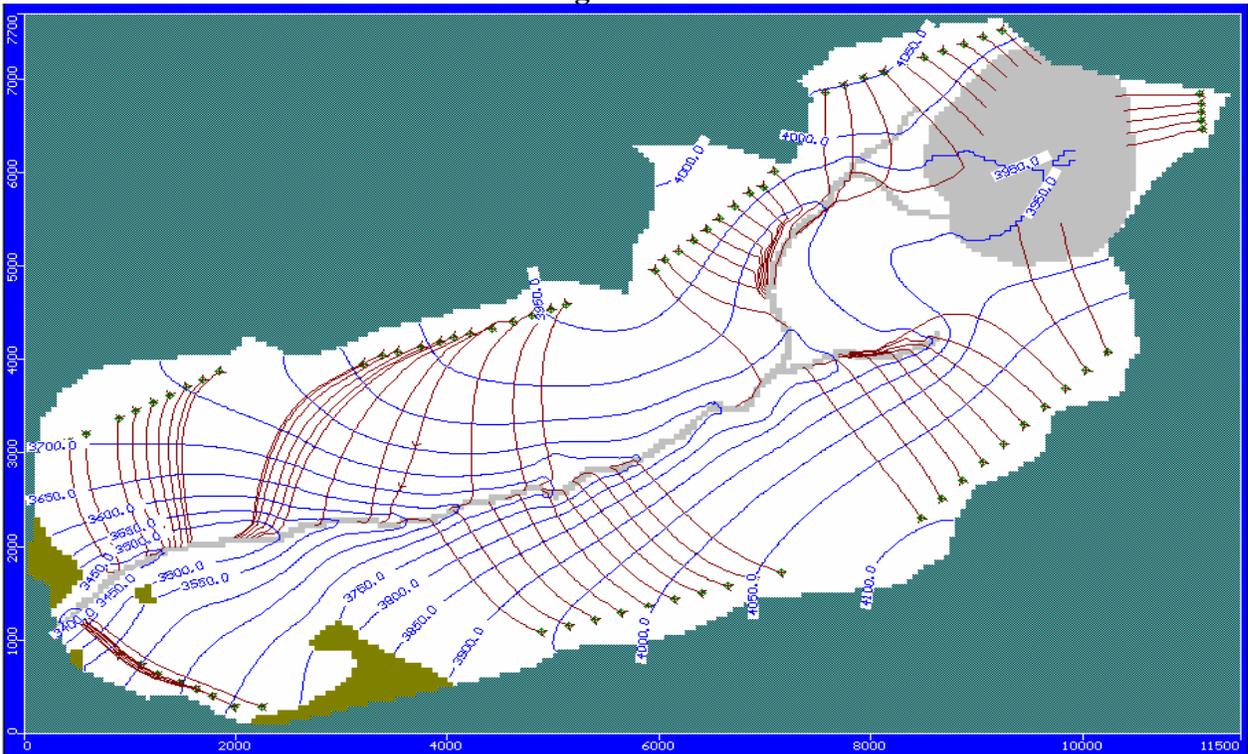
En la Figura 5.43 se muestra la posición inicial de las partículas antes de iniciar el proceso de seguimiento. Las Figuras 5.44 a 5.46 muestran los resultados obtenidos del seguimiento de las partículas y la zona de captura de flujo del rajo minero (dren) del modelo hidrogeológico de la cuenca de “LC” al final del proceso de simulación. Se observa que a medida que la conductancia del dren va disminuyendo la zona de captura de aguas subterráneas del mismo también disminuye, hasta llegar al punto de no extraer agua del sistema acuífero ( $C = 0.00001 \text{ m}^2/\text{d}$ ).

Cabe resaltar que gran parte del agua extraída del acuífero fluye hacia los cauces superficiales de la cuenca, como se puede observar en las Figuras y en el balance hídrico. (Ver Anexo Digital Figuras AX.62 a AX.69).

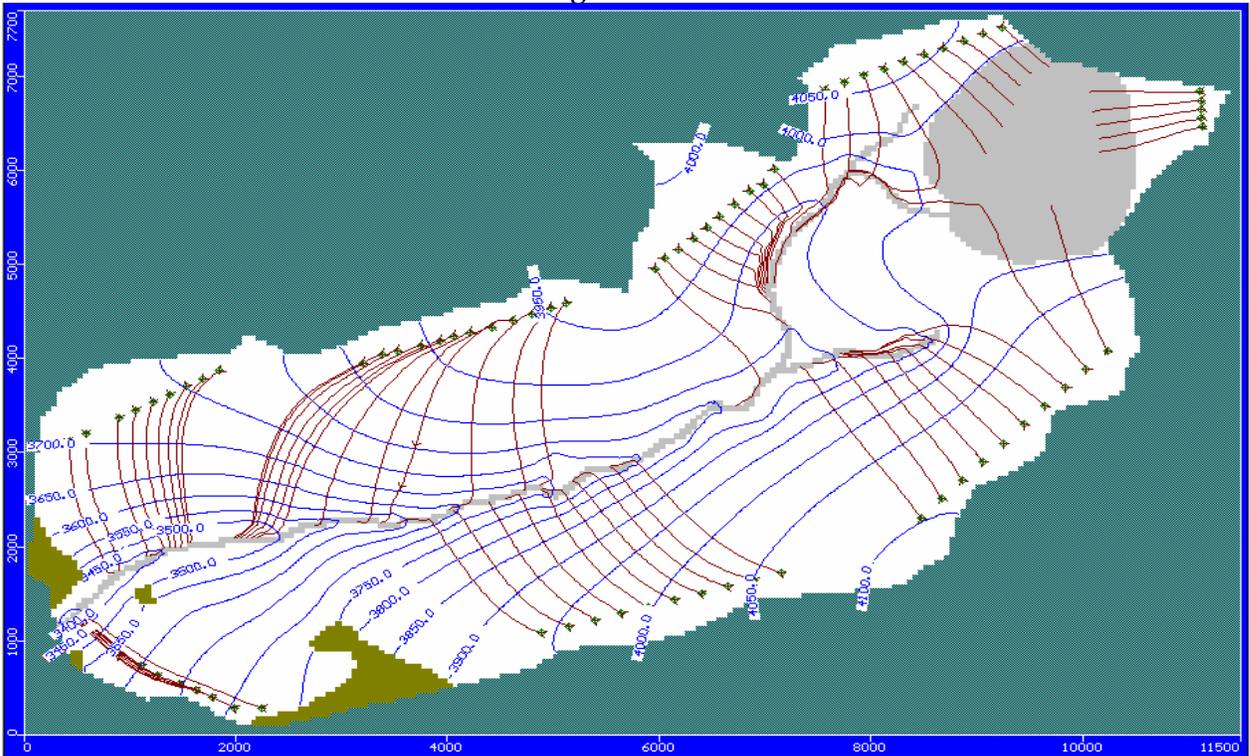
**Figura 5.43**  
**Posición Inicial Partículas de Seguimiento –“LC”**



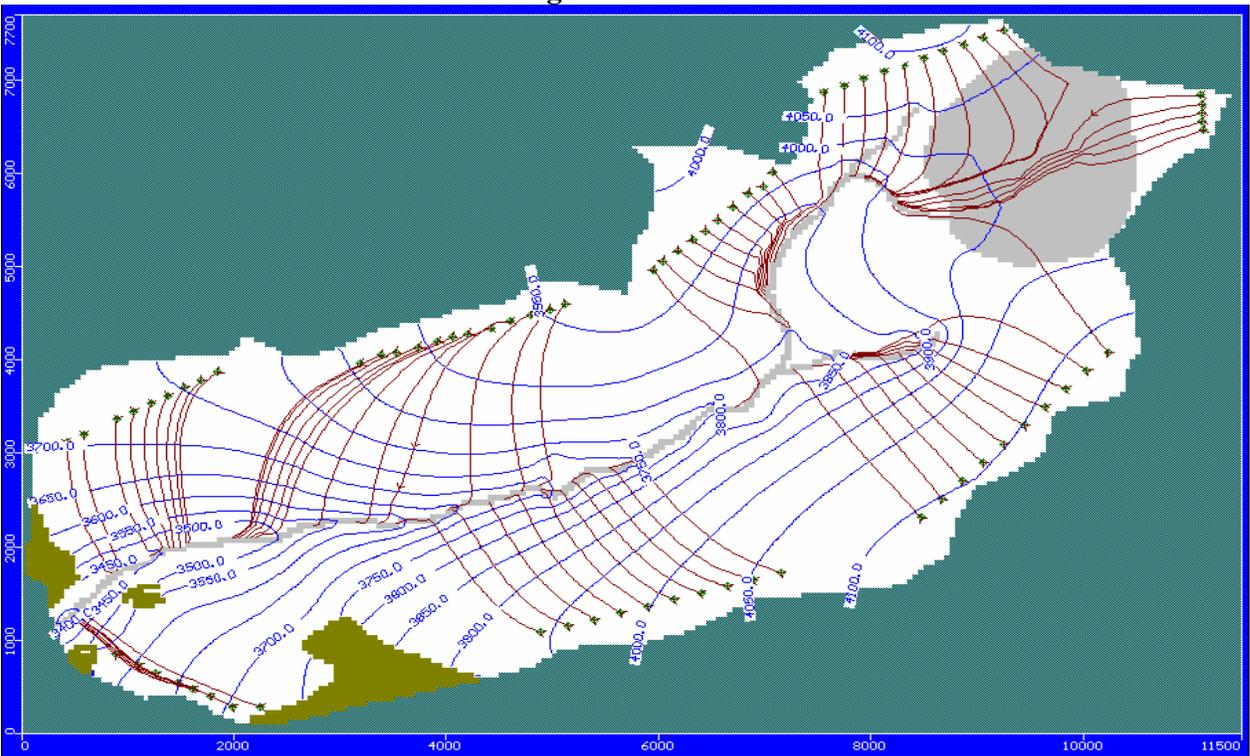
**Figura 5.44**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia 100 m<sup>2</sup>/d –“LC”**



**Figura 5.45**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia  $0.01 \text{ m}^2/\text{d}$  –“LC”**



**Figura 5.46**  
**Posición Final de Partículas de Seguimiento Conductancia  $0.00001 \text{ m}^2/\text{d}$  –“LC”**



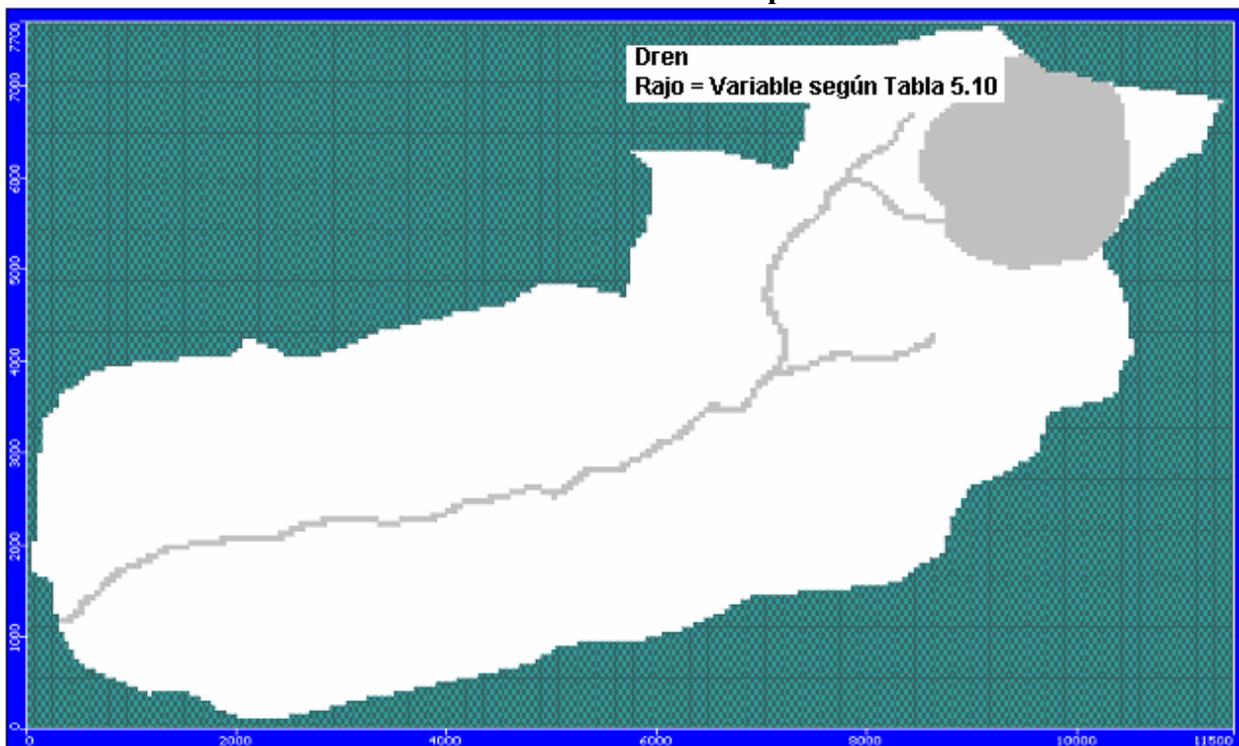
### 5.3.3.5 Operación del modelo de simulación

Una vez que el modelo de simulación hidrogeológico fue calibrado y validado se lo utilizó para evaluar los posibles cambios e impactos físicos en el sistema de aguas subterráneas, debido a la construcción del rajo minero en la cuenca “LC”. Específicamente se analizó el efecto de la profundización del rajo sobre los niveles de agua subterránea y los caudales aportantes al rajo.

Para analizar los efectos causados por la construcción y profundización del rajo minero en la cuenca “LC” se modificó el modelo hidrogeológico con respecto a la fase de calibración. Esta modificación permite incorporar en el modelo de simulación los cambios que la construcción y profundización del rajo ocasionarían en el sistema acuífero.

En la fase de operación se incorporó en el modelo hidrogeológico la condición de borde de tipo dren para simular el drenaje de la mina a cielo abierto, como se observa en la Figura 5.47. La elevación del dren representa la cota del fondo del rajo minero, es decir, la profundidad del mismo. Se utilizaron cuatro períodos de simulación con diferentes valores de elevación del dren, para de este modo poder representar de manera gradual la profundización del rajo minero a través del tiempo. En la Tabla 5.10 se observan los valores de las elevaciones del dren para los diferentes períodos de simulación y la ubicación de los mismos en los estratos acuíferos. A diferencia de la fase de calibración que se simuló en régimen permanente, en la fase de operación las simulaciones se realizaron en régimen transiente.

**Figura 5.47**  
**Condiciones de Borde en la Fase de Operación – “LC”**



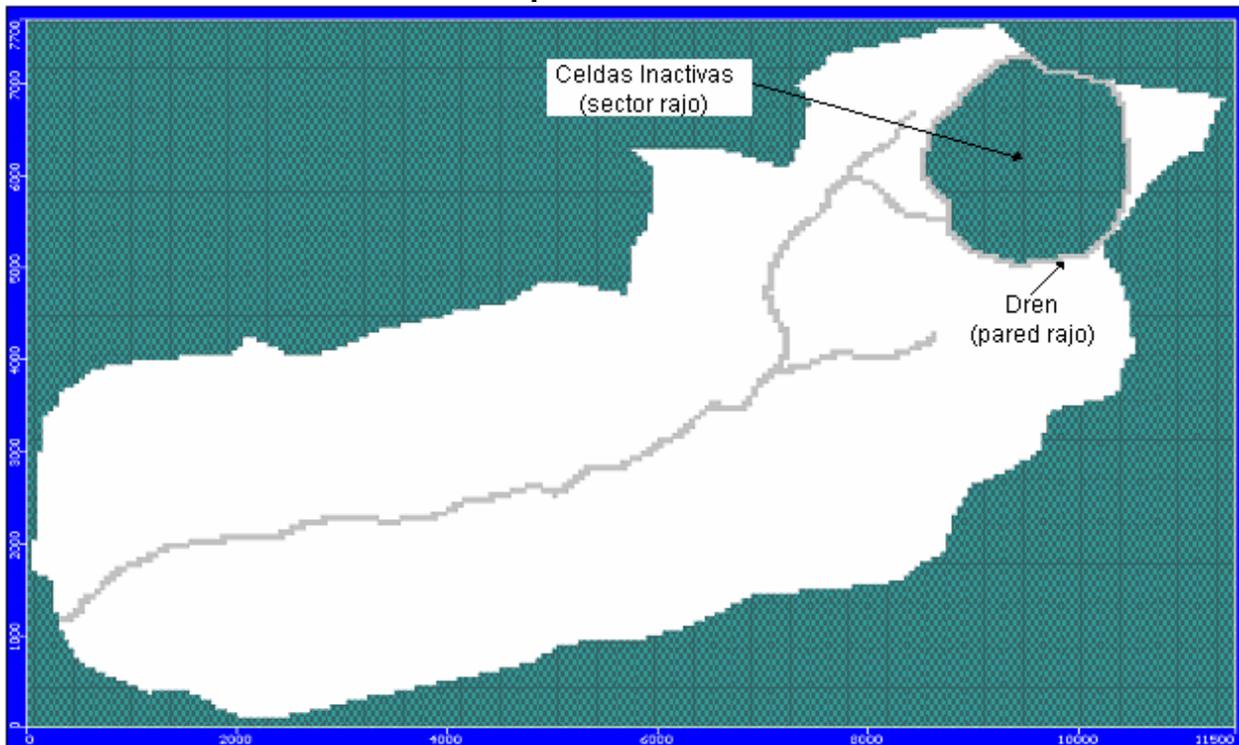
**Tabla 5.10**  
**Valores de la Condición de Borde de Dren en la Fase de Operación –“LC”**

Tiempo simulación	Elevación dren (msnm)	Ubicación en el estrato
T <sub>1</sub> (1 año)	3950	Primero
T <sub>2</sub> (5 años)	3780	Segundo
T <sub>3</sub> (10 años)	3590	segundo y tercero
T <sub>4</sub> (25 años)	3430	Tercero

Cabe mencionar, que para la simulación del drenaje del rajo minero con la condición de borde de dren en la fase de operación, cuando la elevación del dren se encuentra en el segundo estrato acuífero (segundo y tercer período de simulación), es necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer estrato acuífero y en el caso de que la elevación del dren se encuentre en el tercer estrato acuífero (cuarto período de simulación), es necesario inactivar las celdas del sector del rajo minero del primer y segundo estrato.

También se incorporó la filtración lateral en las paredes del rajo minero, cuando la elevación del dren se encontraba en el segundo y tercer estrato acuífero. La filtración lateral se la representó como una condición de borde de dren en los bordes del rajo, en el primer y segundo estrato acuífero, dependiendo de la ubicación de la elevación del dren. El valor utilizado del dren para simular la filtración lateral corresponde a la cota inferior del estrato correspondiente más 1 metro de elevación. En la Figura 5.48 se observa la incorporación de la filtración lateral en el modelo hidrogeológico.

**Figura 5.48**  
**Vista en Planta de la Incorporación de la Filtración Lateral – “LC”**

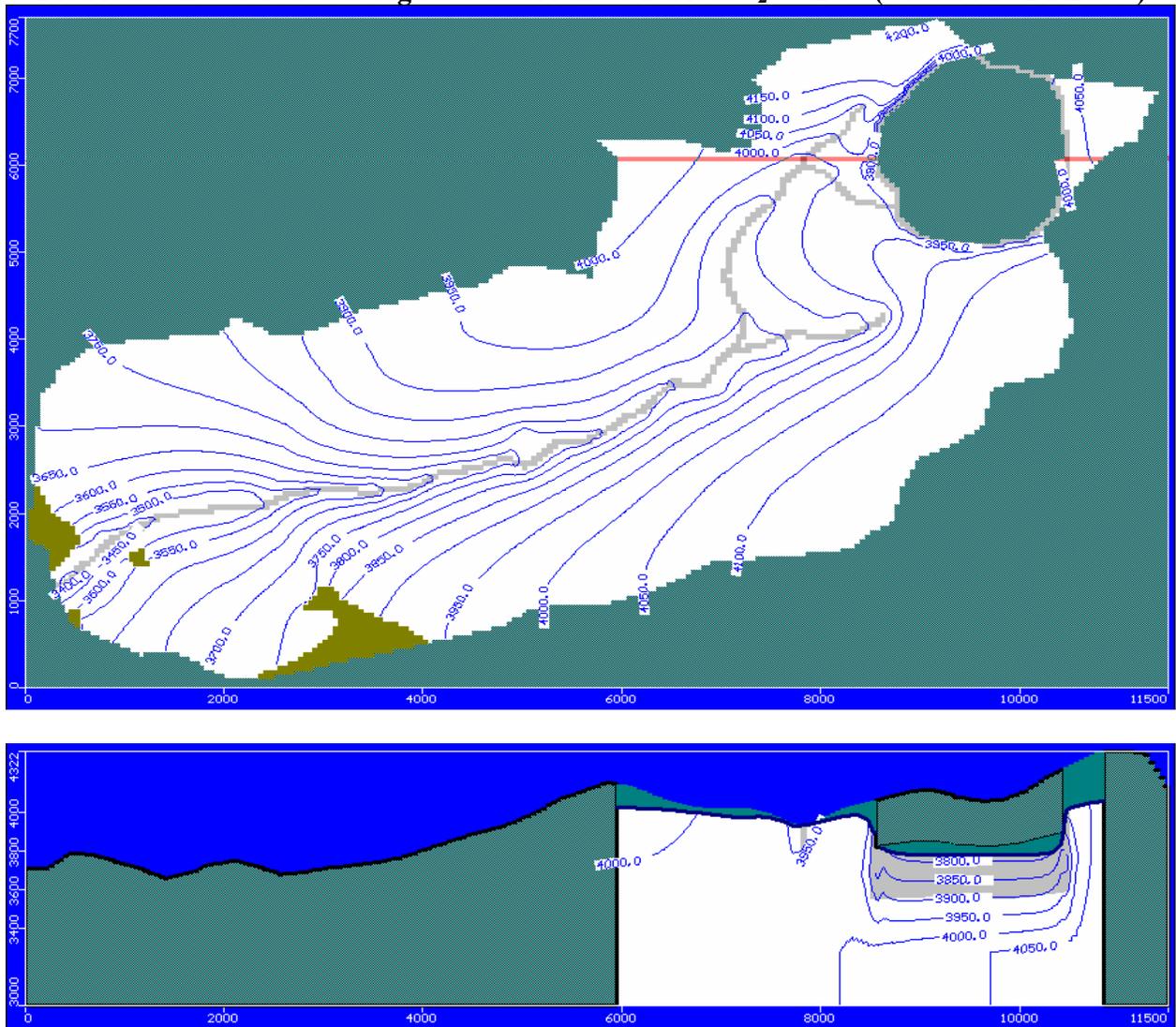


En el primer período de simulación se utilizó como condición de borde inicial, la carga hidráulica final de la fase de calibración. Para el segundo período de simulación se utilizó como condición

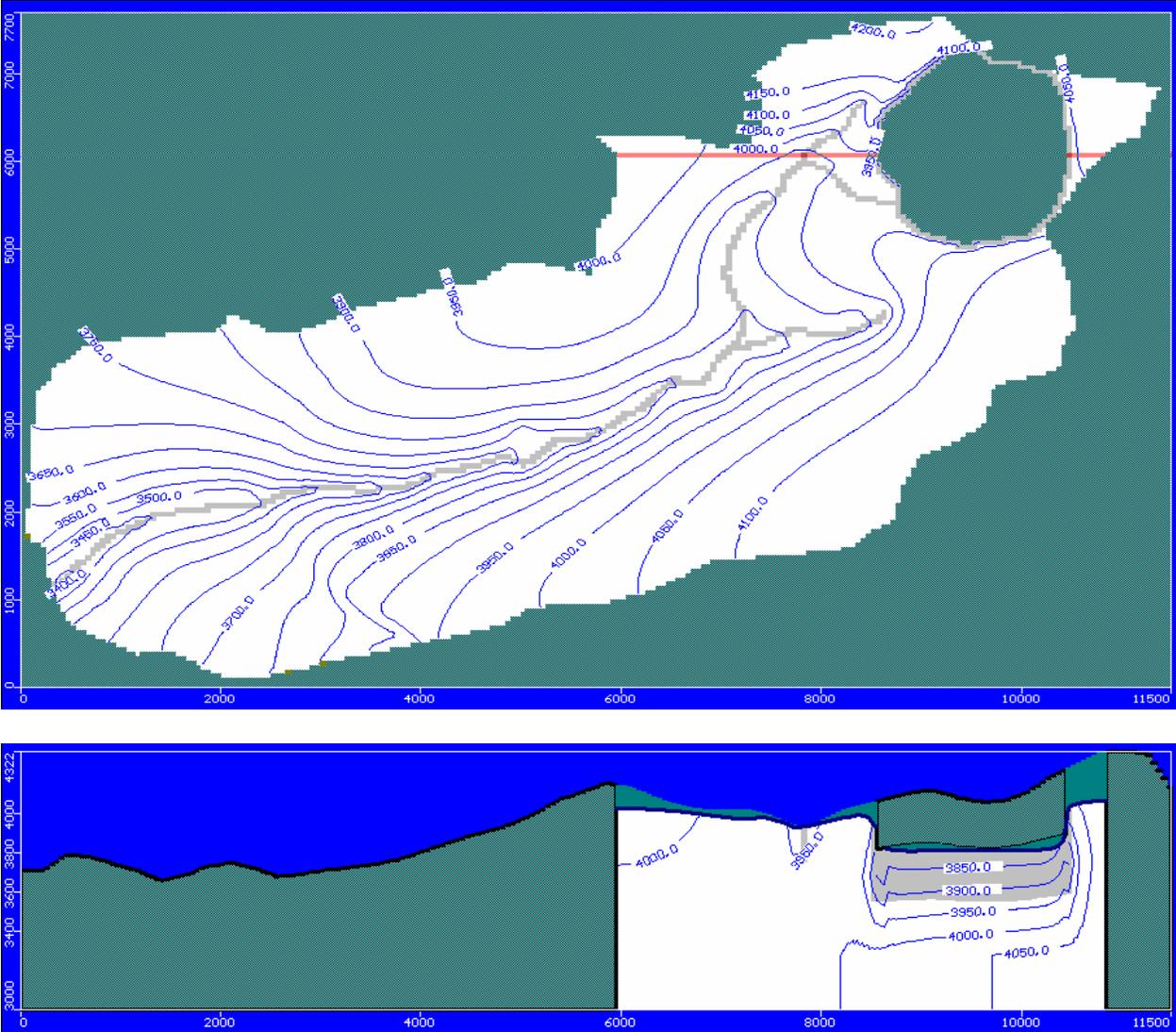
de borde inicial, la carga hidráulica obtenida en el último tiempo del primer período de simulación y así sucesivamente para el resto de los períodos de simulación.

En las Figuras 5.49 a 5.52 se presentan los resultados de los niveles de agua subterráneas obtenidos a través de los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT en el segundo y cuarto período de simulación vistos en planta para el drenaje del rajo minero en la cuenca “LC” durante la etapa de operación. También se observan cortes longitudinales, los cuales se localizan en la posición indicada en rojo en las vistas en plantas. En el Anexo Digital en las Figuras AX.70 a AX.77 se presentan todos los períodos de simulación de la fase de operación del modelo hidrogeológico “LC”.

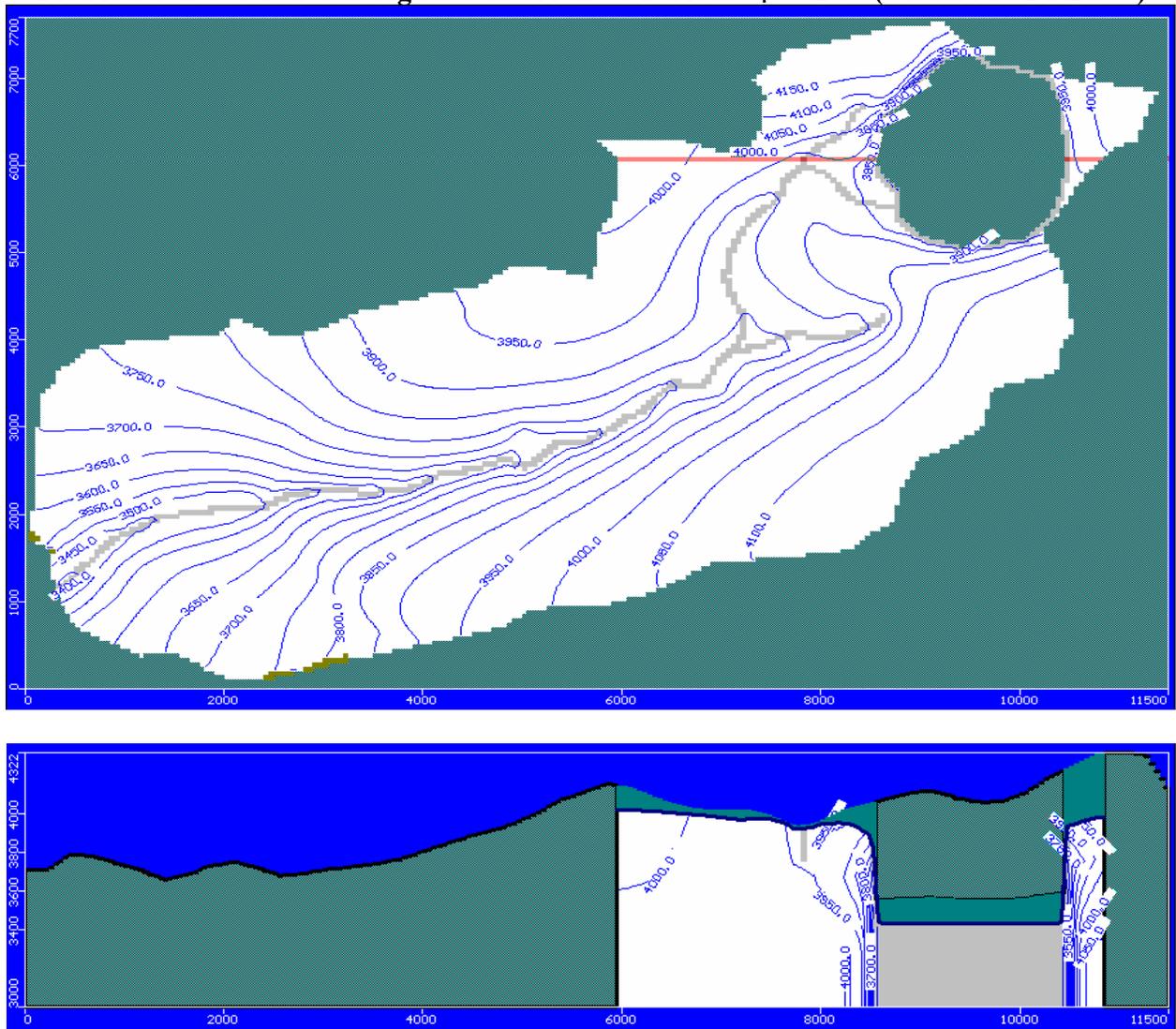
**Figura 5.49**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_2$  – “LC” (Visual MODFLOW)**



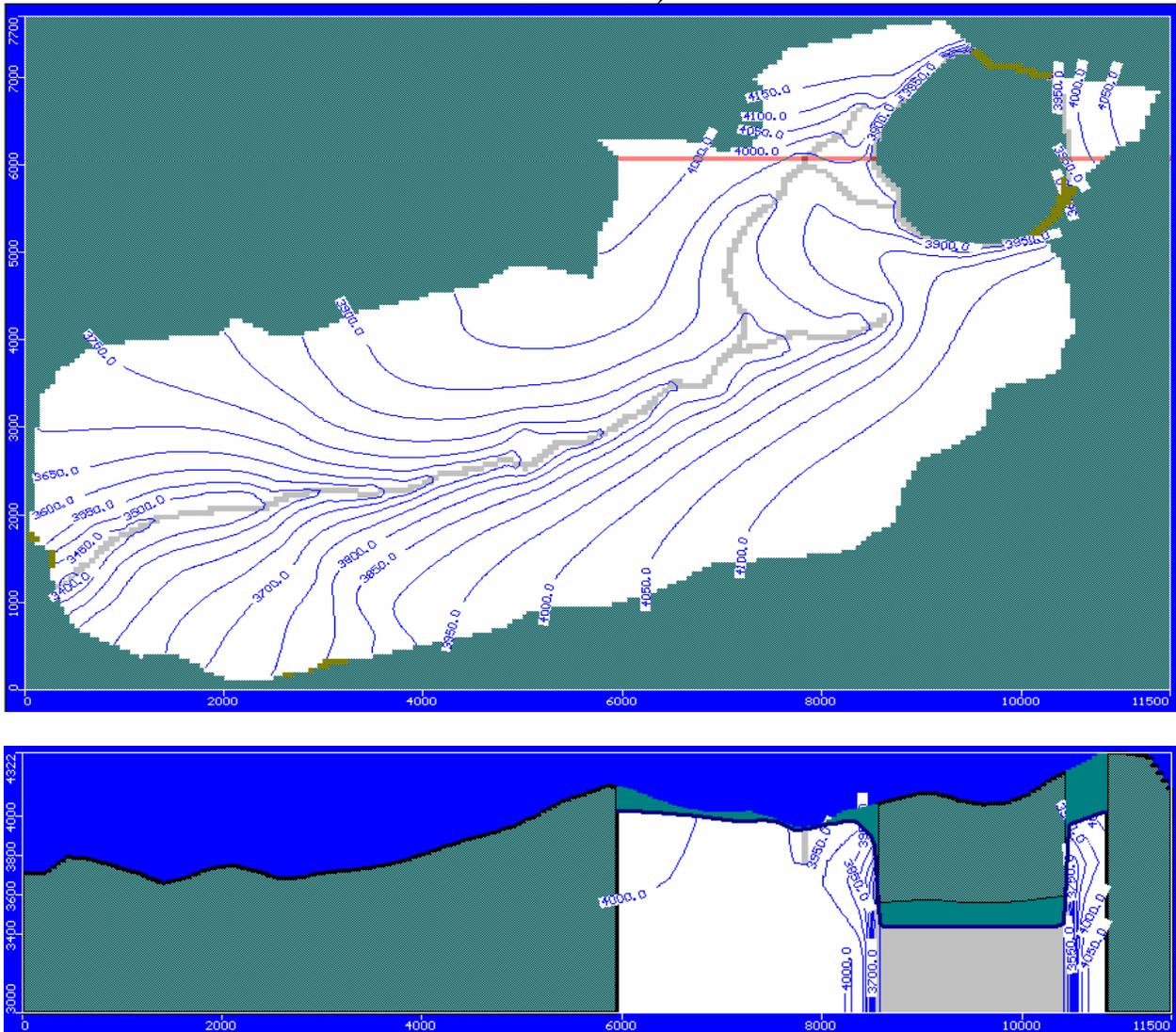
**Figura 5.50**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_2$  – “LC” (MODFLOW - SURFACT)**



**Figura 5.51**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_4$  – “LC” (Visual MODFLOW)**



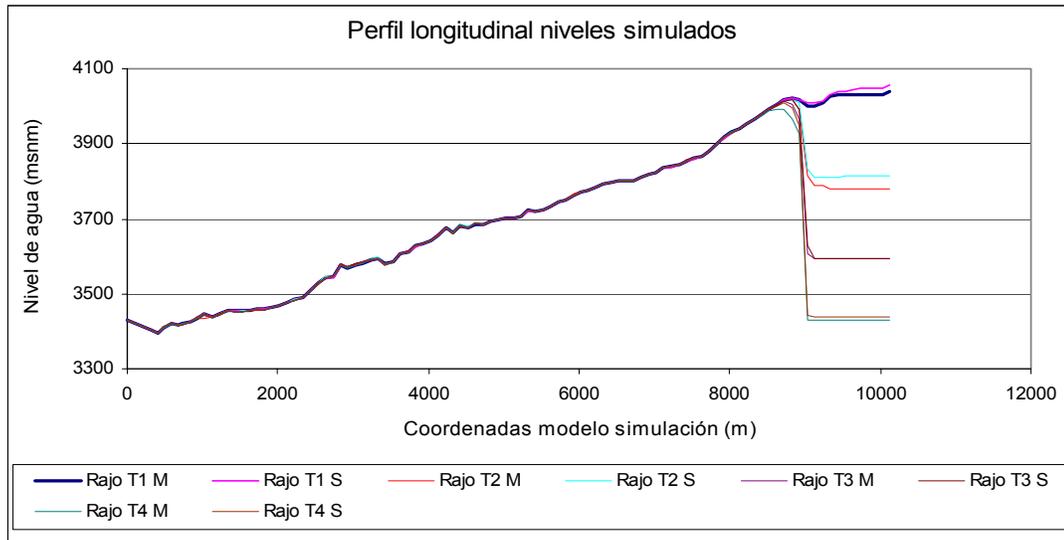
**Figura 5.52**  
**Distribución de Niveles de Aguas Subterráneas Período  $t_4$ – “LC” (MODFLOW - SURFACT)**



En las Figuras anteriores de los niveles de agua subterránea simulados se observa el descenso de los niveles de agua en el acuífero debido a la construcción y profundización del rajo minero en el segundo y último período de simulación de la etapa de operación. Se observa que a medida que el rajo alcanza mayores profundidades el área afectada por el drenaje se incrementa. La revisión visual de las Figuras muestra que el efecto del rajo sobre las aguas subterráneas es relativamente local, no extendiéndose su efecto lejos de él.

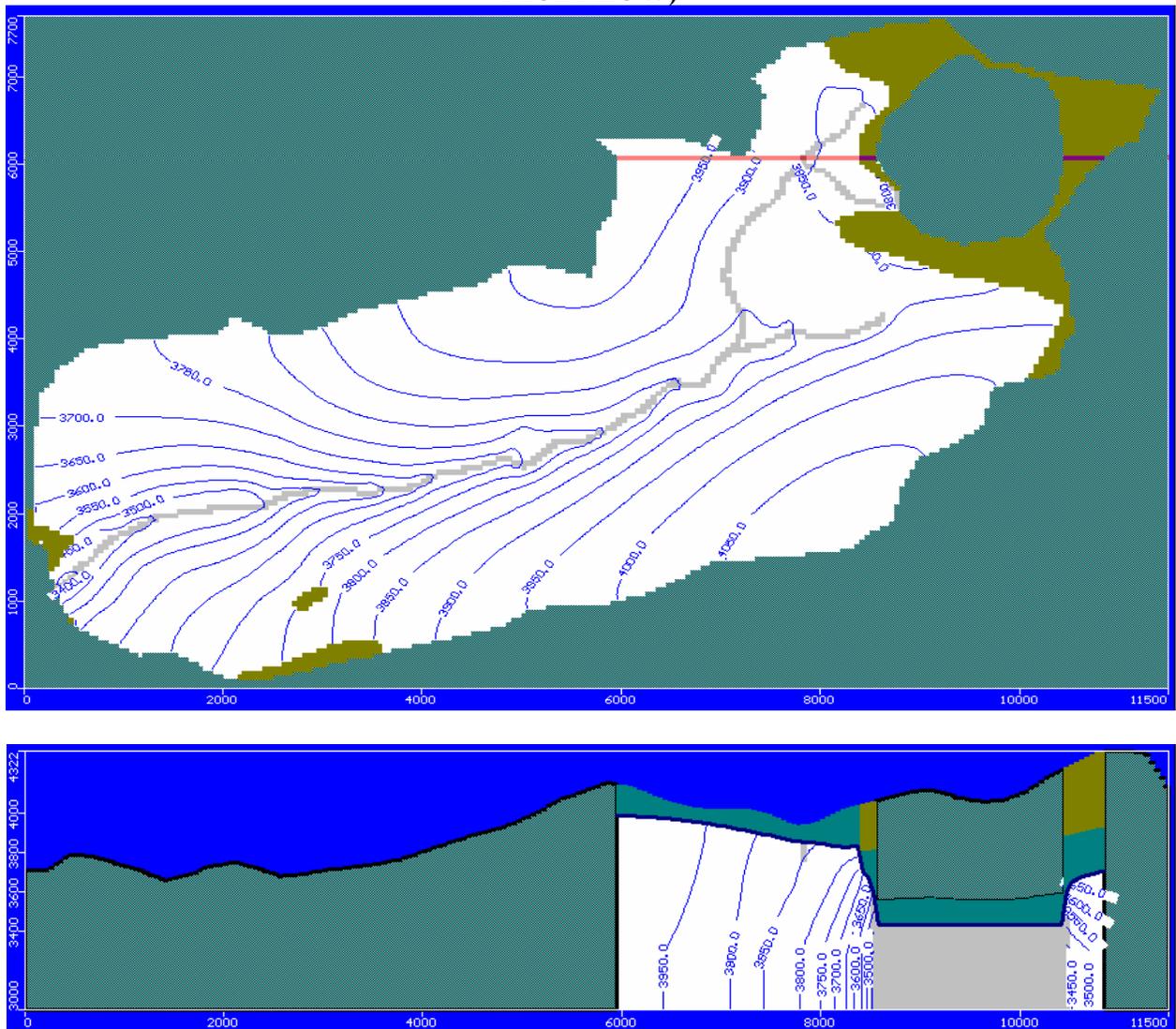
Esta situación se ratifica en la Figura 5.53, donde se observa un perfil longitudinal que muestra los niveles de agua subterránea a lo largo de los períodos de simulación. Se puede observar que los niveles obtenidos con el programa MODFLOW – SURFACT presentan levemente un menor descenso ocasionado por el drenaje en las cercanías del rajo que los obtenidos con el Visual MODFLOW.

**Figura 5.53**  
**Niveles Aguas Subterráneas en los Períodos de Simulación –“LC”**

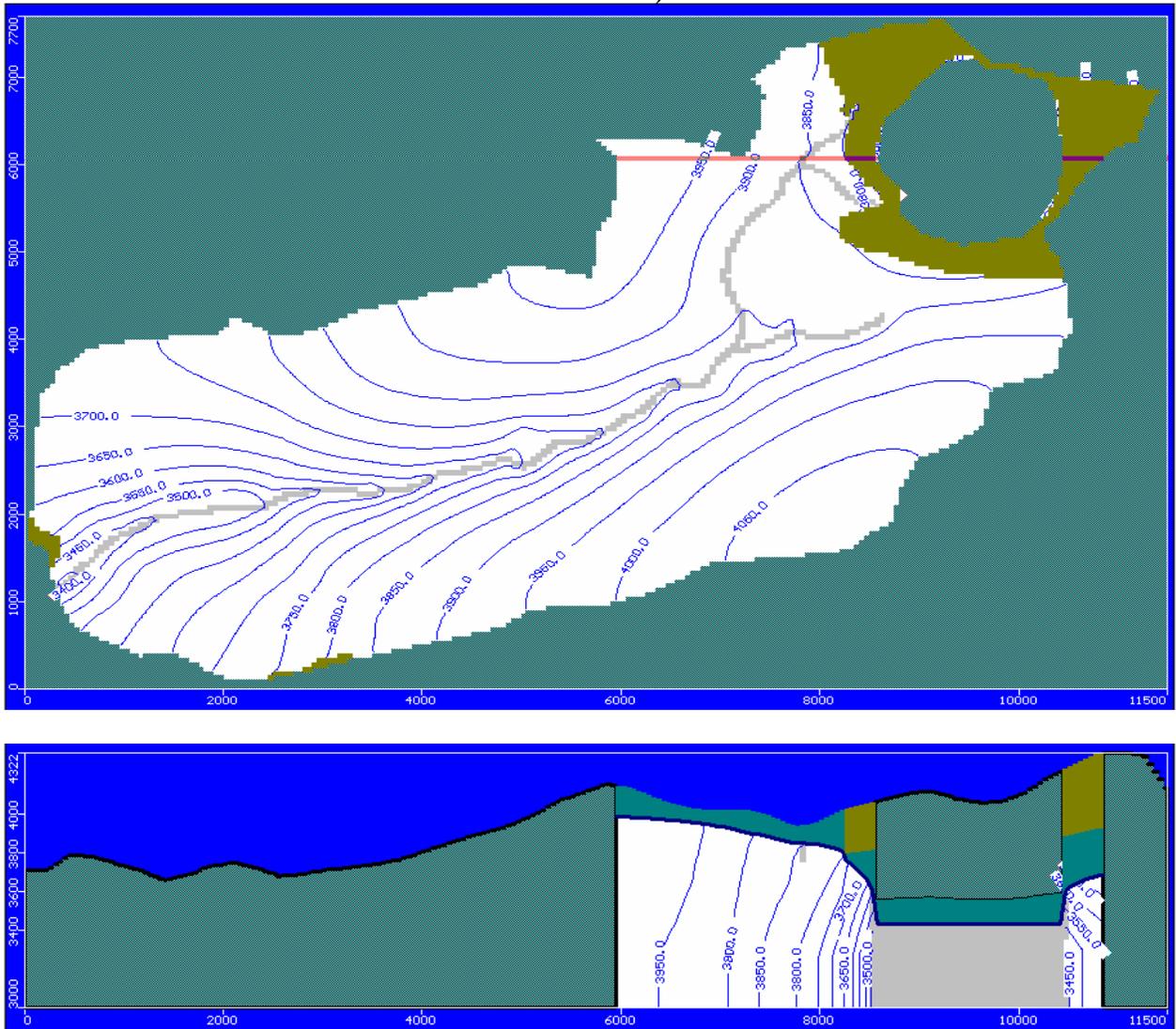


Para analizar el efecto de la construcción y profundización del rajo también se realizó una simulación en régimen permanente con la profundidad máxima alcanzada por el rajo (3430 msnm). Los resultados de esta simulación se utilizarán para comparar la situación de equilibrio del sistema acuífero con los resultados obtenidos en el último período de simulación en régimen transiente. En las Figuras 5.54 y 5.55 se muestran en planta los niveles de agua subterránea obtenidos en la simulación en régimen permanente. También se observan cortes longitudinales, los cuales se localizan en la posición indicada en rojo en las vistas en plantas.

**Figura 5.54**  
**Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente - "LC" (Visual MODFLOW)**



**Figura 5.55**  
**Distribución Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente - “LC” (MODFLOW - SURFACT)**

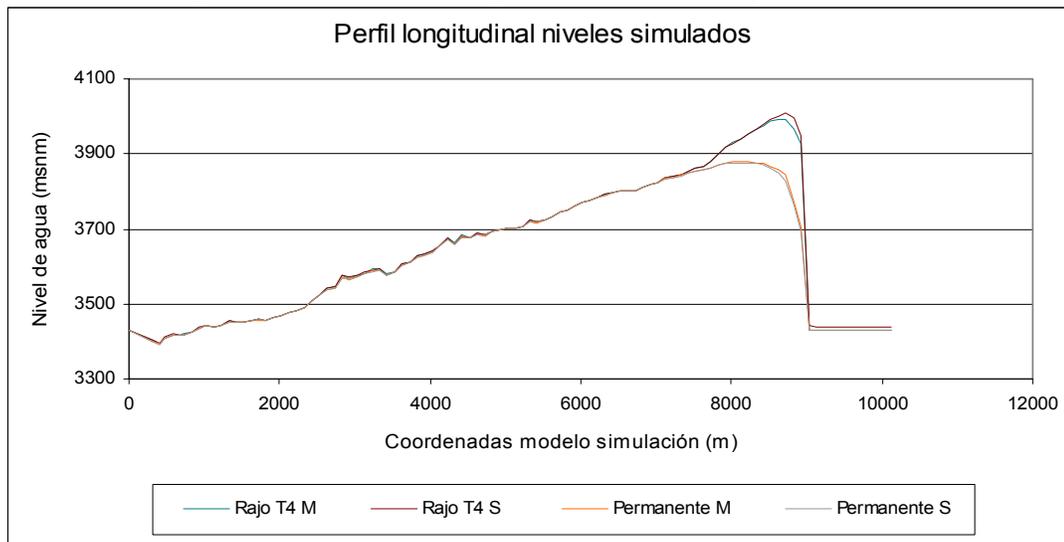


En los cortes de los niveles de aguas subterráneas simulados en régimen permanente se observa que los niveles obtenidos con el programa Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT son prácticamente iguales.

Al comparar visualmente los niveles simulados en régimen permanente con los niveles simulados en el último período en régimen transiente se observa que los niveles obtenidos con la simulación en régimen permanente son de menor magnitud. Esto significa que en el último período de simulación en régimen transiente aún no se ha alcanzado el equilibrio del sistema acuífero.

En la Figura 5.56 se muestra un corte longitudinal ubicado en la posición indicada en rojo en las vistas en plantas anteriores, en la cual se aprecia con mejor claridad la diferencia entre los niveles simulados en régimen permanente y transiente con ambos programas.

**Figura 5.56**  
**Niveles Aguas Subterráneas Régimen Permanente y Transiente - “LC”**



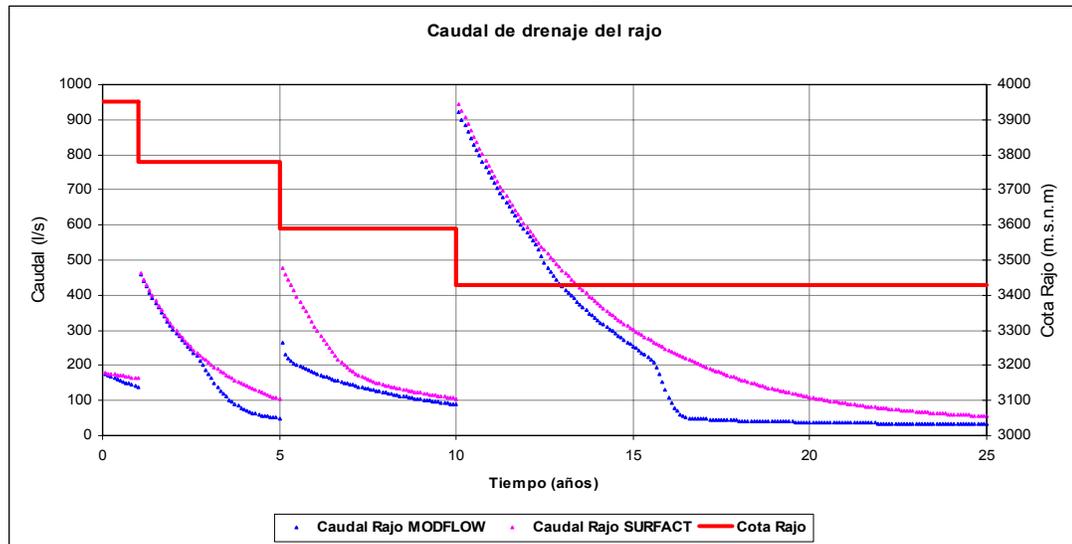
En la Figura anterior se observa que los niveles de aguas subterráneas simulados en el sector del rajo con el programa MODFLOW – SURFACT en régimen transiente son levemente de mayor magnitud que los niveles simulados con el Visual MODFLOW.

Otra diferencia que existe en los resultados obtenidos entre ambos programas es el número de celdas secas (color oliva) durante los períodos de simulación, lo cual se puede observar en las vistas en planta de los diferentes períodos de simulación. En todos los casos, se obtienen menor número de celdas secas con el MODFLOW – SURFACT, exceptuando el cuarto período de simulación, en el cual en las cercanías del rajo minero se observa mayor número de celdas secas con el MODFLOW - SURFACT y no así con el Visual MODFLOW.

La diferencia en los resultados obtenidos a través del Visual MODFLOW y el MODFLOW-SURFACT se debe a que ambos programas abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas, como se explicó en el capítulo anterior.

Al realizar el balance hídrico y analizar específicamente el caudal de salida del rajo, el caudal de salida a través del rajo es mayor en el caso del MODFLOW – SURFACT. En la Figura 5.57 se observan los caudales de salida para los diferentes períodos de simulación realizados en régimen transiente durante la construcción y profundización del rajo.

**Figura 5.57**  
**Caudal de Salida del Rajo Minero -“LC”**



Durante la etapa de operación el rajo minero inducirá la incorporación de aguas subterráneas hacia su interior debido a la creación de gradientes hidráulicos de gran magnitud. En la Figura anterior se observa que en los primeros períodos de tiempo se presentan caudales grandes, debido en gran parte al drenaje de agua almacenada en sus inmediaciones, lo que se va reduciendo paulatinamente a valores más estables (del orden de 50 l/s con el MODFLOW – SURFACT y 30 l/s con el Visual MODFLOW), los que son aportados por flujos locales y drenaje de sectores más alejados del rajo.

En la Tabla 5.11 se observa el balance hídrico de la cuenca “LC” al final de la simulación de la etapa de operación en régimen transiente, cuando el rajo alcanza su máxima profundidad. El caudal de Recarga Total y el de Almacenamiento corresponden a entradas al sistema acuífero, mientras que el caudal del Rajo y el de los Cauces Superficiales corresponden a salidas del sistema en estudio.

Con este balance hídrico se verifica que el caudal de salida del rajo minero obtenido con el programa MODFLOW – SURFACT es mayor al obtenido con el Visual MODFLOW. Esto se debe a que los programas utilizados en este análisis abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas. Cabe mencionar, que gran parte del caudal de salida del rajo minero corresponde a agua subterránea almacenada en las inmediaciones del rajo.

**Tabla 5.11**  
**Balance Hídrico Cuenca “LC” – Régimen Transiente**

Elemento	Caudal			
	MODFLOW		SURFACT	
	m <sup>3</sup> /d	l/s	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	2274.57	26.3	2274.57	26.3
<b>Almacenamiento</b>	3280.67	38.0	5372.50	62.2
<b>Rajo</b>	2804.60	32.5	4772.10	55.2
<b>Cauces Superficiales</b>	2481.80	28.7	2535.50	29.3

En la Tabla 5.12 se presenta el balance hídrico de la cuenca “LC” para la máxima profundidad a ser alcanzada por el rajo minero en una situación de equilibrio del sistema acuífero. En esta situación el caudal de salida del rajo obtenido con el MODFLOW – SURFACT es levemente superior al alcanzado con el Visual MODFLOW.

**Tabla 5.12**  
**Balance Hídrico Cuenca “LC” – Régimen Permanente**

Elemento	Caudal			
	MODFLOW		SURFACT	
	m <sup>3</sup> /d	l/s	m <sup>3</sup> /d	l/s
<b>Recarga Total</b>	2274.57	26.3	2274.57	26.3
<b>Rajo</b>	471.29	5.5	485.04	5.6
<b>Cauces Superficiales</b>	1803.50	20.9	1789.70	20.7

Cabe mencionar, que no es relevante a la profundidad que se encuentre el rajo minero en el tercer estrato acuífero, los caudales de salida del rajo y de los cauces superficiales no se ven alterados por el drenaje del rajo, esto se debe a que los estratos superiores del acuífero son los que conducen el agua subterránea, mientras que el tercer estrato (roca menos fracturada), se caracteriza por presentar una menor capacidad de conducción hidráulica.

En el caso específico del rajo minero de “LC”, el área afectada por el drenaje obtenida con el programa MODFLOW - SURFACT es levemente menor, al igual que los descensos de los niveles de aguas subterráneas simulados. Se obtuvieron gradientes hidráulicos levemente mayores con el MODFLOW - SURFACT y por consiguiente el caudal de extracción del rajo minero es mayor, como se verificó mediante el balance hídrico.

Los resultados obtenidos con ambos programas computacionales muestran que durante la expansión del cono de descenso, el rajo minero induce la incorporación de aguas subterráneas hacia su interior debido a la creación de gradientes hidráulicos de gran magnitud, los que sin embargo ven limitado su efecto de drenaje debido a la baja conductividad hidráulica de las rocas que forman parte de los estratos más profundos.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

De acuerdo a lo presentado en la presente tesis se pueden elaborar las siguientes conclusiones sobre los programas utilizados para la simulación de drenaje de minas, la simulación de casos hipotéticos y la simulación de casos reales:

- **Programas utilizados para la simulación de drenaje de minas:**
  - Del análisis de los algoritmos de cálculo del Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, se concluye que no todos los algoritmos de cálculo convergen en todos los modelos de simulación. En el caso que el modelo de simulación cumpla con los criterios de cierre de convergencia y de balance de masa, no necesariamente significa que los resultados obtenidos sean correctos, siempre hay que realizar un análisis gráfico y numérico de las cargas hidráulicas obtenidas y verificar si las mismas son físicamente posibles.
  - La velocidad de resolución de los sistemas de ecuaciones de los algoritmos de cálculo es un factor fundamental en las simulaciones numéricas a gran escala. El ahorro de tiempo y de costo computacional de usar un algoritmo de cálculo que obtenga soluciones adecuadas en un tiempo razonable, es muy importante. Este factor permite invertir más tiempo en la creación de un mejor modelo conceptual y en la interpretación de los resultados.
  - De la revisión bibliográfica y diversos análisis realizados en la presente tesis, se concluye que, en la resolución de las ecuaciones del flujo subterráneo, el software MODFLOW-SURFACT utiliza un procedimiento más apropiado y físicamente más consistente que el Visual MODFLOW.
  - Numéricamente la condición de borde de carga constante fija un nivel constante de agua, lo que permite representar el drenaje del rajo minero, manteniendo el sector del rajo con un nivel de agua bajo. El programa calcula el caudal de salida de la condición de borde para mantener el nivel constante fijado anteriormente.
  - La condición de borde de tipo dren extrae agua del sistema acuífero, cuando la carga hidráulica en el acuífero es mayor a la elevación fijada del dren, una vez que la carga del acuífero es igual o menor a la elevación del dren, el dren deja de extraer agua del acuífero. El caudal extraído del acuífero por el dren es proporcional a la diferencia entre la carga del acuífero y la elevación fijada del dren. Además, el caudal extraído está condicionado por la conductancia del dren, que es un parámetro numérico que representa la resistencia del flujo entre el acuífero y el dren.
  - En la mayor parte de las situaciones, la información requerida para calcular la conductancia del dren no está disponible. La información incluye la distribución de cargas alrededor del dren, la conductividad hidráulica del acuífero cerca del dren, el número y el tamaño de las aperturas del tubo del dren, la cantidad de materiales que

obstruyen el dren y la conductividad hidráulica de estos materiales. El valor de la conductancia del dren por lo general es ajustado durante la calibración del modelo.

- La condición de borde de dren podría compararse análogamente con el funcionamiento de una tubería, en la cual la conductancia vendría a ser la válvula de paso de agua que se puede ir abriendo o cerrando para regular el flujo de agua. Cuando la conductancia es menor a la conductividad hidráulica del sector donde se encuentra el dren, la válvula de paso de agua se encontraría cerrada y el flujo de agua a ser extraído por el dren sería nulo. En el caso contrario, cuando la conductancia es mayor a la conductividad hidráulica del sector del dren, a medida que se va abriendo la válvula de paso (incremento conductancia) el flujo extraído va aumentando, hasta llegar a un punto, en el que aunque se siga abriendo la válvula, el flujo extraído por el dren no aumentará.
- La diferencia que existe entre las condiciones de borde de carga constante y dren, es que la condición de borde de tipo dren limita la salida de agua a través de la conductancia, y la condición de borde de carga constante no tiene un límite para extraer agua del sistema acuífero. Además, la extracción de agua a través del dren se realiza de manera gradual, hasta que la carga en el acuífero sea menor a la elevación fijada del dren (cota de fondo del rajo), al contrario de la carga constante, que extrae agua desde el inicio de la simulación del nivel constante de agua fijado (cota de fondo del rajo). Cuando la condición de borde de dren se utiliza con valores de conductancias altos, esta condición de borde tiene un comportamiento similar, en términos de extracción de agua, a la condición de borde de carga constante.
- El programa Visual MODFLOW presenta problemas en sistemas acuíferos sobreexplotados por pozos de bombeo que penetran varios estratos acuíferos, debido a que no toma en cuenta la interconexión entre los estratos del pozo. Esta aproximación desconecta o aísla las celdas cuando el nivel de agua desciende por debajo del fondo de la celda, reduciendo el caudal total bombeado de los pozos.
- El programa MODFLOW – SURFACT simula los pozos de bombeo como tubos de fractura de alta conductividad, permitiendo la conexión de las celdas que están asociadas con los pozos. En sistemas sobreexplotados, el caudal total de salida es automáticamente ajustado, cuando el nivel del agua en los pozos ha alcanzado el fondo del mismo. El programa redistribuye dinámicamente los caudales de bombeo a las restantes celdas activas, si una o más celdas se secan debido al bombeo. De este modo simula de manera más precisa los efectos reales de la sobreexplotación de un pozo que penetra varias capas.
- **Simulación casos hipotéticos:**
  - Los resultados obtenidos del análisis comparativo de las soluciones analíticas y numéricas del caso hipotético “A”, el cual representa el flujo radial hacia un pozo de bombeo en un sistema acuífero confinado, muestra que, a medida que el tamaño de las celdas utilizadas en la solución numérica es mayor, la solución numérica se aleja de la solución analítica.

- Los resultados obtenidos del caso hipotético “A” a través de la solución analítica en pozos de observación ubicados a  $\pm 10$  m (envolvente superior e inferior) de los pozos de observación utilizados para la solución numérica (celdas 10 m x 10 m), muestran que ambas soluciones son prácticamente iguales, esto se debe a que ambas soluciones están basadas en la Ley de Darcy. Existe una pequeña diferencia en el tiempo de respuesta del acuífero al descenso entre la solución numérica y la solución analítica. Esta diferencia se incrementa a medida que el pozo de observación se distancia del pozo de bombeo, obteniéndose un tiempo de respuesta del acuífero al descenso menor en el caso de la solución numérica calculada con el Visual MODFLOW en los primeros días de operación del pozo de bombeo.
- En la simulación del caso hipotético “C” del drenaje del rajo minero con las condiciones de borde de carga constante y dren se obtuvieron diferentes resultados con el Visual MODFLOW y el MODFLOW – SURFACT, en todos los casos analizados. Esto se debe a que durante las simulaciones el Visual MODFLOW convierte las celdas de carga variable desaturadas en celdas sin flujo, resultando en una exclusión permanente de estas celdas del dominio de flujo del modelo de simulación. El MODFLOW – SURFACT resuelve el problema de la exclusión permanente de las celdas desaturadas por medio de una formulación que incorpora funciones de retención de agua.
- Se realizó un balance de los caudales de salida del rajo del caso hipotético del drenaje del rajo minero para las condiciones de borde de tipo carga constante y dren, observándose que aproximadamente 90% del volumen total del agua subterránea extraída por ambas condiciones de borde corresponde al almacenamiento del acuífero, por lo que el 10% de agua restante corresponde al agua que fluye efectivamente hacia el rajo minero y debe ser extraída para hacer posible su construcción. Los resultados fueron corroborados a través de un análisis realizado del caudal pasante por las paredes del rajo, en el cual se obtuvo que el caudal pasante por las paredes del rajo es aproximadamente el 10% del caudal total de salida por las condiciones de borde de carga constante y dren.
- La simulación del drenaje de rajos mineros en acuíferos de muy baja permeabilidad y de áreas extensas, no es factible realizarla a través de campo de pozos de bombeo, porque los pozos de bombeo producen conos de depresión estrechos y profundos. En estos casos el radio de influencia de un pozo de bombeo es muy pequeño, es decir, ocasionan una depresión del nivel del agua subterránea muy localizada.
- En la simulación del caso hipotético “D” del rajo minero con pozos de bombeo en un acuífero multicapas de alta permeabilidad, se obtuvieron diferentes resultados con el Visual MODFLOW y el MODFLOW – SURFACT. Esto se debe a que ambos softwares abordan de diferente manera la aproximación de diferencia finita para resolver la ecuación de flujo de aguas subterráneas.
- **Simulación casos reales:**
  - Es posible realizar la modelación numérica del drenaje de rajos mineros reales a través de modelos de simulación. Estos modelos permiten analizar el comportamiento de los flujos subterráneos ocasionados por el drenaje del rajo minero en su etapa de operación,

permitiendo evaluar los potenciales impactos del drenaje sobre los niveles de agua subterránea en las inmediaciones.

- Caso mina Andacollo - La Falla de Andacollo funciona como una barrera impermeable entre el sector Este y Oeste de la cuenca del mismo nombre, por consiguiente el drenaje del rajo minero no afecta directamente los niveles de agua subterránea en el sector Este de la cuenca.
- Caso mina “LC” - Los resultados obtenidos con ambos programas computacionales muestran que durante la expansión del cono de descenso, el rajo minero induce la incorporación de aguas subterráneas hacia su interior debido a la creación de gradientes hidráulicos de gran magnitud, los que sin embargo ven limitado su efecto de drenaje debido a la baja conductividad hidráulica de las rocas que forman parte de los estratos más profundos.

## 6.2 Recomendaciones

Con base en los resultados anteriormente señalados es posible establecer un conjunto de recomendaciones para la construcción de un modelo de simulación de drenaje de minas a cielo abierto:

- Es aconsejable trabajar con grillas conformadas por celdas de dimensiones pequeñas, siempre que sea posible, puesto que el refinamiento de la grilla tiene un alto costo computacional. En casos, que el refinamiento de toda la grilla no sea posible debido a las grandes dimensiones del modelo de simulación, se debe refinar la grilla en los sectores de mayor interés para el análisis y tratar de que el cambio de tamaño entre las celdas no sea brusco, puesto que de ser así el modelo podría tener problemas de convergencia.
- Los resultados obtenidos mediante el análisis de los algoritmos de cálculo, demuestran que hay que ser bastante cautelosos a la hora de interpretar los resultados obtenidos por los programas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT, puesto que a lo que se refiere a resultados puntuales, éstos no siempre podrían ser los correctos, como por ejemplo, las celdas cercanas a condiciones de borde y cambios de propiedades hidrogeológicas. Por lo que se recomienda hacer la interpretación de los resultados no solo en puntos específicos de los modelos de simulación, sino a nivel general del dominio del modelo de simulación.
- En el drenaje de una mina a cielo abierto, desde el punto de vista hidrodinámico el rajo actúa como un sumidero en el sistema acuífero, hacia el que fluye el agua subterránea debido al descenso provocado por el drenaje. Esta filtración lateral del flujo de aguas subterráneas que existe en las paredes del rajo minero es necesaria incorporarla en el modelo numérico para que la simulación del drenaje se aproxime más a lo que ocurre en la realidad.
- Se debe tener en cuenta que un alto porcentaje de los caudales de salida de las condiciones de borde que entregan los modelos de simulación corresponden al almacenamiento del acuífero y no al caudal real de salida por el rajo minero.

- En la mayor parte de las situaciones, la información requerida para calcular la conductancia de la condición de borde de tipo dren no está disponible, por lo que se requiere realizar un análisis de sensibilidad de este parámetro.
- Realizar simulaciones del drenaje de rajos mineros con diferentes condiciones de borde con programas de modelación hidrogeológica que utilicen métodos numéricos de elementos finitos, como por ejemplo, SEEP/W o FEFLOW.
- En base a la información hidrogeológica existente diseñar un plan de seguimiento durante la etapa de operación de la mina a cielo abierto, que permita estudiar las variables hidrogeológicas del sistema acuífero, como los niveles de agua subterránea en pozos en el rajo minero y cercanos a éste, caudales aportantes de cuencas vecinas, recarga por precipitación, descargas naturales y artificiales por bombeo del acuífero.
- Estudiar la formación y el comportamiento de “Pit Lakes” a través de programas de simulación hidrogeológica en minas a cielo abierto durante la etapa de cierre.
- Diseñar un plan de seguimiento durante la etapa de cierre de la mina a cielo abierto, que permita estudiar el comportamiento del sistema acuífero, como los niveles y calidad del agua subterránea en pozos cercanos al rajo minero.

## BIBLIOGRAFÍA

Banta, E. Modifications to MODFLOW boundary conditions and an adaptive-damping scheme for Picard iterations for a highly nonlinear regional model. MODFLOW and More, 2006, 596-600.

Banton, D., Birch, M. and White, J. Hydrogeology of the proposed Crown Jewel open pit gold mine, Okanogan County, Washington, USA. IMWA Symposium, 2001.

Batelaan, O. and De Smedt, F. Seepage, a new MODFLOW drain Package. GROUND WATER, 2004, Vol. 42 (4), 576-588.

Breckenridge, L., Hudson, A., Brown, P. and Henderson, M. Hydrogeologic investigation of the gold reserve incorporated Brisas del Cuyuni concession in southeast Venezuela. IMWA, 2005.

Castro, J.M., Moore, J.N. Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. Environmental Geology, 2000, 1254-1260.

Código de Minería (Santiago, 26 de septiembre 1983).

Cherry, J.A. and Freeze R.A. Groundwater, 1979.

Decreto N° 95 - Reglamento del Sistema de Evaluación del Sistema de Impacto Ambiental (Santiago, 7 de diciembre de 2002).

Decreto N° 132 - Reglamento de Seguridad Minera (Santiago, 30 de diciembre de 2002).

Decreto N° 1492 - Ley General de Minería (Lima, 3 de junio 1992).

Decreto N° 1693 – Reglamento para la Protección Ambiental en la Actividad Minero – Metalúrgica (Lima, 1 de mayo 1993)

Decreto N° 24782 - Reglamento Ambiental para Actividades Mineras – RAAM (La Paz, 31 de julio de 1997).

Espinoza, C. Apuntes de clases de Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento, 2007.

Espinoza, C. Apuntes de clases de Modelación de Aguas Subterráneas, 2008.

Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M. and McDonald, M. User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. USGS Modular Ground-Water Model, 2000. Open-File Report 00-92.

Harbaugh, A., and McDonald, M. Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, 1996. Open-File Report 96-486.

- Hydrogeologic, Inc. MODFLOW-SURFACT Version 2.2 documentation, 1996. Vol. 1: Flow modules.
- Hydrogeologic, Inc. Visual MODFLOW Users Manual, Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2003.
- Ley 1333 – Ley de Medio Ambiente (La Paz, 27 de Abril 1992).
- Ley 1777 – Código de Minería (La Paz, 17 de marzo 1997).
- Ley 19300 - Ley de Bases del Medio Ambiente (Santiago, 1 de marzo de 1994).
- Ley 28611 - Ley General del Ambiente (Lima, 15 de octubre de 2005).
- Ley 28090 - Ley que Regula el Cierre de Minas (Lima, 14 de octubre 2003).
- Mehl, S. and Hill, M. MODFLOW-2005, Documentation of shared node local grid refinement (LGR). U.S. Geological Survey modular ground-water flow model, 2006.
- McDonald, M. and Harbaugh, A. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS Techniques of Water-Resources Investigations, 1988. Book 6, Chapter A1.
- Refsgaard, J. and Henriksen, H. Modelling guidelines – terminology and guiding principles. Advances in Water Resources, 2004, (27), 71-82.
- Sánchez, Luis. Drenaje de Minas a Cielo Abierto. Aspectos Geológicos de Protección Ambiental - UNESCO, 1995, Vol. 1 (16), 251-264.
- SIGA, Modelo Hidrogeológico Cuenca de Andacollo – Proyecto Hipógeno, Estudio de Impacto Ambiental, 2006.
- Stüben, K., Delaney, P. and Chmakov, S. Algebraic Multigrid (AMG) for ground water flow and oil reservoir simulation. Proc. MODFLOW and More, 2003, 341-345.
- URS Corporation. Technical approach and work plan for hydrologic modeling for Midnite Mine, 2001.
- Wilton, Mike. Evolution of the island copper mine pit lake, Thesis B.A.Sc (Civil Engineering) University of British Columbia, 1996.
- Wylie, A. Model river representation above Milner dam. Idaho Water Resources Research Institute, 2004.
- Younger, P., Banwart, S. and Heidin, R. Mine water – hydrology, pollution and remediation, 2002.

## **ANEXO A**

# **DESCRIPCIÓN ALGORITMOS DE CÁLCULO ("SOLVERS")**

## Descripción de Algoritmos de Cálculo (“Solvers”)

Los programas de diferencias finitas Visual MODFLOW y MODFLOW – SURFACT utilizan diferentes algoritmos de cálculo para resolver las ecuaciones del flujo subterráneo. En el caso del Visual MODFLOW 4.2 los “solvers” que se encuentran disponibles son los siguientes: PCG, SIP, SOR, GMG, SAMG y WHS. Los “solvers” disponibles para el MODFLOW – SURFACT 2.2 son: PCG, SIP, SOR y PCG4. A continuación se presenta una descripción de los diferentes algoritmos de cálculo.

### *PCG (Preconditioned Conjugate-Gradient Package)*

El algoritmo de cálculo PCG usa el método de gradiente conjugado preconditionado para resolver las ecuaciones simultáneas producidas por el modelo. Las condiciones de flujo lineales y no lineales pueden ser simuladas mediante este “solver”. El PCG incluye dos opciones de preconditionamiento: el preconditionamiento de Cholesky modificado incompleto, que es eficiente en computadores escalares; y el preconditionamiento de polinomio, que requiere menos capacidad de almacenamiento en el computador y es más eficiente en computadores vectoriales. La convergencia del “solver” es determinada usando cambios de carga y criterios residuales. Los problemas no lineales son solucionados usando las iteraciones de Picard.

El PCG trabaja con una aproximación de dos niveles para una solución en un paso de tiempo, iteraciones internas y externas. Las iteraciones externas son usadas para variar los parámetros de la matriz preconditionada en una aproximación hacia la solución. La iteración externa actualiza los parámetros hidrogeológicos del sistema (por ejemplo, transmisibilidad, espesor saturado, almacenamiento) en el set de matrices preconditionadas. Las iteraciones internas continúan hasta que el número máximo de iteraciones internas definidas por el usuario se ejecute, o se alcancen los criterios de convergencia finales. Las iteraciones externas continúan hasta que los criterios de convergencia finales sean alcanzados en la primera iteración interna después de una actualización. A continuación se presenta una descripción de los parámetros del “solver” PCG:

#### *Número Máximo de Iteraciones Externas (MXITER): (default = 25)*

Este parámetro proporciona un límite superior al número de iteraciones externas para ser realizadas. El número máximo de iteraciones sólo será usado, si una solución convergente no es alcanzada de antemano. Veinticinco iteraciones deberían ser adecuadas para la mayor parte de los problemas. Si se alcanza el número máximo de iteraciones externas y un error apropiado de balance de masa no es alcanzado, este valor debe ser aumentado.

#### *Número Máximo de Iteraciones Internas (ITERI): (default = 10)*

Este parámetro proporciona un límite superior al número de iteraciones internas para ser realizadas. Este número de iteraciones sólo será usado, si una solución convergente para el set de matrices en la iteración externa no es alcanzada de antemano. Diez iteraciones internas deberían ser adecuadas para la mayor parte de los problemas. Más de diez iteraciones por lo general no mejorarán la solución, debido a que la solución es actualizada al retornar a las iteraciones externas.

#### *Criterio de Cambio de Carga para la Convergencia (HCLOSE): (default = 0.01)*

Después de que cada iteración externa se ha completado, el “solver” comprueba el cambio máximo de la solución en cada celda. Si el cambio máximo de la solución está por debajo de un set de tolerancia de convergencia (unidades de pies o metros), entonces la solución ha convergido y el “solver” se detiene, de no ser así una nueva iteración externa comienza.

Normalmente una solución de 0.01 (pies o metros) es suficiente para la mayor parte de los modelos, a no ser que la diferencia máxima de carga a través del dominio modelado sea menos de un pie o un metro. Si no se obtiene un balance de masa apropiado y el número de iteraciones internas y externas está dentro de los máximos, este valor puede ser disminuido en un orden de magnitud.

*Criterio Residual para la Convergencia (RCLOSE):* (default = 0.01)

Mientras el criterio de cambio de carga es utilizado para juzgar la convergencia total del “solver”, el criterio residual es usado para juzgar la convergencia de las iteraciones internas del “solver”. Si el valor máximo absoluto del residual en todos los nodos es menor que la tolerancia especificada (unidades de  $L^3/T$ ) entonces el “solver” continuará con la siguiente iteración externa.

El criterio residual es dependiente de la unidad. El valor por default de 0.01 es suficiente si sus unidades de longitud son pies o metros y sus unidades de tiempo son segundos. Si sus unidades de tiempo no son segundos, se debería multiplicar el valor default por el número de segundos en su unidad de tiempo.

*Factor de humedad (DAMP):* (default = 1)

El factor de humedad puede ser usado para restringir el cambio de carga de una iteración a la siguiente, normalmente es útil en problemas no lineales. El DAMP hace que el cambio de solución sea lento, evitando así desviaciones falsas provocadas por efectos no lineales en las soluciones intermedias. Los valores del DAMP menor que 1 restringen el cambio de carga, mientras los valores mayores que 1 aceleran el cambio de carga. Para problemas lineales, ningún humedecimiento es necesario y el DAMP debería ser igual a 1. En problemas no lineales, para lograr la convergencia puede ser necesario restringir el cambio de carga ( $DAMP < 1$ ), los valores de DAMP entre 0.5 y 1 son generalmente suficientes. Este parámetro es similar a los parámetros de aceleración usados en otros “solvers”.

*Observaciones:*

Si el método de preconditionamiento es usado con Cholesky, el parámetro de relajación puede ser utilizado. Aunque el valor default sea 1, en algunos casos un valor de 0.97-0.99 puede reducir el número de iteraciones requeridas para la convergencia.

***SIP (Strongly Implicit Procedure Package)***

El SIP es un método que resuelve amplios sistemas de ecuaciones lineales simultáneas a través de iteraciones. La ventaja del SIP consiste en que este algoritmo de cálculo es bastante estable y generalmente converge a una solución, pero a menudo es muy lento. No es tan rápido como el “solver” PCG, pero requiere menos memoria para calcular la solución. Debido a que cada ecuación implica hasta siete valores desconocidos de carga y el set de valores desconocidos cambia de una ecuación a la siguiente en toda la grilla, las ecuaciones para toda la grilla deben ser calculadas simultáneamente en cada paso de tiempo. A continuación se presenta una descripción de los parámetros del “solver” SIP:

*Número Máximo de Iteraciones (MXITER):* (default = 200)

Es el límite superior del número de iteraciones para ser realizadas. El número máximo de iteraciones sólo será considerado si una solución convergente no es alcanzada de antemano. Doscientas iteraciones deberían ser adecuadas para la mayor parte de los problemas. Si se alcanza el número máximo de iteraciones y un error apropiado de balance de masa no es alcanzado, este valor debe ser aumentado.

*Número de Parámetros de la Iteración (NPARM):* (default = 5)

Las ecuaciones de diferencias finitas que describen el sistema de flujo de aguas subterráneas pueden ser escritas en forma matricial como  $[A] \{h\} = \{q\}$ . Donde  $[A]$  es la matriz de coeficiente,  $\{h\}$  es la serie de cargas y  $\{q\}$  es la serie de flujos. El número de parámetros de la iteración indica el número de los parámetros que serán usados para transformar la matriz de coeficientes inicial  $[A]$  a una matriz similar que puede ser descompuesta en dos matrices triangulares inferior y superior  $[L]$  y  $[U]$ , respectivamente. El valor default de 5 es generalmente suficiente.

*Factor de Aceleración (ACCL):* (default = 1)

El factor de aceleración controla la magnitud del cambio de carga entre las iteraciones. El factor de aceleración debe ser positivo. Los valores mayores que 1 causarán mayores cambios en la carga entre las iteraciones, pudiendo estos cambios acercarse a la solución de manera más rápida, pero estos también pueden exceder la solución más fácilmente. Los valores menores que 1 causarán cambios más pequeños en la carga, requiriendo más iteraciones para poder alcanzar una solución.

*Criterio de Cambio de Carga para la Convergencia (HCLOSE):* (default = 0.01)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Valor de la Semilla (WSEED):* (default = 0.01)

Existen dos opciones: introducir el valor de la semilla o este valor será calculado al principio de la simulación de los parámetros del problema. Este parámetro de iteración es usado como base para determinar la secuencia de los valores que multiplican cada término del lado derecho de la ecuación y deben ser cíclicos para alcanzar caudales satisfactorios de convergencia. Mientras más fuerte sea la diagonal de la matriz de coeficientes, menos importante será la elección del valor de la semilla.

***SOR (Slice-Successive Overrelaxation Package)***

El algoritmo de cálculo SOR es utilizado para resolver iterativamente grandes sistemas de ecuaciones lineales. El SOR divide la grilla de diferencias finitas en cortes verticales y agrupa las ecuaciones de los nodos en sets discretos, correspondiendo cada set a un corte. En cada iteración, estos sets de ecuaciones son procesados por turnos, resultando un nuevo set de valores estimados de carga para cada corte. Las ecuaciones para cada corte son procesadas y en primera instancia son expresadas en términos de los cambios de cargas calculadas entre iteraciones sucesivas.

El set de ecuaciones correspondiente al corte, entonces es resuelto directamente por eliminación Gaussiana, tratándose a los términos para los cortes adyacentes como cantidades conocidas. Los valores de cambio de carga calculados para cada corte son multiplicados por una variable de aceleración,  $T$ . Los resultados son los valores finales del cambio de carga de la iteración para el corte. Este procedimiento se repite para cada corte secuencialmente hasta que todos los cortes hayan sido procesados, completando así una iteración de dominio. La secuencia entera entonces se repite, hasta que las diferencias entre los valores de cargas calculados en iteraciones sucesivas sean menos que el criterio escogido en todos los nodos de la grilla. A continuación se presenta una descripción de los parámetros del solver SOR:

*Número Máximo de Iteraciones (MXITER):* (default = 50)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo SIP, pero en este caso 50 iteraciones deberían ser adecuadas para la mayoría de los problemas. Si se alcanza el número máximo de iteraciones y un error apropiado de balance de masa no es alcanzado, este valor debe ser aumentado.

*Factor de Aceleración (ACCL):* (default = 1)  
Es igual al definido en el algoritmo de cálculo SIP.

*Criterio de Cambio de Carga para la Convergencia (HCLOSE):* (default= 0.01)  
Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

***GMG (Geometric Multigrid Solver Package)***

El algoritmo de cálculo GMG está basado en un algoritmo de gradiente preconditionado conjugado, que ha sido desarrollado por el USGS para solucionar modelos de flujo de diferencia finita. A diferencia del AMG, el preconditionamiento en GMG está basado en un método conocido como de multigrilla geométrica. El GMG ha demostrado que reduce enormemente el tiempo de ejecución del modelo comparado con otros “solvers” que utilizan una cantidad similar de memoria. A continuación se presenta una descripción de los parámetros del “solver” GMG:

*Número Máximo de Iteraciones Externas (MXITER):* (default = 25)

Para problemas lineales, el MXITER puede ser 1. Para problemas no lineales, el MXITER tiene que ser mayor, pero raras veces mayor que 100. El número máximo de iteraciones sólo será usado si una solución convergente no es alcanzada de antemano.

*Número Máximo de Iteraciones Internas (IITER):* (default = 10)

Un valor de 10 es normalmente suficiente. Con frecuencia es útil especificar un número más pequeño para problemas no lineales para prevenir un número excesivo de iteraciones internas. Este número de iteraciones sólo será usado si una solución convergente para el set de matrices en la iteración "externa" no es alcanzada de antemano.

*Control de Humedad Adaptable (IADAMP):*

Si IADAMP = 0, entonces el valor asignado a DAMP es usado como un parámetro de humedecimiento constante. Si IADAMP = 1, entonces el valor de DAMP es usado para la primera iteración no lineal. El parámetro de humedad adaptable se varía sobre la base del cambio de carga, usando el método de Cooley para iteraciones subsecuentes.

*Criterio de Cambio de Carga para la Convergencia (HCLOSE):* (default = 0.01)  
Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Criterio residual (RCLOSE):* (default = 0.01)

Es el criterio de convergencia residual para la iteración interna. Normalmente se asigna el valor de RCLOSE igual al de HCLOSE. Si RCLOSE es demasiado alto, se pueden requerir iteraciones externas adicionales para solucionar con la exactitud requerida la ecuación lineal.

*Parámetro de Relajación (RELAX):* (default = 1)

Puede ser usado para mejorar el número de la condición espectral del sistema preconditionado. El valor del parámetro RELAX debería ser aproximadamente 1. El parámetro de relajación puede hacer que la factorización no funcione, si esto ocurre el GMG reporta un error y se debe intentar con un valor más pequeño que 1. Este parámetro sólo es utilizado si ISC = 4.

*Control de Discretización en el Preacondicionador de Multigrilla (ISC):*

Los posibles valores para el ISC y sus significados son los siguientes: Si ISC = 0, las filas, columnas y capas son discretizadas. Si ISC = 1, las filas y las columnas son discretizadas, pero no las capas. Si ISC = 2, las columnas y las capas son discretizadas, pero no las filas. Si ISC = 3,

las filas y las capas son discretizadas, pero no las columnas. Si  $ISC = 4$ , no se realiza discretización. Normalmente el valor del ISC debería ser 0 o 1. En el caso que existan grandes variaciones verticales en las conductividades hidráulicas, se debe utilizar un valor de  $ISC = 1$ .

*Factor de humedad (DAMP):* (default = 1)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

### ***SAMG (Algebraic Multigrid Methods for Systems Package)***

El algoritmo de cálculo SAMG fue diseñado para resolver las altas exigencias de memoria de los anteriores “solvers” AMG, manteniendo su adaptabilidad y rápida ejecución. Se realizaron pruebas del SAMG versus el PCG utilizando varios modelos generados con el Visual MODFLOW, estas pruebas demostraron que el tiempo de solución es entre 2.4 y 11.3 veces más rápido con el SAMG. Este algoritmo de cálculo presenta ventajas sobre otros “solvers” disponibles en el MODFLOW-2000 para problemas con grandes grillas (más de 40,000 celdas) y/o una conductividad hidráulica variable (Demmel, 1997). A continuación se presenta una descripción de los parámetros del “solver” SAMG:

*Número Máximo de Iteraciones (MXITER):* (default= 50)

Es el número máximo de veces que las rutinas serán llamadas para obtener una solución. El MXITER nunca es menor que 2 y raras veces mayor que 50. El MXITER es igual a 2 cuando el problema es lineal (todas los estratos son confinados, y ninguna condición de borde es no lineal; la evapotranspiración, el dren, y el río, son condiciones de borde no lineales). Para problemas no lineales, el MXITER es 50 o menor.

*Número Máximo de Ciclos (MXCYC):* (default = 50)

El algoritmo de cálculo es limitado con un máximo de ciclos MXCYC por llamada al mismo. Para la mayor parte de los problemas, la convergencia para cada iteración se alcanza en menos de 50 ciclos. Para problemas no lineales, el mejor funcionamiento se alcanza disminuyendo el Número Máximo de Ciclos y aumentando el Número Máximo de Iteraciones. Esto previene que el “solver” encuentre innecesariamente soluciones muy exactas en las primeras iteraciones de estos problemas no lineales.

*Criterio de Cierre de Balance (BCLOSE):* (default = 0.01)

La rutina es llamada iterativamente hasta que se encuentra el criterio de convergencia BCLOSE, o se alcanza el Número Máximo de iteraciones. Un valor de criterio de convergencia que es demasiado grande puede resultar en el MODFLOW-2000 en errores inaceptablemente grandes de balance de flujo, errores de sensibilidad, o ambos. Si tales problemas existen, se debe disminuir el BCLOSE. La disminución del BCLOSE en un orden de magnitud, disminuirá el error del balance en un orden de magnitud.

*Factor de Humedad (DAMP):* (default = 1)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG. Además el algoritmo de cálculo SAMG proporciona dos estrategias de humedecimiento adaptables; el método de Cooley con la modificación de Huyakorn ( $DAMP = -1$ ) y el método residual relativo reducido ( $DAMP = -2$ ). Estas estrategias de humedecimiento permiten ajustar la cantidad de humedecimiento dependiendo de como la solución de carga va progresando, siendo útiles para problemas no lineales que no convergen debido a la imposición de un valor fijo de DAMP para cada iteración.

*Factor de Humedad Máximo (DUP):* (default = 1)

Es el límite superior para el DAMP, cuando una estrategia de humedecimiento adaptable es usada.

*Factor de humedad Mínimo (DLOW):* (default = 0.2)

Es el límite inferior para el DAMP, cuando una estrategia de humedecimiento adaptable es usada.

*Iteraciones de Gradiente Conjugados (ICG):* (default = 0)

En algunos casos, el SAMG puede tener un mal funcionamiento como consecuencia de un pequeño número de componentes de error que no se reducen durante los ciclos del algoritmo de cálculo. Unas cuantas iteraciones del gradiente conjugado a menudo pueden reducir estos componentes de error y ayudar a la convergencia (Cleary y otros, 2000). En estos casos, el parámetro ICG puede ser puesto en 1 para realizar iteraciones de gradiente conjugados al final de cada ciclo. La activación de esta opción puede disminuir el tiempo de ejecución para algunos problemas, pero esto también aumentará la cantidad de memoria usada por el “solver”.

### ***WHS (Solver for Visual MODFLOW)***

El algoritmo de cálculo WHS utiliza una rutina de aceleración con un gradiente estabilizado bi-conjugado (Bi-CGSTAB) implementado con la descomposición incompleta de Stone para el preacondicionamiento de las ecuaciones diferenciales parciales del flujo de las aguas subterráneas. El WHS se aproxima a la solución de un set de ecuaciones diferenciales parciales iterativamente a través de una solución aproximada.

El WHS trabaja con una aproximación de dos niveles a una solución en un paso de tiempo. Las iteraciones externas son usadas para variar la matriz de parámetros para aproximarse hacia la solución. Mediante las iteraciones externas los parámetros hidrogeológicos del sistema son actualizados (transmisibilidad, espesor saturado, almacenamiento) en el set factorizado de matrices. Los diferentes niveles de factorización permiten a estas matrices ser inicializadas de diferentes maneras para aumentar la eficiencia de la solución y la estabilidad del modelo. Las iteraciones internas son usadas para iterativamente solucionar las matrices creadas en las iteraciones externas. A continuación se presenta una descripción de los parámetros del “solver” WHS:

*Número Máximo de Iteraciones Externas (MXITER):* (default = 50)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG, pero en este caso 50 iteraciones externas deberían ser adecuadas para la mayoría de los problemas. Si se alcanza el número máximo de iteraciones y un error apropiado de balance de masa no es alcanzado, este valor debe ser aumentado.

*Número Máximo de Iteraciones Internas (ITER1):* (default = 25)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG, pero en este caso 25 iteraciones internas deberían ser adecuadas para la mayoría de los problemas. Si se alcanza el número máximo de iteraciones y un error apropiado de balance de masa no es alcanzado, este valor debe ser aumentado.

*Criterio de Cambio de Carga para la Convergencia (HCOLSE):* (default = 0.01)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Criterio Residual para la Convergencia (RCLOSE):* (default = 0.01)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Factor de Humedad para Iteraciones Externas:* (default = 1)

Este factor permite al usuario reducir (humedecer) el cambio de carga calculado durante cada iteración sucesiva externa. Su funcionamiento se encuentra definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Criterio Residual Relativo:* (default = 0)

Este parámetro proporciona otro método de comprobación para la convergencia de la iteración interna. Este método compara el residual de la iteración interna más reciente al residual de la iteración interna inicial. Una vez que el residual de la iteración interna más reciente es menor que el residual de la iteración interna inicial, la iteración externa actual se completa y una nueva iteración externa comienza.

*Nivel de Factorización:* (default = 0)

Existen dos niveles de factorización disponible en el “solver” WHS, 0 y 1. El nivel 0 requiere más iteraciones externas, pero menos memoria. El nivel 1 requiere menos iteraciones externas, pero más memoria.

***PCG4 (Preconditioned Conjugate-Gradient Package)***

El algoritmo de cálculo PCG4 es una extensión del “solver” PCG y se encuentra disponible solamente con el programa MODFLOW-SURFACT. Sus exigencias de entrada son similares a aquellas del PCG. La capacidad de almacenamiento del computador requerida por el PCG4 es mayor a la requerida por el PCG, sin embargo el PCG4 es un algoritmo de cálculo simple, robusto y eficiente.

*Número Máximo de Iteraciones Externas (MXITER):* (default = 25)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Número Máximo de Iteraciones Internas (ITERI):* (default = 10)

Es igual al definido en el algoritmo de cálculo PCG.

*Índice de Linealización de Newton-Raphson (INEWT):*

La Linealización de Newton-Raphson será realizada si es que es elegida. El esquema de Newton-Raphson facilita la convergencia de simulaciones de flujo no lineales de zonas no saturadas con agua y aire como las fases activas. Este método integra un algoritmo que retrocede para controlar el tamaño del paso en el MODFLOW para problemas no lineales. El esquema que retrocede limita el aumento de los residuales en cualquier iteración, mientras una técnica de no relajación ayuda con el comportamiento oscilatorio de la solución entre las iteraciones.

*Factor de Retroceso (BFACT):* (default = 0.15)

Es un factor que realiza el retroceso, si es que el criterio de reducción residual no es alcanzado. El BFACT debe ser mayor que 0 y menor que 1.

*Factor de Fuerza de Retroceso (RESRED):* (default = 1.5)

Es el factor de reducción residual para forzar al retroceso. El RESRED debe ser mayor que 0. Si RESRED es menor que 1, el algoritmo fuerza una reducción residual en cada iteración del esquema Newton. Para RESRED mayor que 1, el factor permite aumentos del residual,

permitiendo al algoritmo de Newton moverse fácilmente en los mínimos locales. Al incrementar el RESRED, hay menos posibilidades para el retroceso.

El BFACT y el RESRED se requieren sólo cuando la Linealización de Newton-Raphson (INEWT) es seleccionada.

*Criterio de Cambio de Carga (HCLOSE):* (default = 0.01)

Cuando el valor absoluto máximo del cambio de carga en todos los nodos durante una iteración es menor o igual al HCLOSE, las iteraciones no lineales se detienen.

*Número Máximo de Ortogonalizaciones (MNORTH):* (default = 5)

Es el número máximo de ortogonalizaciones permitidas por el algoritmo para resolver la ecuación de la matriz de transporte. Un valor sugerido de MNORTH es de 5 a 10, valores menores pueden debilitar el funcionamiento del “solver”. Los valores de MNORTH más grandes que 10 pueden ayudar al algoritmo a solucionar problemas difíciles, pero en general, se espera disminución en el rendimiento para MNORTH mayores que 10.

*Criterio de Cierre Relativo (RCLOSE):* (default = 0.01)

El criterio de cierre relativo para la convergencia, es un parámetro usado para comprobar la convergencia de la iteración interna y ésta es alcanzada cuando los valores de RCLOSE o de HCLOSE han sido encontrados por los cambios respectivos en cualquier iteración. Si RCLOSE es 0, su valor es tomado como  $HCLOSE * 10^{-3}$ .

*Índice de Linealización (IDMPBOT):*

Es un índice de humedad que usa la geometría del acuífero para restringir las oscilaciones de las cargas entre las iteraciones. El humedecimiento debe ser seleccionado para ser aplicado, por defecto se encuentra seleccionado.

El humedecimiento es eficaz para alcanzar la convergencia en sistemas acuíferos con geometría bastante irregular, que de otra manera tendrían dificultad para converger, debido a cargas que dentro de cualquier iteración caen considerablemente por debajo de la cota de fondo del sistema modelado.