

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“ANÁLISIS NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO:
CASO MINA SUBTERRÁNEA DE VAZANTE - BRASIL”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR

Bach. NINANYA DE LA CRUZ HUGO DAVID

Asesor: Dr. Ing. MOGROVEJO GUTIÉRREZ RUBÉN

LIMA - PERÚ

2015

DEDICATORIA

A mis hermanos Anthony y Karen

INDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	3
1.1. Generalidades	3
1.2. Marco geográfico	5
1.3. Problemática	6
1.4. Objetivos	8
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Conceptos fundamentales para el modelaje de aguas subterráneas	10
2.1.1. Aguas subterráneas	10
2.1.2. Definiciones Hidrogeológicas	11
2.1.3. Flujo en medio poroso y saturado	13
2.2. Modelo conceptual para flujo de aguas subterráneas	17
2.2.1. Dominio y contornos del modelo	17
2.2.2. Unidades hidrogeológicas y propiedades hidráulicas	18
2.2.3. Recarga y descarga de aguas subterráneas	18
2.2.4. Interacción de aguas subterráneas y aguas superficiales	19
2.2.5. Balance de masa de aguas subterráneas	20
2.3. Configuración del modelaje numérico	20
2.3.1. Delimitación del dominio	20
2.3.2. Discretización horizontal y vertical	21
2.3.3. Condiciones y restricciones de contorno	22
2.3.4. Superficie libre	27
2.3.5. Convergencia del modelo	28
2.4. Calibración de aguas subterráneas y análisis de sensibilidad	30
2.4.1. Técnicas de calibración	30
2.4.2. Datos necesarios para calibración	31
2.4.3. Verificación de la calibración	31
2.4.4. Análisis de sensibilidad	33

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS - CONTROL DE AGUAS EN PROYECTOS DE MINERACIÓN	34
3.1. Concepto de abatimiento y control de aguas	34
3.2. Despresurización de taludes	35
3.3. Técnicas de control de aguas en minas subterráneas	36
3.3.1. Impermeabilización de la superficie del terreno	36
3.3.2. Congelamiento del terreno	37
3.3.3. Grouting	38
3.3.4. Drenaje de mina	38
3.4. Técnicas de control de aguas en minas a cielo abierto	39
3.4.1. Técnicas activas	40
3.4.2. Técnicas pasivas	45
3.5. Criterios para la selección de la técnica de abatimiento	47
CAPÍTULO 4: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	53
4.1. Mina Subterránea de Vazante	53
4.2. Aspectos intervinientes en el escenario hidrogeológico local	56
4.2.1. Condicionantes geológicos	56
4.2.2. Génesis de las estructuras cársticas	58
4.2.3. Condicionantes geomorfológicas	59
4.3. Compilación e interpretación de los datos disponibles	60
4.3.1. Piezómetros y pozos medidores de nivel de agua	60
4.3.2. Caudales bombeados en la mina	61
4.3.3. Pluviometría	62
4.3.4. Monitoreo del río Santa Catarina	62
4.4. Modelo hidrogeológico conceptual	65
4.4.1. Dominio del modelo	65
4.4.2. Unidades hidrogeológicas y propiedades hidráulicas	65
4.4.3. Recarga y descarga de aguas subterráneas	67
4.5. Revisión y recalibración del modelo numérico existente	67
4.5.1. Revisión de los puntos de calibración	70
4.5.2. Revisión y modificación de las condiciones de contorno	72
4.5.3. Recalibración del modelo numérico para el medio poroso continuo-fracturado 2014	73
4.5.4. Implementación de elementos discretos 1D como estructuras cársticas	77

4.5.5. Recalibración del modelo numérico continuo-fracturado considerando las estructuras cársticas	81
4.6. Escenarios de comportamiento de flujo subterráneo	84
4.6.1. Escenario 1: Flujo subterráneo sin considerar estructuras cársticas	85
4.6.2. Escenario 2: Flujo subterráneo sin estructuras cársticas e impermeabilizando el río	87
4.6.3. Escenario 3: Flujo subterráneo considerando estructuras cársticas	91
4.7. Escenario 4: Flujo subterráneo considerando estructuras cársticas e impermeabilizando el río	93
4.7.1. Resumen de los resultados de los escenarios	96
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1. CONCLUSIONES	96
5.2. RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
Anexo: Mapa geológico	103

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Ubicación de la mina subterránea de Vazante en relación al río Santa Catarina y a las estaciones de medición.	7
Figura 1.2 - Mecanismos de infiltración desarrollados: Infiltración estacional (alta precipitación), “flujo en conducto” (en cársticos interconectados) e Infiltración a través de fracturas y permeabilidad del macizo rocoso.	8
Figura 2.1 - Ilustración esquemática del flujo de aguas subterráneas.	11
Figura 2.2 - Condición confinada y no confinada en acuífero - sección vertical.	15
Figura 2.3 - Representación esquemática (a) superficie freática mayor que el nivel del río (b) superficie freática menor que el nivel en el río (c) corriente del río desconectada del acuífero.	20
Figura 2.4 - Condición de contorno tipo 1- carga constante.	24
Figura 2.5 - Condición de contorno tipo 2	24
Figura 2.6 - Flujo de Infiltración al acuífero.	25
Figura 2.7 - Flujo de Exfiltración al río.	26
Figura 2.8 - Sistema de acuíferos conteniendo el pozo de bombeo multicapas.	26
Figura 2.9 - (a) Superficie libre en Malla fija, (b) Superficie libre en Malla móvil.	27
Figura 3.1 - Esquematización de los trabajos de concreto en el río Oerías.	37
Figura 3.2 – Representación esquemática de los pozos de bombeo (exterior e interior) en la cava con su respectivo sistema de drenaje superficial.	40
Figura 3.3 – Representación esquemática del sistema pozos de bombeo y drenes horizontales, con su respectivo sistema de drenaje y de bombeo para afuera de la cava.	43

Figura 3.4 – Representación esquemática de las técnicas activas que incluyen puntas filtrantes, drenes horizontales, sistema de drenaje y estación de bombeo.	45
Figura 3.5 – Representación esquemática de la técnica pasiva Pared <i>cut-off</i> aplicada a taludes para el bloqueo del flujo de agua.	47
Figura 4.1- Caminos de flujos presumidos entre el río y la mina con base en las formaciones locales y regionales mapeadas	54
Figura 4.2 - Niveles de desenvolvimiento de estructuras cársticas en su condición original	59
Figura 4.3 - Mapa de distribución de puntos de monitoreo en el área de influencia definida para los estudios hidrogeológicos	60
Figura 4.4 - Diagrama de la historia de los promedios anuales de precipitación x bombeo	61
Figura 4.5 - Puntos de monitoreo fluviométrico analizados próximos a la mina.	64
Figura 4.6- Perfil hidrogeológico esquemático en la Mina Vazante.	66
Figura 4.7 - Modelo numérico de flujo en FEFLOW que muestra la malla de elementos finitos e incluye la localización de la mina de Vazante y de las estructuras 2D (Fallas) en la situación actual de la mina.	69
Figura 4.8 – Unidades hidrogeológicas del modelo numérico de flujo en FEFLOW 6.2.	70
Figura 4.9 - Modelo numérico de flujo en FEFLOW – Puntos de Calibración 2013.	71
Figura 4.10 - Curva de calibración entre niveles medidos y calculados por el modelo.	75
Figura 4.11 - Superficie potenciométrica simulada para la mina actual (Cota 326).	77
Figura 4.12 – Representación esquemática de las estructuras cársticas en la región de la mina de Vazante	78

Figura 4.13 - Representación numérica de los elementos discretos 1D en el FEFLOW: <i>Arbitrary node</i> y <i>Edge slice</i>	79
Figura 4.14 - Análisis de sensibilidad para la determinación de las variables que rigen el comportamiento de flujo en el interior de los elementos 1D (Estructuras cársticas).	79
Figura 4.15 - Curva de calibración entre niveles medidos y calculados por el modelo con estructuras cársticas.	82
Figura 4.16 - Superficie potenciométrica simulada para la mina actual (Cota 326) considerando las estructuras cársticas en el modelo.	83
Figura 4.17 - Localización de la sección transversal a ser analizada para los escenarios 1 y 2 de análisis de flujo.	85
Figura 4.18 - Escenario 1: Superficie del nivel freático generado por las condiciones de contorno impuestas en el río y en la mina.	86
Figura 4.19 - Escenario 1: Intensidades de flujo de recarga por río y descarga en la mina, para su posterior bombeo.	86
Figura 4.20 - Escenario 1: Trayectorias de flujo (líneas de color negro) del río para la mina.	87
Figura 4.21 – Escenario 2: Representación esquemática del tramo del río impermeabilizado (impermeabilización total)	88
Figura 4.22 - Escenario 2: Zona de impermeabilización total del río (6,3 km)	89
Figura 4.23 - Escenario 2: Representación esquemática del tramo del río impermeabilizado (impermeabilización parcial)	90
Figura 4.24 - Escenario 2: Zona de impermeabilización parcial del río (2 km)	90
Figura 4.25 – Localización de las estructuras cársticas en el dominio y de la sección de análisis para los escenarios 3 y 4.	91
Figura 4.26 – Escenario 3: Características del flujo influenciado a través de las estructuras cársticas.	92
Figura 4.27 – Escenario 3: Tramo del río de mayor infiltración para el acuífero que incluye los caminos preferenciales de flujo.	93

Figura 4.28 - Escenario 4: Zona de impermeabilización total del río (3.6 km)	94
Figura 4.29 - Escenario 4: Zona de impermeabilización parcial del río (4,5 km)	95
Figura 4.30 – Comparación de los resultados de los caudales de descarga de los escenarios con y sin estructuras para el caso da Mina subterránea.	96
Figura 4.31 - Comparación de los resultados de las longitudes de infiltración de los escenarios con y sin estructuras para el caso de la Mina subterránea.	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 - Piezómetros instalados en las diferentes unidades hidrogeológicas del área de influencia de la Mina Vazante a diciembre de 2013.	61
Tabla 4.2 - Localización de los puntos de monitoreo de caudal (m ³ /h) en los cursos del agua del área de interés de estudio	62
Tabla 4.3 - Relación entre el acuífero y el río Santa Catarina (ganancia/pérdida del agua del río)	63
Tabla 4.4 - Distribución de los puntos de calibración de cargas hidráulicas	72
Tabla 4.5 - Parámetros hidrodinámicos considerados en el modelo de flujo.	74
Tabla 4.6 - Balance de masa para la simulación de la mina actual	76
Tabla 4.7 - Parámetros hidrodinámicos considerados en el modelo de flujo con estructuras cársticas.	82
Tabla 4.8 - Balance de masa para la simulación de la mina actual, considerando caminos cársticos.	83
Tabla 4.9 - Localización UTM de las estructuras cársticas en el modelo numérico.	93

Lista de Símbolos

\mathbf{A}	Matriz de rigidez A
AMG	Método de la multimalla algebraica
B	Espesura del acuífero confinado
BiCGSTAB	Método Lanczos estabilizado del Gradiente Biconjugado
CG	Método del Gradiente Conjugado
CGS	Método Lanczos de la Raíz del Gradiente Conjugado
e	Elemento finito
ET	Evapotranspiración
ε	Porosidad efectiva
GMRES	Método del residuo mínimo generalizado
h	Espesura de la camada saturada del acuífero
h_C	Carga hidráulica calculada
h_D	Carga hidráulica conocida
h_m	Carga hidráulica medida
k	Conductividad hidráulica
K	Tensor de conductividad hidráulica
$k(\mathbf{A})$	Número de la condición de la matriz de rigidez A
MAE	Error Promedio Absoluto
ME	Error Promedio
MG	Método de la Multimalla
N_E	Número del elemento finito
N_P	Número de puntos de los elementos
n	Porosidad
n	Número total de datos
ORTHOMIN	Método del residuo mínimo ortogonal
p	Poro-presión
Q	Función general de fuente/dren
Q_h	Fuente de recarga
Q_{hw}	Fuente pozo (extracción o inyección)
q	Velocidad de Darcy

q_h	Flujo conocido impuesto
R	Coeficiente de correlación
RMS	Error de la Raíz Promedio Cuadrática
S	Almacenamiento
S_r	Retención específica
S_s	Almacenamiento específico
S_y	Rendimiento específico
w	Función de ponderación del método de Galerkin
$[K_{xx}]$, $[K_{yy}]$ e $[K_{zz}]$	Matrices de conductividad horizontales X,Y y vertical Z
t_0	Tiempo en la condición inicial
Γ	Contorno total
Γ_C	Condición de contorno de Cauchy
Γ_D	Condición de contorno de Dirichlet
Γ_N	Condición de contorno de Neumann
$-\Phi_h(h_C - h)$	Condición de transferencia de flujo
∇h	Cantidad derivada de la carga conocida
O, C e F	Matrices y vectores de la matriz de rigidez
1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
N_i, N_j	Funciones de interpolación
R	Coeficiente de correlación
R^2	Coeficiente de determinación
\forall	Operador lógico
∇	Operador vectorial
Ω	Dominio del modelo
Σ, \int	Operadores algebraicos

Glosario

Cantera: Región excavada que puede tener las dimensiones de una cava cuyo material extraído es usado en la construcción de obras civiles

Cava: Es la excavación a cielo abierto en forma de una enorme cavidad, con bancadas (gradas) descendientes para la extracción de bienes minerales. El material excavado es compuesto de mineral estéril

Piping: Erosión interna de macizo debido a altos gradientes

Overburden: Material estéril (que no contiene material) a ser escavado

Slide: Superficie entre capas numéricas en el FEFLOW

Water bearing structures: Son estructuras que contienen agua capturada por rocas, prácticamente impermeables

RESUMEN

El abatimiento y control de las aguas subterráneas son actividades implementadas y monitoreadas de forma continua a lo largo de la vida de proyectos de minería, ya sea del tipo a cielo abierto o subterránea. Una implementación apropiada y eficiente de estas actividades dependen de los estudios hidrogeológicos de grande porte, que permiten evaluar los sistemas de control de agua más adecuados, necesarios en las actividades mineras. La búsqueda de la eficiencia técnica-económica de estos procesos demandan análisis numéricos de flujo tridimensionales de toda la región en estudio, caracterizada por profundas y complejos estratos de materiales permeables abajo del nivel freático, como normalmente abarcan proyectos de minería, donde las soluciones analíticas ya no pueden ser más aplicadas. Esta tesis busca contribuir a una mejor comprensión de soluciones numéricas que representan el comportamiento de flujo subterráneo a través de un estudio de caso de una mina subterránea que presenta problemas de infiltración en su interior. En este estudio fueron incorporados elementos discretos 1D como representación de caminos cársticos preferenciales, en un modelo 3D de elementos finitos realizado con el programa FEFLOW. Fueron discutidas las ventajas de incorporar tales caminos preferenciales de forma explícita, cuantificando el flujo que pasa por medio de éstas, ya que estas estructuras alimentan a la mina a través de conexiones directas con un río adyacente. Estos elementos discretos permiten representar de forma más realista el medio hidrogeológico y al mismo tiempo evaluar de mejor forma los efectos en el comportamiento de flujo subterráneo debido a la impermeabilización superficial del río como una solución más coherente para este tipo de problemas de infiltración.

Palabras claves: Control de aguas en mineración; Flujo en medios porosos fracturados; Análisis transitorio; Método de los elementos finitos.

ABSTRACT

Dewatering and groundwater control are activities continuously implemented and monitored throughout the duration of underground mining or open pit projects. The proper and efficient implementation of these activities depends on large hydrogeological studies, for assessing the most appropriate control systems. The demand for technical and economic efficiency of these processes requires three-dimensional flow numerical analysis of the entire study area, characterized by deep and complex stratifications of permeable materials below the water table, as usually cover mining projects, where analytical solutions can not be applied. The present research contributes to a better understanding of the numerical formulations that represent the behavior of groundwater flow via a particular case study—This one is about an underground mine. In this case, 1D discrete elements were incorporated within a finite-three dimensional model in order to represent preferential flow paths. The advantages of incorporating such features explicitly to quantify the flow passing through them, that feed the mine through direct connections with an adjacent river, were discussed. The use of discrete elements allows for a more realistic representation of the hydrogeological environment and, at the same time, a more refined assessment of the effects on the behavior of groundwater flow due to surface sealing of the river, as the most coherent solution to this infiltration problem.

Keywords: Control of water in mining; Flow in fractured porous media; Finite element method; Transient analysis.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Procesos de excavación en una mina debajo de la superficie freática pueden crear una serie de problemas relacionados con el agua que podrían afectar la eficiencia operacional y viabilidad económica de operación en la mina (Doulati Ardejani *et al.*, 2003). Por otro lado, el agua es también indispensable para los diversos procesos mineros.

Procedimientos de abatimiento de la superficie freática permiten la extracción del agua en regiones de excavación de la mina, dejándola en condiciones de trabajabilidad, y al mismo tiempo, permiten aprovechar esta agua por tecnologías de re-uso en distintas áreas de la minería. Estos procesos son conocidos como técnicas de control de agua, que son continuamente implementadas y monitoreadas durante los procesos de excavación y a lo largo de la vida útil de los proyectos de mineración.

Si por un lado un estudio geológico de un depósito de mineral a ser explorado permite conocer y calcular la disposición de las reservas a explorar, direccionándolo, básicamente, a la correcta elección del método de exploración del mineral con el menor costo, por otro lado, un estudio hidrogeológico detallado del depósito permite valorar los sistemas de control de agua más adecuados, necesarios para permitir la actividad minera. La implementación de un apropiado sistema de control de agua puede facilitar los procesos de excavación de una mina, caracterizada por estratificaciones complejas de materiales permeables abajo de la superficie freática. Un sistema inadecuado o no controlado del flujo subterráneo puede, por presión hidrostática o exfiltración, causar *piping*, levantamiento de la base de la excavación, o reducir la estabilidad de los taludes de excavación (en el caso de una mina a cielo abierto), o colapsar o causar subsidencia (en el caso de una mina subterránea).

Modelajes numéricos mediante el métodos de elementos finitos o diferencias finitas son herramientas versátiles y de gran ayuda cuando aplicadas a este tipo de procesos de excavación y de control de aguas,

especialmente cuando se trata de aplicaciones tridimensionales, con heterogeneidad y anisotropía de las propiedades de los materiales y de grandes proporciones en área y profundidad de las estratificaciones, como normalmente abarcan proyectos de mineración, donde soluciones analíticas no pueden más ser aplicadas. Parte de su capacidad está también en permitir la comprensión, interpretación y el entendimiento de los procesos que rigen esos sistemas reales complejos, así como la incorporación y optimización de las técnicas de control de agua a emplearse en los procesos de excavación.

Simulaciones numéricas son empleadas en proyectos de hidrogeología en la mineración, permitiendo tanto la calibración de las propiedades hidráulicas mediante la incorporación de las adecuadas condiciones de contorno, así como previsiones de respuestas hidráulicas ante diferentes condiciones de flujo que puedan ocurrir, con base en un modelo conceptual bien definido que represente el comportamiento hidrogeológico de la región en estudio. De acuerdo con Aryafar *et al.*, 2007, los resultados de tales simulaciones son usados para desarrollar una estrategia apropiada para el control de las aguas, con el objetivo de minimizar problemas operacionales debajo de la superficie freática y problemas ambientales en la fase de viabilidad en el proyecto de mineración.

Esta tesis comprende el estudio del flujo subterráneo para el caso de la exploración de una mina subterránea situada en Brasil, que presenta problemas de infiltración, representado principalmente, por altos caudales en los conductos cársticos asociados a estructuras geológicas preferenciales en las galerías de la mina y la potencialización o inducción al surgimiento de dolinas.

Las trayectorias de flujo subterráneo y sus mecanismos de infiltración existentes hacen necesario realizar un estudio hidrogeológico más completo que contemple los caminos preferenciales rastreados así como un modelo más realista.

Por tanto, análisis numéricos tridimensionales hidrogeológicos por el método de los elementos finitos con el programa FEFLOW 6.2 están siendo estudiados, en condiciones de flujo permanente y transitorio para las condiciones de exploración actuales de la mina. Estos análisis comprenden la

elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual, el desarrollo de una metodología de uso de condiciones de contorno y de restricción, la calibración del modelo numérico y la verificación de las respuestas del flujo subterráneo generados por la incorporación de distintas técnicas de control de aguas, como solución para el problema de infiltración.

En el caso específico del estudio de caso, modelajes numéricos de aguas subterráneas son utilizados para simular estos sistemas de flujos, y en este caso particular, para la simulación de las características del flujo en los conductos identificados por los estudios isotópicos. La identificación de las posibles trayectorias de flujo entre puntos aguas arriba de la mina de Vazante, las planicies y márgenes del río Santa Catarina y el interior de la mina subterránea permitirán el cómputo de una eventual contribución de las aguas superficiales para la mina subterránea por medio de estas estructuras cársticas. En este contexto, una recalibración del modelo hidrogeológico fue realizada para servir como plataforma para la evaluación del efecto de estrategias atenuantes, tales como el reposicionamiento o revestimiento del río en los locales en que fueron registradas pérdidas o en que su existencia sea presumida; o, por último, del bloqueo de conductos formados por disolución. El modelo propuesto en esta tesis también permite la previsión del efecto de la reducción de las pérdidas de agua del río sobre el área y sobre la profundidad del cono de depresión existente.

A continuación está describiendo algunos aspectos importantes que componen la estructura de esta tesis.

1.2. Marco geográfico

La mina subterránea de Vazante, localizada en el municipio de Minas Gerais en Brasil, es destinada a la labra en áreas cársticas para el beneficio de zinc. Esta mina viene explorando este mineral desde 1969 a través de procesos de labra a cielo abierto, cuyas actividades subterráneas iniciaron en el año 1982. Actualmente, la mina de Vazante consiste en múltiples niveles de mineración subterránea situados debajo de la superficie freática, donde la remoción del agua subterránea que entra en la mina crea un desnivel en la

superficie piezométrica superior o igual a 180 metros. Este cono de depresión origina altos gradientes hidráulicos en la región entre el río Santa Catarina y las actividades subterráneas de mineración. El río Santa Catarina escoa del oeste al este a aproximadamente 1 km al sur de la mina (Figura 1.1) atravesando superficialmente la región de Dolomito y el área del cono de depresión de la superficie freática creado por la remoción del agua de la mina. Adicionalmente, la mineralización del zinc (willemita y hemimorfita) en la mina es encontrada en una zona de cizallamiento que descansa en la dirección noreste que atraviesa una secuencia de rocas carbonáticas y pelíticas pertenecientes al grupo Vazante neo-proterozóico.

Como resultado de la combinación de los factores naturales y antrópicos pueden destacarse algunas características percibidas que son de preocupación para las operaciones mineras, tales como altos caudales en los conductos cársticos asociados a estructuras geológicas preferenciales en las galerías de la mina y la potencialización o inducción al surgimiento de dolinas o sumideros además de las naturalmente ya registradas.

1.3. Problemática

La unidad de Vazante está inserida en el contexto de terrenos cársticos, que, asociados a procesos tectónicos que actuaron en el área, comandan la dinámica de la circulación hídrica y sus relaciones con la morfología del relieve y la ocurrencia de estructuras típicas de este ambiente, tales como surgencias, semidoros y cavernas (Figura 1.2). Aliándose a estos factores naturales, debe considerarse todavía que el área de interés viene sufriendo intervención del abatimiento del nivel freático, procedimiento necesario para el avance de la labra del mineral en profundidad.

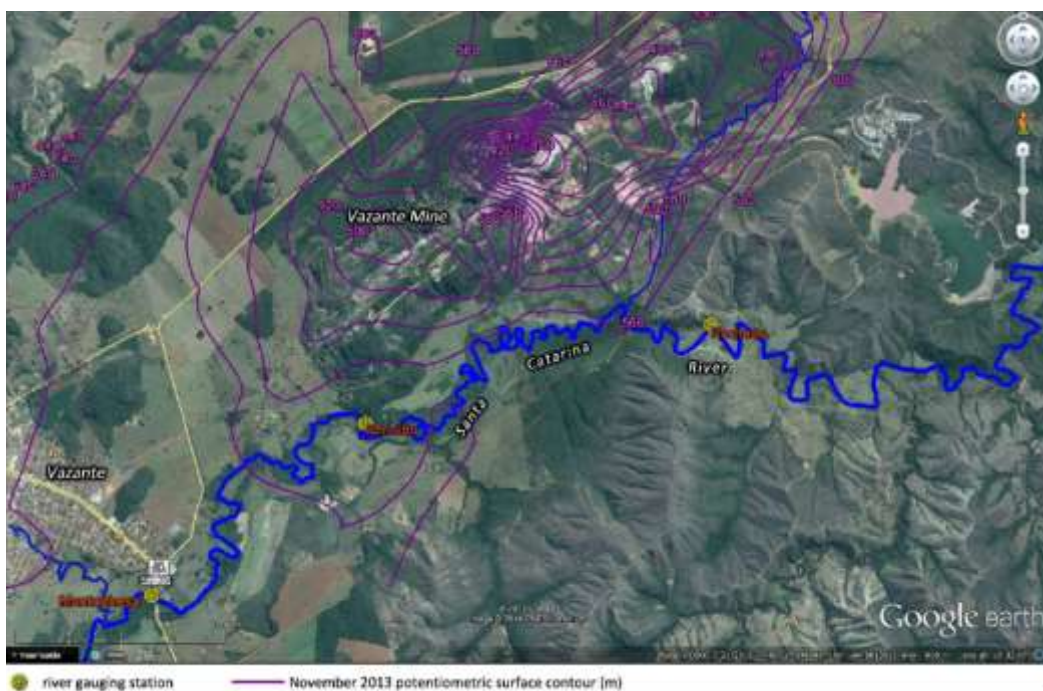
Problemas de infiltración de flujo subterráneo para la mina son influenciados por estas estructuras cársticas localizadas en la superficie del terreno y circunyacente al río Santa Catarina, que tienen contacto con el acuífero e incrementan el caudal en la mina y cuyo efecto es más intenso en áreas bajo la influencia del abatimiento del nivel freático por bombeo, situación

que viene colocando en riesgo las operaciones mineras y la región circunyacente a la mina, que necesita ser solucionada en un corto plazo.

Trayectorias de flujo fueron debidamente identificadas por estudios isotópicos realizados en el área de estudio, para ayudar en la identificación de caminos preferenciales generados por las estructuras cársticas que conllevan a la necesidad de realizar un estudio hidrogeológico más completo que contemple los caminos preferenciales rastreados, como un modelo más realista.

Este problema de infiltración podría ser solucionado por medio de una reevaluación del sistema hidrogeológico, de una forma más completa y realista, que incorpore tales estructuras cársticas que incrementan o permiten el flujo de aguas subterráneas para la mina. Al mismo tiempo, este sistema permitiría evaluar el efecto de las estrategias atenuantes tales como el reposicionamiento o revestimiento del río en los lugares donde se registran pérdidas o que se sospecha su existencia; o, por último, el cierre de los canales formados por la disolución. Esta solución podría facilitar los procesos de excavación de una mina, caracterizada por estratificaciones complejas de materiales permeables abajo del nivel freático.

Figura 1.1 – Ubicación de la mina subterránea de Vazante en relación al río Santa Catarina y a las estaciones de medición.



Fuente: Votorantim, 2013

Figura 1.2 - Mecanismos de infiltración desarrollados: Infiltración estacional (alta precipitación), “flujo en conducto” (en cársticos interconectados) e Infiltración a través de fracturas y permeabilidad del macizo rocoso.



Fuente: Votorantim, 2013

1.4. Objetivos

Esta tesis comprende los siguientes objetivos:

Objeto general

Indicar la utilidad de la aplicación de herramientas computacionales y métodos numéricos para la solución de situaciones complejas, como en el caso de modelos hidrogeológicos de proyectos de mineración, donde soluciones analíticas no pueden más ser aplicadas. Por medio de estos modelos podrán ser verificados niveles piezométricos, así como previsiones de caudales de bombeo en la mina y en la cuenca dolomítica.

Objetos específicos

Implementar numéricamente las estructuras cársticas como estructuras discretas dentro del modelo hidrogeológico continuo de la mina, caracterizando hidráulicamente estos conductos por medio de una recalibración del sistema local y general.

A partir de un modelo completo y más realista verificar el efecto de la reducción de las pérdidas de agua del río para el acuífero y para la mina, como respuesta a la implantación de un sistema de impermeabilización del río total o parcial. Con esto se pretende verificar se existen posibilidades de que ocurra una disminución de la infiltración excesiva de caudales de agua en el interior de la mina, caudal actualmente extraído del interior la mina.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el sentido más amplio, un modelo de aguas subterráneas puede ser considerado como la suma de múltiples componentes, con fundamento físico y matemático, que contribuye a generar un sistema hipotético, describir y predecir cambios artificiales (tensiones aplicadas) o naturales del sistema.

2.1. Conceptos fundamentales para el modelaje de aguas subterráneas

Conceptos, definiciones y terminologías ayudan a la descripción de procesos de flujo, particularmente cuando envuelven procedimientos numéricos que permiten estudiar, prever y calcular respuestas apropiadas ante estos fenómenos complejos. Por tanto, definiciones básicas relacionadas al flujo de agua subterráneas en medios porosos (ampliamente publicadas en la literatura en este asunto, e.g. Bear, 1972 y Bear & Cheng, 2010) son a continuación rápidamente descritas.

2.1.1. Aguas subterráneas

Aguas subterráneas o aguas sub-superficiales, es el término usado para denotar todo el agua que se encuentra abajo de la superficie del terreno, el cual se almacena en los poros entre los granos minerales, en fracturas, o en estructuras cársticas del macizo rocoso. Esta agua es generalmente proveniente de la precipitación o por derretimiento de nieve que se infiltra a través del suelo hasta almacenarse en unidades rocosas subyacentes.

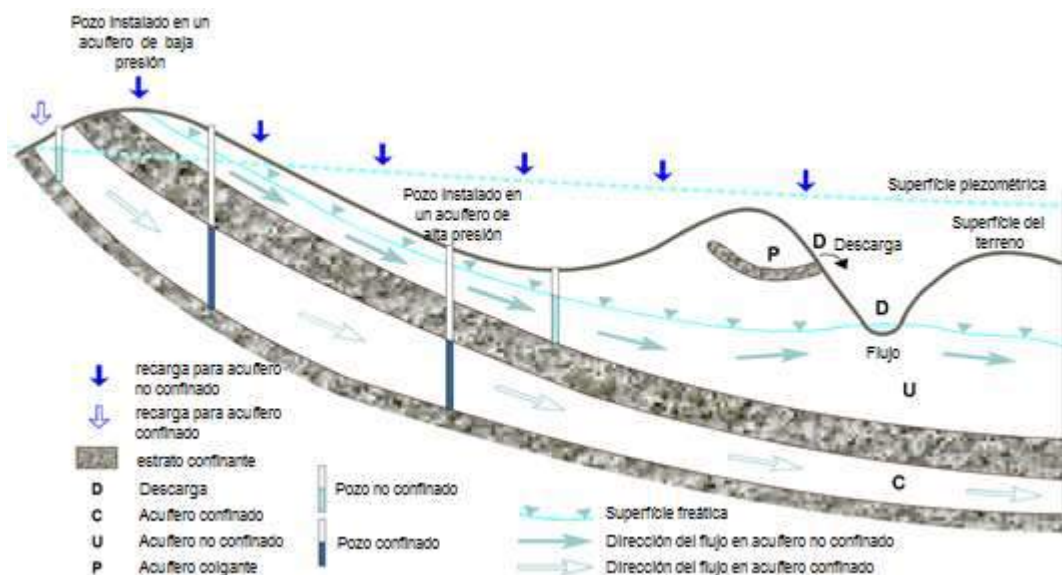
“El contorno entre la zona saturada y la zona no-saturada, donde la presión de poros es cero ($p = 0$), relativa a la presión atmosférica, es denominada de superficie freática, también conocida como nivel de superficie de aguas subterráneas” (Atkinson, 2001). Los materiales que se encuentran abajo de esta superficie determinan el comportamiento del flujo, pudiendo subdividirse en dos grupos: materiales de alta conductividad (tales como rocas fracturadas, gravas y arenas) que permiten un drenaje bastante rápido, y por otro lado, materiales de baja conductividad (tales como arcillas y limos).

El movimiento de aguas subterráneas puede ser influenciado por distintos factores, de los cuales, de acuerdo con Fetter (1994), el principal es la fuerza de gravedad, la cual actúa para atraer el agua para abajo, en dirección al centro de la Tierra. En segundo lugar está la presión que viene de arriba de la zona saturada que genera una presión la cual provoca un movimiento en el agua. Una tercera fuerza es aquella referida como atracción molecular, la cual provoca que el agua se adhiera a los contornos de la superficie sólida creando una tensión superficial cuando están expuestas al aire.

2.1.2. Definiciones Hidrogeológicas

La Figura 2.1 presenta una ilustración esquemática de un sistema de aguas subterráneas indicando áreas de recarga y descarga, acuífero confinado, no confinado y en reposo, nivel de la superficie freática, superficie potenciométrica, estratos confinantes y la dirección del flujo de agua subterráneas.

Figura 2.1 - Ilustración esquemática del flujo de aguas subterráneas.



Fuente: Best, 1998

Se presenta a continuación una breve descripción de sus componentes:

- Acuífero – Unidad hidrogeológica que puede almacenar y transmitir agua subterránea a un caudal suficientemente rápido para abastecer razonable cantidades de agua a los pozos.
- Capa confinante – Unidad hidrogeológica que actúa como una barrera para el flujo o como sello para un acuífero.
- Acuífero confinado – También conocido como acuífero bajo presión o acuífero artésiano. Es un acuífero que está contorneado o sustentado por la parte superior e inferior por formaciones impermeables. Su recarga puede ocurrir por infiltración en zonas de afloramiento de este acuífero o, si los estratos confinantes no fuesen totalmente impermeables o, cuando hubiera contacto con un acuífero no confinado.
- Acuífero no confinado – También llamado de acuífero freático, delimitado en el topo por la superficie freática y en la base por un estrato impermeable. Generalmente, este tipo de acuífero es directamente recargado desde la superficie del suelo encima de este, a no ser que el estrato superior sea impermeable. Un acuífero libre es llamado de acuífero libre goteante si la formación inferior limitante es semi impermeable.
- Rendimiento específico – El rendimiento específico de un suelo (o roca) puede ser definido como la proporción de volumen de agua que, después de saturado, es drenado por gravedad en relación a su volumen total. En el caso de un acuífero freático, el agua es realmente drenado de los vacíos cuando el nivel freático tiene un abatimiento. Sin embargo, ni toda agua contenida en los poros es removida por el drenaje gravitacional. Cierta cantidad de agua es aprisionada en los intersticios entre los granos por fuerzas moleculares y tensiones superficiales. Por eso, el almacenamiento de un acuífero freático es menor que la porosidad, debido a un factor denominado de retención específica.

$$S_y = n - S_r \quad (1.1)$$

donde S_y es el rendimiento específico, n es la porosidad (todos los poros están interconectados) y S_r es la retención específica.

- Almacenamiento específico de un acuífero es la cantidad de agua almacenada o liberada por unidad de volumen de la formación debido a la

compresibilidad de la disposición mineral y de los poros con agua por variación unitaria en la componente de carga normal a aquella superficie.

- Coeficiente de almacenamiento – puede ser definido como el volumen de agua que un acuífero desprende o almacena por los mismos efectos por unidad de área superficial (*i.e.*, considerando toda la espesura del acuífero en vez de una espesura unitaria como en el caso de S_y).

Para un acuífero no confinado el almacenamiento es calculado por la siguiente expresión:

$$S = S_y + h \cdot S_s \quad (1.2)$$

donde, S es el coeficiente de almacenamiento, S_y es el rendimiento específico, h es la espesura saturada y S_s es el almacenamiento específico. Generalmente, S_y es mucho más grande que el valor de S_s .

Para el caso de acuífero confinado el término de almacenamiento es igual a

$$S = BS_s \quad (1.3)$$

donde B es la espesura del acuífero confinado.

2.1.3. Flujo en medio poroso y saturado

2.1.3.1. Ecuación gobernante

El desarrollo de la ecuación gobernante para flujo en medios porosos es determinado al considerar los flujos de entrada y salida a través de un volumen representativo del dominio (REV – *Representative Elementary Volume*), *i.e.*, la ecuación de balance de masas en combinación con la ley de Darcy resultando en la siguiente expresión

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \quad (1.4)$$

$$q = -K \cdot \nabla h$$

que al resolver obtiene la carga hidráulica h (variable primaria) para posteriormente calcular la velocidad de Darcy q , donde S_s es el coeficiente de almacenamiento específico, K es el tensor de conductividad hidráulica y Q es una función general de fuente/dren. Usualmente, q es substituido por la

ecuación de Darcy para obtener la ecuación gobernante de tipo Richards (Diersch, 2013) en la forma:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (K \cdot \nabla h) = Q_h + Q_{hw} \quad (1.5)$$

donde el término fuente/dren $Q = Q_h + Q_{hw}$ es dividido en dos partes, Q_h como fuente de recarga (e.g. precipitación) y Q_{hw} como fuente pozo (extracción o inyección). La ecuación diferencial parcial, Ec. (1.5), debe ser resuelta para la variable primaria h sometida a las condiciones de contorno de *tipo Dirichlet*, *Neumann*, *Cauchy*, y de tipo pozo.

$$\begin{aligned} h &= h_D && \text{en } \Gamma_D \times t[t_0, \infty) \\ -(K \cdot \nabla h) \cdot n &= q_h && \text{en } \Gamma_N \times t[t_0, \infty) \\ -(K \cdot \nabla h) \cdot n &= -\phi_h(h_c - h) && \text{en } \Gamma_C \times t[t_0, \infty) \\ Q_{hw} &= -\sum_w Q_w(t) \delta(x - x_w) && \text{en } x_w \in \Omega \times t[t_0, \infty) \end{aligned} \quad (1.6)$$

donde h_D es la carga hidráulica conocida impuesta en el contorno *Dirichlet* Γ_D , q_h es el flujo conocido impuesto en el contorno *Neumann* Γ_N y $-\phi_h \cdot (h_c - h)$ como condición de transferencia de flujo, la cual depende de la carga hidráulica calculada, h_c , y de referencia en el contorno *Cauchy*, Γ_C . Para análisis en régimen transitorio es necesario partir de una condición inicial, h_0 .

$$h(x, t_0) = h_0(x) \quad \text{en } \bar{\Omega}_0 \quad (1.7)$$

El contorno total del dominio sería dado por $\Gamma = \Gamma_D + \Gamma_C + \Gamma_N$. Una vez que la carga hidráulica haya sido resuelta, la variable secundaria (velocidad de Darcy), $q = -K \cdot \nabla h$, puede ser evaluada como una cantidad derivada de la carga hidráulica h , donde los principales parámetros para resolver la Ec. (1.5) son: conductividades $[K_{xx}]$, $[K_{yy}]$ y $[K_{zz}]$, precipitación, rendimiento específico, coeficiente de almacenamiento, fuentes o drenes, coeficiente de transferencia – infiltración/exfiltración, y propiedades no saturadas.

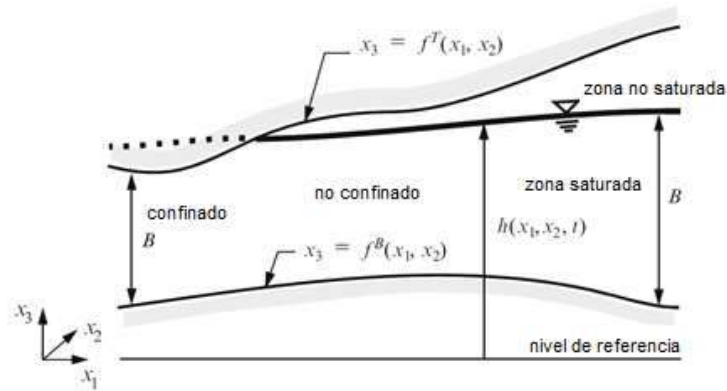
Las ecuaciones básicas para flujo en acuífero no confinado y confinado en un medio continuo saturado son establecidos como

$$(BS_s + \varepsilon_e) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (BK \cdot \nabla h) = \bar{Q}_h + \bar{Q}_{hw} \quad (1.8)$$

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (T \cdot \nabla h) = \bar{Q}_h + \bar{Q}_{hw} \quad (1.9)$$

que para el caso de acuífero no confinado, Ec. (1.8), la distancia vertical (saturada) B varía en función de la carga hidráulica calculada, es decir, $B = h - f^B$ (en la Figura 2.2), y el término de coeficiente de almacenamiento aparece como $S = \varepsilon_{\varepsilon} + BS_s$, siendo que la porosidad efectiva, $\varepsilon_{\varepsilon}$, podría ser aproximada al rendimiento específico S_y , según Bear (1972). Para el caso de acuífero confinado, Ec. (1.9), esta distancia vertical (saturada) $B = f^T - f^B$ es fija (Figura 2.2), y el término de almacenamiento es reducido para $S = S_s B$.

Figura 2.2 - Condición confinada y no confinada en acuífero - sección vertical.



Fuente: Diersch, 2013

2.1.3.2. Formulación de elementos finitos (MEF)

Los conceptos fundamentales del MEF son ampliamente conocidos y estudiados por diversos autores. En general esta formulación es basada en el método de *Galerkin* para resolver la ecuación gobernante de flujo (Eq.1.5), (Eq.1.8) y (Eq.1.9) asociados con sus respectivas condiciones de contorno e iniciales, resultando así en la forma variacional:

De la ecuación (Ec.1.5) se tiene:

$$\int_{\Omega} w S_s \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla w \cdot (K \cdot \nabla h) d\Omega - \int_{\Omega} w (Q_h + Q_{wh}) d\Omega - \int_{\Gamma} w (K \cdot \nabla h) \cdot n d\Gamma = 0, \quad \forall w \in H^1(\Omega) \quad (1.10)$$

donde w es la función de ponderación del método de *Galerkin*.

Y la función de la carga hidráulica es aproximada de la siguiente forma

$$h(x, t) \approx \sum_j N_j(x) h_j(t), \quad j = 1, \dots, N_p \quad (1.11)$$

por tanto, la formulación del método de los elementos finitos basada en el método de *Galerkin* es presentada de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \sum_e \int_{\Omega^e} N_i S_s^e \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_j N_j h_j \right) d\Omega^e + \sum_e \int_{\Gamma_S^e} N_i \varepsilon_e^e \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_j N_j h_j \right) d\Gamma_S^e \\ & + \sum_e \int_{\Omega^e} \nabla N_i \cdot \left[K^e \cdot \nabla \left(\sum_j N_j h_j \right) \right] d\Omega^e - \sum_e \int_{\Omega^e} N_i Q_h^e d\Omega^e \\ & + Q_w(t) |_i + \sum_e \int_{\Gamma_N^e} N_i q_h^e d\Gamma^e \\ & - \sum_e \int_{\Gamma_C^e} N_i \phi_h^e \left[h_C^e - \left(\sum_j N_j h_j \right) \right] d\Gamma^e - \sum_e \int_{\Gamma_S^e} N_i P^e d\Gamma^e \\ & = 0, \quad 1 \leq i, j \leq N_p \end{aligned} \quad (1.12)$$

Luego, para formar el sistema de la matriz de rigidez global es usado el proceso de montaje, por medio de la contribución de todos los elementos finitos discretizados espacialmente, resultando así, en una forma simplificada, la Ec. (1.13).

$$O \cdot \dot{h} + C \cdot h - F = 0 \quad (1.13)$$

siendo

$$h = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_{N_p} \end{pmatrix}, \quad \dot{h} = \begin{pmatrix} \frac{dh_1}{dt} \\ \frac{dh_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dh_{N_p}}{dt} \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

donde O , C y F representan las matrices y vectores de la Ec. (1.13)

$$\begin{aligned} O = O_{ij} &= \sum_e \left(\int_{\Omega^e} S_s^e N_i N_j d\Omega^e + \int_{\Gamma_S^e} \varepsilon_e^e N_i N_j d\Gamma^e \right) \\ C = C_{ij} &= \sum_e \left(\int_{\Omega^e} \nabla N_i \cdot (K^e \cdot \nabla N_j) d\Omega^e + \int_{\Gamma_C^e} \phi_h^e N_i N_j d\Gamma^e \right) \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$F = F_i = \sum_e \left(\int_{\Omega^e} N_i Q_h^e d\Omega^e + \int_{\Gamma_C^e} N_i \phi_h^e h_C^e d\Gamma^e - \int_{\Gamma_N^e} N_i q_h^e d\Gamma^e + \int_{\Gamma_S^e} N_i P^e d\Gamma^e \right) - Q_w(t) \Big|_i$$

para $(i, j = 1, \dots, N_P)$ y $(e = 1, \dots, N_E)$ siendo N_P el número de punto y N_E el número del elemento finito.

2.2. Modelo conceptual para flujo de aguas subterráneas

El modelo conceptual es una representación simplificada de las características esenciales del sistema físico hidrogeológico y de su comportamiento hidráulico, en el cual diversas asunciones son hechas porque la completa reconstrucción del sistema es compleja, además de que raramente existen datos que abarcan todo el sistema ya sea espacial o temporalmente. El modelo conceptual debe ser desarrollado usando el principio de simplicidad, *i.e.*, el modelo debe ser tan simple como posible, pero, manteniendo una consistencia lo suficiente para: (i) representar adecuadamente los elementos físicos del sistema, (ii) reproducir el comportamiento del sistema a ser estudiado; y (iii) facilitar las respuestas relacionadas a los objetivos del modelaje.

La verificación del modelo conceptual puede ser hecha al convertir éste en un modelo matemático, calibrándolo con los datos de campos observados, *e.g.*; cargas hidráulicas observadas versus cargas hidráulicas medidas en el campo.

El modelo conceptual normalmente implica un proceso iterativo y debe ser continuamente actualizado mientras que nuevos datos estén disponibles o mientras que el entendimiento del sistema sea mejorado.

2.2.1. Dominio y contornos del modelo

En la mayoría de los casos, el dominio del modelo conceptual será el mismo que el dominio usado para el modelo numérico o podría ser más grande si el proyecto fuera a usar diferentes sub-modelos para cubrir diferentes aspectos del lugar (*e.g.*, un modelo numérico separado para representar la mina a cielo abierto y otro para representar su presa de residuos).

De acuerdo con Wels *et al.* (2012), los contornos más comunes usados en el modelaje de aguas subterráneas en proyectos de gran envergadura, como en la mineración, incluyen:

- a) Líneas divisorias de agua de la cuenca (representando líneas de flujo divergente)
- b) Valles (representando líneas de flujo convergente)
- c) Cuerpos de agua de gran volumen tales como océanos, lagos, ríos (representando áreas con carga hidráulica conocida)
- d) Contornos geológicos tales como contactos de roca impermeable o fallas (representando características de gran escala en las cuales el comportamiento hidráulico es conocido o asumido)
- e) Condición de flujo nulo perpendicular a las líneas de flujo

2.2.2. Unidades hidrogeológicas y propiedades hidráulicas

Las unidades hidrogeológicas son materiales geológicos (o grupo de materiales) que tienen propiedades hidráulicas suficientemente similares, de tal forma que puedan ser consideradas como unidades hidráulicas para el propósito de estudio hidrogeológico.

El modelo conceptual considera las propiedades de las más grandes unidades hidrogeológicas, tales como: conductividad hidráulica (k), parámetros de almacenamiento (S), almacenamiento específico (S_s), rendimiento específico (S_y) o porosidad específica (ε_s).

2.2.3. Recarga y descarga de aguas subterráneas

La recarga de aguas subterráneas es definida como el flujo de agua descendiente que alcanza el nivel freático acrecentando el almacenamiento de aguas subterráneas (Healy, 2010). La recarga de aguas subterráneas ocurre de forma difusa (Directa) o por medio de mecanismos focalizados (Indirecta). La recarga difusiva es distribuida alrededor de grandes áreas en respuesta a la infiltración de la precipitación en la superficie del suelo percolando a través de la zona no saturada hasta alcanzar el nivel freático, siendo ésta la principal fuente de infiltración al sistema de aguas subterráneas (Healy, 2010). La

recarga focalizada es el movimiento a partir de cuerpos de aguas superficiales, tales como, ríos, canales, o lagos.

La descarga de aguas subterráneas puede ser definida como el flujo que abandona el área en estudio o a las que descargan en las aguas superficiales.

Por ejemplo, en este mecanismo la Evapotranspiración (*ET*) puede ser considerado un sistema de descarga, siendo éste definido como el agua removida por efectos combinados de evaporación a partir de la superficie del terreno y transpiración por las plantas a partir de sus raíces. Generalmente, la *ET* es considerada activa en las zonas de las raíces, *i.e.*, hasta una profundidad de 4 a 6 metros debajo de la superficie. En áreas de recarga de aguas subterráneas (*e.g.* áreas de grandes elevaciones) el nivel del agua subterránea está típicamente debajo de las zonas de las raíces y la *ET* es tomada en cuenta implícitamente (*i.e.*, por ajuste de la recarga). La descarga del agua subterránea en áreas de planicie (*e.g.* valles, terrenos húmedos), la superficie freática está próxima a la superficie y la influencia de la *ET* en el balance de aguas subterráneas puede ser significativa y podría ser tomado en cuenta explícitamente.

2.2.4. Interacción de aguas subterráneas y aguas superficiales

La interacción de aguas subterráneas con las superficiales es un aspecto importante, que ocurre en la mayoría de las cuencas, y, es gobernada por la diferencia entre el nivel de la superficie freática y la elevación de las aguas superficiales (Winter *et al.*, 1998). Si el nivel de la superficie freática es superior que el nivel del agua de la corriente superficial, el agua subterránea descarga en el agua superficial (Figura 2.3a). Si el nivel del agua de la corriente superficial fuera más grande que el nivel de la superficie freática, el agua superficial sirve como fuente de agua para el agua subterránea (Figura 2.3b). Otro caso identificado es cuando la superficie freática está abajo del fondo de la corriente de agua, tal caso es identificado como fuentes desconectadas (Figura 2.3c).

Figura 2.3 - Representación esquemática (a) superficie freática mayor que el nivel del río (b) superficie freática menor que el nivel en el río (c) corriente del río desconectada del acuífero.



Fuente: Reproducido de Winter *et al.*, 1998

2.2.5. Balance de masa de aguas subterráneas

El balance de masas proporciona una relación cuantitativa entre los diferentes aspectos del modelo de flujo conceptual, *i.e.*, la recarga de aguas subterráneas (infiltración) y la descarga de aguas subterráneas (exfiltración).

En la mayoría de los casos un análisis en estado de flujo permanente para la evaluación del balance de masas es adecuada para la formulación del modelo conceptual. Un balance de masas en estado transitorio (el cual toma en cuenta las variaciones de la infiltración/exfiltración en función del tiempo, así como de su almacenamiento) es requerido en el modelo conceptual sólo si el aspecto transitorio de flujo fuera el foco de estudio.

2.3. Configuración del modelaje numérico

En esencia, la configuración del modelo numérico representa los procesos de conversión del modelo conceptual cualitativo en un modelo numérico, *i.e.*, un conjunto complejo de ecuaciones matemáticas que pueden ser resueltas numéricamente mientras las siguientes definiciones sean bien delineadas.

2.3.1. Delimitación del dominio

La delimitación del dominio es dependiente de la selección de los contornos externos adecuados, siendo preferible usar características hidrogeológicas físicas conocidas para controlar el flujo de aguas subterráneas tales como líneas divisorias en las cuencas, lagunas, etc. (item 2.2.1).

2.3.2. Discretización horizontal y vertical

Una vez definido el dominio del modelo numérico, su discretización es representada ya sea por una malla ortogonal (método de las diferencias finitas) o por una malla de elementos 3D (método de los elementos finitos), donde un grado de resolución espacial mayor determinará la precisión y convergencia de la solución, mas, adicionando un esfuerzo computacional.

Como ya es sabido el uso de una malla de elementos finitos ofrece mayor flexibilidad y mayores ventajas en comparación con la malla de diferencias finitas, en relación a una discretización adecuada del modelo numérico.

Los tamaños de los elementos deben ser lo suficientemente pequeños para representar todas las características de interés, manteniendo un refinamiento suavizado en locales de importancia. Es recomendable comenzar con una malla relativamente gruesa e ir posteriormente refinando a los pocos o hasta alcanzar resultados estables y la precisión requerida. Una malla muy refinada no alterará significativamente los resultados, mas, acrecentará en gran medida el esfuerzo computacional.

Una discretización vertical puede ser requerida en un modelo de aguas subterráneas para representar explícitamente las variaciones de las propiedades hidráulicas con la profundidad o simplemente para ofrecer una mejor resolución de los gradientes verticales.

Dos enfoques son comúnmente usados para representar la discretización del modelo conceptual en la dimensión vertical: (i) estratos numéricos deformados y (ii) estratos numéricos uniformes. Los estratos deformados tienen contornos usualmente siguiendo a las superficies de las unidades hidrogeológicas, permitiendo una continuidad horizontal. Por otro lado, el enfoque de estratos uniformes tienen la ventaja de simplicidad y de solución estable, pero pudiendo requerir una mayor discretización vertical para poder describir adecuadamente la espesura de las unidades hidrogeológicas generando, de esta forma, un mayor tiempo de cálculo computacional (ver Anderson & Woessner, 1992 para mayor detalle).

2.3.3. Condiciones y restricciones de contorno

Condiciones y restricciones de contorno son expresiones matemáticas que buscan representar el estado de un sistema físico, y a su vez, restringir las ecuaciones del modelo matemático. Éstas generalmente representan las entradas y salidas de flujo de agua dentro del sistema con limitantes impuestas para tener una solución más controlada. Su representación y entendimiento para el uso adecuado dentro del modelo es muy importante debido a que una condición de contorno hidrogeológica física podría ser representada en más de una forma.

Un sistema de flujo de agua subterráneas es generalmente un conjunto de condiciones de contornos de cargas y flujos, siendo recomendable evitar el uso sólo de condiciones de flujo sin la imposición de contornos de carga, debido a que esta configuración podría generar problemas de no singularidad.

Las condiciones de contorno para modelar el flujo de aguas subterráneas son generalmente agrupadas en dos tipos conceptuales: Contornos físicos y Contornos hidráulicos:

- Contornos físicos: son formados por la presencia de cuerpos grandes de aguas superficiales, por la presencia de una unidad hidrogeológica de permeabilidad muy baja o por una barrera artificial, etc. Este tipo de contorno prácticamente no cambia en respuesta del flujo de aguas subterráneas o tensiones aplicadas en éstas.
- Contornos hidráulicos: (o contornos artificiales) incluyen divisorias de aguas subterráneas y líneas de flujo así como contornos de cargas constantes que representan cuerpos de aguas superficiales. Este tipo de contorno no presenta buenos resultados en simulaciones en estado transitorio, en simulaciones predictivas o ante la imposición de tensiones en el sistema. Su uso debe ser verificado para determinar si sus errores podrían ser aceptables en el modelo.

2.3.3.1. Contorno de flujo nulo (Línea de flujo o Flujo cero)

El contorno de flujo nulo no permite que el flujo de aguas subterráneas atraviese este contorno. En la mayoría de los programas numéricos todas las superficies externas y bordes del dominio del modelo son por definición flujo nulo a menos que otro tipo de condición de contorno sea aplicado. Esto significa que un modelo de flujo 3D no simulará ningún efecto de *Seepage* o *runoff*, mientras una condición de contorno especial esté colocada.

Existen muchas aplicaciones comunes de flujo nulo, tales como:

- Divisoria de aguas subterránea: su uso es justificado apenas cuando la tensiones actuante en el sistema tienen un efecto despreciable sobre la posición de este contorno.
- Contornos impermeables: son unidades hidrogeológicas las cuales son consideradas como impermeables para propósitos de modelaje, *i.e.*, cuando las conductividades hidráulicas de esas unidades difieren en varias órdenes de grandeza en relación a las otras.
- Perfiles de modelos: en estructuras de ingeniería, tales como presas de tierras, los contornos laterales tienen típicamente líneas de flujo hidráulicas paralelas, y perpendicularmente a estas el flujo nulo existe. En estos casos es recomendable tomar una sección que corresponda a 3 veces la profundidad de la estructura. Otros tipos de estructuras que podrían ser consideradas como flujo nulo son paredes *cut-off*, cortinas de *grout*, geomembranas y *liners*.

2.3.3.2. Condición de contorno tipo 1 o de Dirichlet

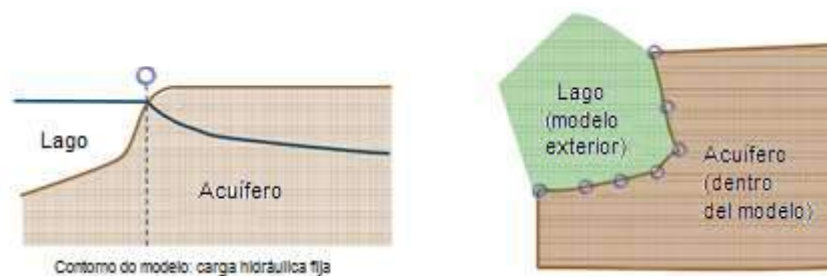
$$h(x, t) = h_D(t) \quad \text{en} \quad \Gamma_1 \times t[t_0, \infty) \quad (1.16)$$

donde, h_D son los valores de recarga hidráulica pre-establecidas en relación a $\Gamma_1 \subset \Gamma$

- Contorno de carga constante: representa una carga hidráulica que no cambia con el tiempo y no es afectada por el sistema de aguas subterráneas simuladas. Usualmente es usado para representar grandes cuerpos de agua, los cuales no son afectados por las tensiones aplicadas en el sistema (e.g. grandes lagos o ríos, mar, etc.) como ilustrado en la

- Figura 2.4. Otro uso es para representar las cargas hidráulicas observadas en el campo (e.g. la elevación de la superficie freática).
- Contorno de carga general especificada: representa una carga hidráulica la cual podría cambiar en el tiempo y espacio. Es usualmente empleado para generar gradientes hidráulicos que representen condiciones de carga que se encuentran muy alejados del modelo (e.g. la existencia del mar, o lagos en las proximidades de la región en análisis), reduciendo el dominio del modelo para un tamaño menor. En la mayoría de los casos esta condición es fija en el espacio, pero podría cambiar en función del tiempo para simulaciones en estado transitorio (e.g. avance de la excavación de una mina a cielo abierto avanzando la labra para una mina subterránea).

Figura 2.4 - Condición de contorno tipo 1- carga constante.



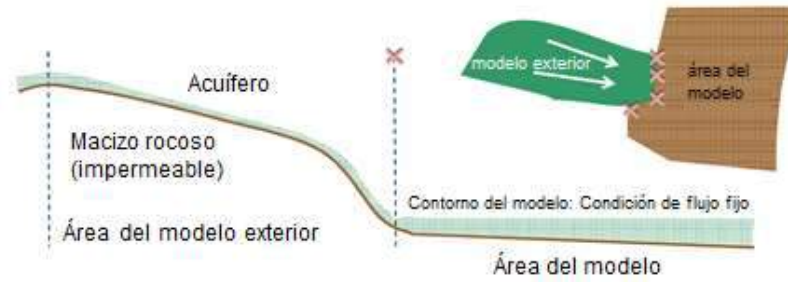
Fuente: DHI Wasy, 2014

2.3.3.3. Condición de contorno tipo 2 o de Neumann

En este tipo de condición de contorno el flujo de las aguas subterráneas es especificado a través de los contornos (nodo, línea, superficie) y puede ser una función de espacio y tiempo.

- Contorno de flujo constante: comúnmente usados para representar puntos o líneas fuentes de recarga-descarga, constantes en espacio y tiempo, como mostrado en la Figura 2.5.

Figura 2.5 - Condición de contorno tipo 2



Fuente: DHI Wasy, 2014

- Contorno de flujo especificado: es usualmente empleado para representar recargas que varían con el tiempo (e.g. la precipitación).

2.3.3.4. Condición de contorno tipo 3 o de Cauchy

$$q_{n_h}(x, t) = [k_r K f_\mu \cdot (\nabla h + \chi e)] \cdot n = -\phi_h(h_c - h) \quad \text{en } \Gamma_3 \times t[h_c, \infty) \quad (1.17)$$

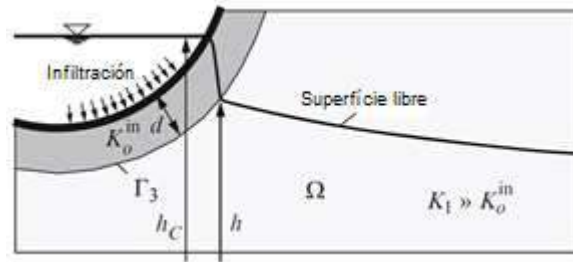
La característica principal de este tipo de condición es que el flujo impuesto como condición va ser dependiente de la carga hidráulica calculada y de la carga hidráulica de referencia. Siendo, por tanto, el flujo una función especificada que varía en la solución del problema mientras la carga hidráulica también varía.

El uso más común de este tipo de condición es para representar flujos de entrada o salida en los ríos, para los cuales, ciertos tipos de condiciones tienen que ser estudiados. La formulación de la condición de contorno tipo 3 es basada en la relación de transferencia entre el valor de la carga hidráulica de referencia h_c en el contorno Γ_3 y la carga hidráulica a ser calculada, h , en la misma posición, originando, de esa forma, dos casos:

$$\phi_h = \begin{cases} \phi_h^{in}(x, t) & \text{para } h_c > h \\ \phi_h^{out}(x, t) & \text{para } h_c \leq h \end{cases}$$

- Infiltración: cuando la carga hidráulica de referencia es mayor que la carga hidráulica calculada en la misma posición, como indicado en la Figura 2.6.

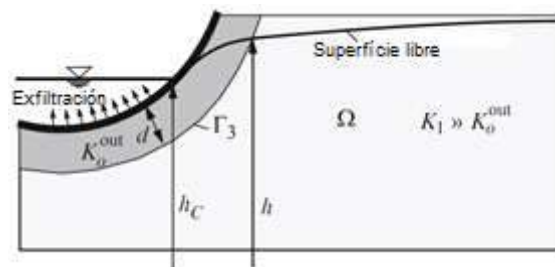
Figura 2.6 - Flujo de Infiltración al acuífero.



Fuente: Diersch, 2013

- Exfiltración: cuando la carga hidráulica de referencia es menor que la carga hidráulica calculada en la misma posición, como mostrado en la Figura 2.7.

Figura 2.7 - Flujo de Exfiltración al río.



Fuente: Diersch, 2013

2.3.3.5. Condición de contorno tipo pozo multicapas

Este tipo de condición de contorno es muy eficiente cuando se trata de inyección o extracción de agua a través de pozos en sistemas de acuíferos 3D, en los cuales pueden existir diferentes capas o formaciones heterogéneas, donde los pozos de bombeo parcialmente penetrantes tienen que ser impuestos, como esquematizado en la Figura 2.8.

Este tipo de condición en el programa FEFLOW implica un método, el cual impone una alta conductividad (elemento discreto 1D – tubular) para representar el pozo y la superficie de este (*Well Screen*). La alta conductividad del pozo garantiza una carga uniforme a lo largo de este elemento con un ligero gradiente en dirección al punto de descarga.

Figura 2.8 - Sistema de acuíferos conteniendo el pozo de bombeo multicapas.

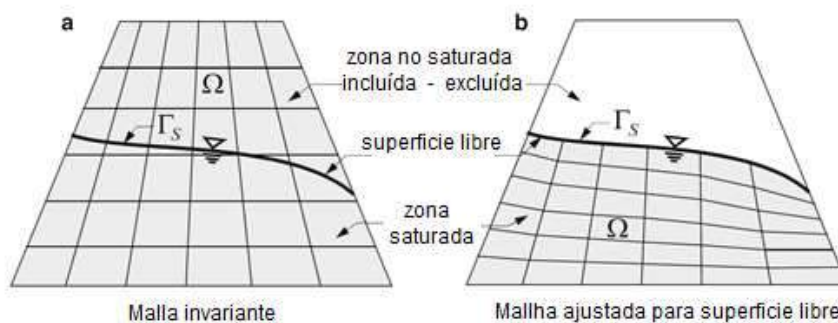


Fuente: Diersch, 2013

2.3.4. Superficie libre

La superficie libre es un contorno móvil donde la carga hidráulica es igual a la carga de elevación (presión = 0) del contorno. Para el tratamiento y solución de este contorno el FEFLOW considera dos enfoques: Malla fija y Malla móvil (Figura 2.9). Para mayores informaciones de estos dos enfoques, revisar Diersch (2013).

Figura 2.9 - (a) Superficie libre en Malla fija, (b) Superficie libre en Malla móvil.



Fuente: Diersch, 2013

2.3.4.1. Superficie libre 3D con malla fija y condiciones de pseudo-no saturación

Una malla fija tiende a imitar, en la medida de lo posible, las condiciones de flujo no saturado para controlar los procesos de solución de los elementos

de malla saturados, parcialmente saturados, o secos. En este método la superficie libre existirá apenas en los elementos parcialmente saturados, donde la superficie freática descansa en el interior del volumen del elemento.

Se debe enfatizar que un modelaje con enfoque de pseudo-no saturación es adecuado para calcular la posición de la superficie libre, pero, no es adecuado querer representar un verdadero régimen de flujo no saturado, debido a que este método no trabaja en sí con parámetros verdaderos de un análisis de flujo de suelo no saturado.

La ventaja de este método es su simplicidad y robustez, pero su eficiencia es usualmente inferior al enfoque de una malla móvil en relación a la precisión alcanzada.

2.3.4.2. Superficie libre 3D con malla móvil

Este enfoque es caracterizado por mover el extremo superior del modelo de tal forma que la elevación del primer *slice* coincida siempre con la elevación de la superficie libre.

En este enfoque, no es apenas ajustado el primer *slice*, si no también todos los *slices* interiores del modelo, de tal forma que ningún de estos se intercepte, y al mismo tiempo mantengan una densidad adecuada de la discretización.

Malla móvil es un método particularmente bueno para casos donde los movimientos de la superficie freática son esperados dentro de un estrato numérico. En sistemas de acuíferos complejos con grandes gradientes este enfoque deja de ser aceptable.

2.3.5. Convergencia del modelo

En la mayoría de los casos, modelaje de aguas subterráneas generan grandes sistemas de ecuaciones algebraicas, para los cuales, métodos de solución directa (e.g. Eliminación de Gauss) pueden ser bastante ineficiente debido a que el esfuerzo computacional es proporcional al tamaño de la matriz de rigidez. Sin embargo, existen métodos iterativos que resuelven estos sistemas de ecuaciones basados en una aproximación de la solución, donde el

esfuerzo computacional que demandan estos métodos también depende del tamaño de la matriz rigidez, pero, en menor medida.

El principio del procedimiento de la solución iterativa es crear una primera estimativa inicial de solución h^0 y luego aplicar un esquema de recurrencia (e.g. iteración de Richardson) para generar una secuencia de nuevas aproximaciones h^1, h^2, \dots , hasta convergir en una solución más aproximada h . una de las desventajas de este método es que la razón de convergencia podría ser lenta o que inclusive problemas de divergencia puedan ocurrir. Este método requiere de un criterio de parada, para el cual el proceso de iteración es finalizado, y así poder considerar la solución aproximada como una solución suficientemente precisa.

El punto crucial de los métodos de iteración es encontrar una estrategia para una razón rápida de convergencia. Existe una amplia variedad de métodos iterativos para resolver sistemas de ecuaciones, dentro de los más importantes se tiene:

- Método del gradiente conjugado (CG)
- Método del residuo mínimo ortogonal (ORTHOMIN)
- Método del residuo mínimo generalizado (GMRES)
- Método *Lanczos* de la raíz del gradiente conjugado (CGS)
- Método *Lanczos* estabilizado del gradiente biconjugado (BiCGSTAB)
- Método de la multimalla (MG), en particular el método de la multimalla algebraica (AMG).

Para mejorar el comportamiento de convergencia de estos métodos iterativos, estos son usualmente utilizados en combinación con las técnicas denominadas de pre-condicionamiento, las cuales transforman el sistema básico de la matriz de tal forma que este se convierte en un sistema más adecuado de resolverse.

2.3.5.1. Pre-condicionamiento

Una importante propiedad de la matriz de rigidez \mathbf{A} es determinada por el número de condición $k(\mathbf{A})$, definida como:

$$k(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\| \|\mathbf{A}^{-1}\| \quad (1.18)$$

el cual caracteriza la razón entre el máximo y mínimo de los autovalores $\lambda_{max}(\mathbf{A})/\lambda_{min}(\mathbf{A})$. Problemas para el cual k es grande son denominados de mal-condicionados, y cuando k no es muy grande son denominados de bien-condicionados. Típicamente un alto contraste entre los parámetros genera un número de condición muy grande. Debido a que los autovalores influyen significativamente en el comportamiento de convergencia del método iterativo, este podría mejorar si k disminuyera $k \rightarrow 1$. Esto es posible mediante una adecuada transformación de la matriz \mathbf{A} , de tal forma que el método iterativo converja mucho más rápido. Este tipo de modificación es denominado de pre-condicionamiento.

2.4. Calibración de aguas subterráneas y análisis de sensibilidad

La calibración es el proceso que consiste en encontrar el conjunto de parámetros, condiciones de contorno y tensiones del sistema, que reproducen cargas hidráulicas y flujos simulados coincidentes con los valores reales medidos en el campo, asumiendo una banda de error pre-establecido. Encontrar este conjunto de valores equivale a resolver lo que se conoce como el problema inverso (Anderson & Woessner, 2002).

En los estudios de casos presentados en esta tesis el parámetro hidráulico que será modificado en cada proceso de calibración será la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas.

2.4.1. Técnicas de calibración

La calibración del modelo numérico puede ser hecha por los métodos: tentativa-y-error, métodos automatizados, o por una combinación de los dos.

2.4.1.1. Calibración manual Tentativa y Error

Este método consiste en cambiar los parámetros de entrada en el modelo manualmente hasta mejorar la relación entre los parámetros de salida del modelo con los valores de parámetro obtenido en el campo. La principal

ventaja de este método es que ofrece al modelador una mayor percepción de los factores que controlan el sistema.

2.4.1.2. Calibración para la estimación de parámetros automatizada

Estimación de parámetros automatizada involucra el uso de uno o más códigos computacionales especialmente desenvueltos para realizar la calibración del modelo, los cuales ya resuelven el problema inverso. En la actualidad existen diversos softwares capaces de resolver este método, siendo los principales los códigos que trabajan con FEFLOW y MODFLOW.

2.4.2. Datos necesarios para calibración

Los datos (observados) de calibración deben tener idealmente una distribución espacial en todo el modelo, y en el caso de una calibración en régimen transitorio, una distribución espacial y temporal de los datos observados es necesaria.

La no singularidad durante la calibración del modelo puede acrecentarse debido a que diferentes conjuntos de parámetros de entrada en el modelo producen salidas aproximadamente idénticas (Brown, 1996). Y para compensar este efecto otro parámetro de control debería ser empleado, el cual podría corresponder a flujos de salida o presiones conocidas en el campo.

2.4.3. Verificación de la calibración

2.4.3.1. Análisis cualitativo

De acuerdo ASTM (D5490-93), este estudio debe considerar los siguientes aspectos:

- Características generales de flujo
- La evaluación de este tipo consiste en usar distribuciones espaciales de los estándares de flujo de aguas subterráneas basados en planos potenciométricos y compararlos con el campo de flujo obtenido después del proceso de simulación, verificando, de esta manera, la inexistencia de incoherencias.
- Condiciones hidrogeológicas

Identificar las diferentes condiciones hidrológicas que son representadas por el conjunto de datos disponibles. Escoger un conjunto de datos a partir de cada condición hidrológica a ser usado en la calibración, y usar el restante en su verificación.

De acuerdo con la norma ASTM (D5490-93), cuando sólo un conjunto de datos es disponible no es aconsejable separar artificialmente datos para la calibración y para la verificación. Es más importante calibrar los datos de cargas piezométricas que abarquen en la medida de lo posible todo el dominio modelado.

2.4.3.2. Análisis cuantitativo

Existen muchos métodos para estudiar cuantitativamente la calidad del ajuste entre los parámetros medidos y modelados. A seguir son considerados las evaluaciones estadísticas mínimas, recomendadas por la norma ASTM (D5490-93), 2002, que deben ser desenvueltas en un modelo hidrogeológico.

- **Carga potenciométrica residual**

Calcula los residuales (diferencias) entre las cargas medidas y las observadas

$$r_i = h_c - h_m \quad (1.19)$$

donde r_i es el residual, hidráulica medida (h_m) y la carga hidráulica calculada (h_c). Si el residual fuera positivo, entonces la carga calculada es muy alta, y si negativo, entonces la carga calculada es muy baja.

- **Error promedio (ME)**

Es la diferencia entre la carga hidráulica medida (h_m) y la carga hidráulica calculada (h_c) por el programa FEFLOW, siendo (n) el número total de datos comparados, W_i es el factor de ponderación de confianza basado en el juzgamiento del modelador.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i (h_m - h_c)_i \quad (1.20)$$

- Error promedio absoluto (MAE)

Es la diferencia entre la carga hidráulica medida (h_m) y la carga hidráulica calculada (h_c) por el programa en valor absoluto, siendo (n) el número total de datos comparados.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |W_i (h_c - h_m)_i| \quad (1.21)$$

- Error de la Raíz promedio cuadrática (RMS)

Es la raíz cuadrada del promedio de las diferencias de los valores comparados, cargas hidráulicas medidas (h_m) y las cargas hidráulicas calculadas (h_c) elevadas al cuadrado, siendo (n) el número total de datos comparados.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [W_i (h_c - h_m)_i]^2} \quad (1.22)$$

- Coeficiente de correlación (R)

El coeficiente de correlación R es una medida de la correlación del conjunto de datos, y, R^2 es el coeficiente de determinación. El cálculo de R requiere el promedio y la desviación estándar de las cargas hidráulicas calculadas y medidas. En problemas de modelaje hidrogeológica un modelo es considerado calibrado cuando el coeficiente de correlación es en lo mínimo de 0,95.

2.4.4. Análisis de sensibilidad

Después del modelo de flujo de aguas subterráneas haber sido calibrado, un análisis de sensibilidad podría ser hecho dependiendo de la disponibilidad

de los datos, para estudiar cuantitativamente la relación entre los resultados del modelo y las propiedades hidráulicas (o condiciones de contorno del acuífero).

Para cada valor de cada grupo de entrada de parámetros el modelo debe ser procesado nuevamente calculando los residuales correspondientes en respuesta de los nuevos valores usados, los cuales pueden ser verificados por medio de gráficos para cada tipo de análisis de sensibilidad.

De acuerdo con la norma ASTM (D5611-94), 2002, existen 4 tipos de análisis de sensibilidad dependiendo de qué tan sensible es el modelo ante las variaciones de los parámetros de entrada, que de acuerdo a su significado en los cambios pueden ir desde tipo I hasta tipo IV. Si el análisis de sensibilidad no fuera realizado, debe ser debidamente justificado.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS - CONTROL DE AGUAS EN PROYECTOS DE MINERACIÓN

Existen muchas evidencias a lo largo de la historia de la civilización en que el hombre mostró haber hecho intentos para efectuar el control de aguas y este proceso no es tan simple como parece (Powers *et al.*, 2007). Hoy en día es de gran importancia el entendimiento de los diferentes procesos utilizados en el gerenciamiento del control de aguas subterráneas en la mineración, donde y hasta en situaciones simples, la matemática del flujo subterráneo es compleja, y acuíferos naturales están lejos de la simplicidad.

La infiltración de agua a partir de estratos circundantes para el interior de la cava o pedrera requiere de la implementación de un sistema de control para un proceso de abatimiento con el intuito de asegurar que el lugar de trabajo permanezca seco.

En este tipo de procesos, un concepto mal interpretado de un análisis no asociado con juzgamientos hidrogeológicos hace con que el procedimiento de abatimiento sea afirmado como un proceso a ser realizado en cualquier lugar donde hay problemas relacionados con el agua. Entretanto, este proceso es más que un simple abatimiento de la superficie piezométrica, y va más allá que meramente instalar un pozo de bombeo.

3.1. Concepto de abatimiento y control de aguas

El proceso de abatimiento y monitoramiento del nivel freático es difícil, caro y frecuentemente confuso. Este encarecimiento significativo incentivó por los años 50 el desenvolvimiento de técnicas prácticas para ensayos y análisis en acuíferos, direccionados para el abastecimiento de agua e irrigación, como las propuestas por los hidrologistas Muskat, Theis, Jacob, Hantush y otros; y esos métodos fueron después adaptados a la solución de problemas de abatimiento de la superficie freática.

De acuerdo con Hall (2003), el “abatimiento del nivel freático” envuelve la remoción de una cantidad de agua de la masa rocosa o perfil de suelo, de tal forma que los niveles de agua sean abatidos para brindar seguridad y

economía a la mina. Físicamente este proceso es definido como un drenaje de los poros dentro de la masa del suelo o roca, y que resulta en el abatimiento del nivel freático.

Cuando aplicado en la industria de la mineración, los procesos de abatimiento de la superficie freática y control de las aguas, por crear el cono extensivo de depresión, causan beneficios principalmente por reducir los costos de explosión, *i.e.*, cuando el mineral está seco, menos emulsión explosiva es requerida, reduciendo hasta los costos de transporte (combustible) y el desgaste de la máquina y también la mejora en la traficabilidad y calidad del mineral (Rowe & Beale, 2007). Sin embargo, la aplicabilidad de estos procesos debe ser bien conceptualizada, donde un análisis técnico-económico deba ser ampliamente estudiado para que solamente lo necesario sea ejecutado por la industria de la mineración para un buen funcionamiento de los procesos de mineración, de tal forma que la naturaleza no se vea afectada por estos cambios. Técnicas para el control de aguas deben ser puestas en prácticas para idealizar un sistema que no sea antieconómico y que al mismo tiempo no perjudique la naturaleza.

3.2. Despresurización de taludes

Este mecanismo de despresurización es un problema común en taludes profundos en proyectos de mineración, que requieren reducir el potencial de presión excesiva dentro de los taludes de la cava. También, se presenta como levantamiento de la base de la cava bajo la presencia de secuencias de acuíferos incorporados en estratos blandos de aquicludes. Aunque la fluctuación de la presión de poros sea un factor importante que contribuye al deslizamiento, es muy importante entender las reales interacciones de la presión de poros que ocurren en una superficie de deslizamiento a lo largo de la profundidad debido a la naturaleza compleja de las condiciones hidrogeológicas (Tsao *et al.*, 2005).

En minas a cielo abierto, más del 40% de los riesgos de inestabilidad de taludes dependen de sus condiciones de flujo. Consecuentemente, el ángulo que un talud a ser escavado en seguridad debe tener es definido en función del campo de presión de poros presente en éste. Así, para prevenir su ruptura, un

sistema de drenaje debe ser instalado. Para Powers *et al.*, 2007; Atkinson, 2001 y Brown, 1981, la importancia del control de las aguas superficiales en los taludes es destacada.

3.3. Técnicas de control de aguas en minas subterráneas

Métodos de control consisten en la prevención (limitación de la infiltración de las aguas, o bombeo antes de que éstas entren en la mina), o en el bombeo del agua desde la mina.

Existen diversas técnicas de control, pero sólo algunas de estas son prácticas y económicamente aplicables para minas subterráneas. A continuación una breve descripción de las técnicas más implementadas:

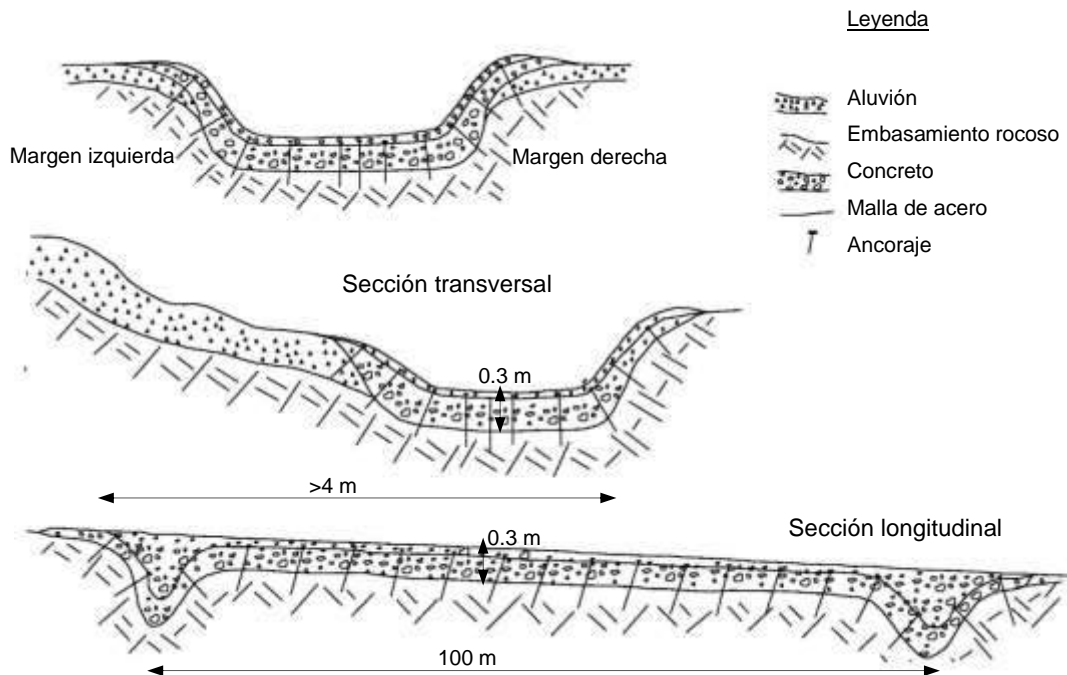
- Impermeabilización de la superficie de terreno
- Congelamiento del terreno
- *Grouting*
- Drenaje de mina

3.3.1. Impermeabilización de la superficie del terreno

Este método consiste en la impermeabilización de las fuentes de aguas superficiales (e.g., ríos) que descargan agua en el acuífero, la cual podría percolar en dirección a la mina. Este método fue usado con suceso en varias minas al redor del mundo. En la mina Neves-Corvo en Portugal, el sellamiento del curso de un río fue hecho con concreto reforzado e inyecciones de *shotcrete* en las bancas del río (Figura 3.1), lo que redujo substancialmente el flujo de infiltración a la mina (Carvalho *et al.*, 1990). Otra impermeabilización con resultados exitosos del curso de un río que fluía al redor de una área impactada por subsidencia fue reportada en Konkola Mine en la Zambia (Freeman, 1970). En esta mina fueron selladas las trincas generadas por subsidencia.

Esta técnica está siendo aplicada en esta tesis para el caso de la mina subterránea, estudiando la impermeabilización parcial o total del río circunyacente a la mina de Vazante.

Figura 3.1 - Esquematación de los trabajos de concreto en el río Oerías.



Fuente: Carvalho, 1990

3.3.2. Congelamiento del terreno

El principio de este método es tornar el agua del suelo en una pared de hielo, generadas por la circulación de un fluido criogénico dentro de un sistema de tubos verticales, los cuales son instalados alrededor del objetivo, generando, de esa forma, un muro completamente impermeable (*cut-off*). El congelamiento puede ser un método muy eficiente en determinadas condiciones hidrogeológicas, pero, el estudio económico es muy importante debido a que este método es muy costoso no siendo normalmente viable su aplicación en minas subterráneas, pero existen muchos registros exitosos de su uso en la impermeabilización de *shaft*. A diferencia de otros métodos de *cut-off*, congelamiento del terreno es una técnica poco invasiva, ya que ésta requiere menos penetración en comparación con los otros métodos, debido a que su efectividad se propaga térmicamente. Una vez instalado este sistema de *piping*, el congelamiento del terreno permanece activo por mientras que el sistema esté operando, y una vez que el sistema parar, el medio subterráneo vuelve a su estado inicial.

3.3.3. Grouting

Aunque el *grouting* tenga diversas aplicaciones, en este caso, es usado preferencialmente para eliminar o reducir el flujo de agua subterránea en trabajos de mineración subterránea propuestos o existentes. Sea cual fuera el problema de infiltración es necesario que las causas sean estudiadas completamente antes de aplicar el método de *grouting* adecuado.

Existen 2 fases principales en la vida útil de una mina subterránea, donde de alguna forma el *grouting* para el control de aguas es requerido:

- (i) Desarrollo y puesta en marcha – Durante la construcción del *shaft* o superficies de desvío y desarrollos preliminares de la mina subterránea para ganar acceso al cuerpo mineralizado.
- (ii) Producción/operación – Cuando se trata con problemas de aguas subterráneas en el avance de la producción o en la construcción de nuevos caminos subterráneos.

Típicamente esta técnica consiste en perforaciones de aproximadamente 90 mm de diámetro, realizadas hasta las profundidades establecidas en el proyecto. En terreno seco el furo realizado es lavado y, posteriormente, el cemento de *grout* es inyectado y acomodado dentro de éste por vibración a través de un tubo de alta presión (*standpipe*) de diámetro nominal 2 pulgadas.

Esta técnica además de ser muy cara, genera muchas incertezas durante su aplicación debido a que no se conoce a lo cierto a las formaciones del medio poroso a grandes profundidades y, también, porque el monitoreo para verificar la eficacia de esta técnica es limitado por no proporcionar valores realísticos de las conductividades hidráulicas de las zonas con y sin *grout*. Por lo tanto, su uso es normalmente dirigido apenas para controlar el flujo de aguas en la construcción del *shaft*, donde la barrera de *grout* funcionará sólo para un período de tiempo limitado.

3.3.4. Drenaje de mina

Este método más comúnmente usado para el control de las aguas en la mineración subterránea, y puede variar desde una simple captación de aguas infiltradas en la mina (por medio de las fracturas o a través del propio medio

poroso), hasta procedimientos más complejos que involucran la instalación de pozos de abatimiento a partir de la superficie del terreno, perforaciones de drenaje situada dentro de la mina o por medio de galerías de drenaje.

La técnica de abatimiento usando pozos verticales perforados es una práctica común en minas a cielo abierto, pero, este método también es empleado en minas subterráneas siempre que el análisis económico sea viable. Una de las ventajas de esta técnica es que es ejecutada normalmente antes de los trabajos y no causa interferencias con las operaciones mineras, aparte de que consigue extraer el agua limpia. Dentro de las desventajas se encuentran los costos de perforación y bombeo así como las limitaciones en profundidades alcanzadas en el abatimiento, debido a que estos sistemas difícilmente pueden alcanzar las profundidades de la mina subterránea. Normalmente estos métodos son usados en combinación con perforaciones de drenajes instalados en el interior de la mina.

Perforaciones profundas de pozos de bombeo a partir de la superficie del terreno son capaces de bombear grandes volúmenes de agua y han sido práctica común en los últimos años en los Estados Unidos. Existen al menos tres minas subterráneas de oro en el oeste de los Estados Unidos donde pozos profundos de bombeo son el principal sistema de abatimiento. Estas minas, localizadas en Nevada (Meikle, West Leeville, y Turquoise Ridge), usan grandes diámetros de pozos (25 – 40 cm) y bombas sumergibles capaces de bombear hasta 360 m³/h (8640 m³/d).

En el estudio de caso de esta tesis, referente a la mina subterránea de Vazante, este sistema de drenaje fue el principal método empleado para el abatimiento de la superficie freática en la mina.

3.4. Técnicas de control de aguas en minas a cielo abierto

Técnicas pueden ser agrupadas en dos categorías principales: Las técnicas activas o también llamadas de técnicas de abatimiento avanzadas, y las técnicas pasivas también conocidas como técnicas de abatimiento a tiempo real.

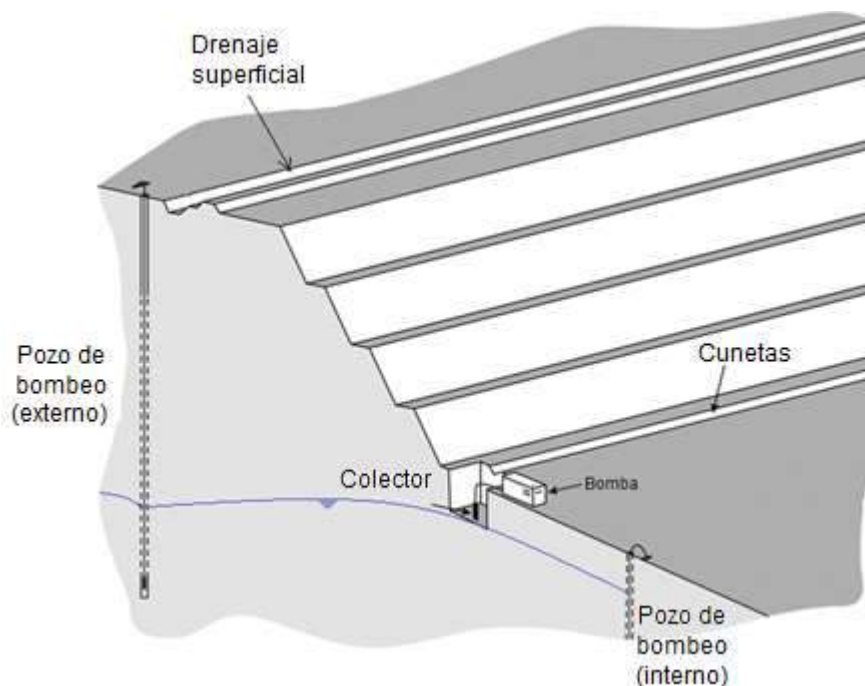
A pesar de existir una variedad de técnicas posibles que pueden ser aplicadas en proyectos de mineración a cielo abierto, solamente algunas de estas están siendo brevemente descritas a continuación.

3.4.1. Técnicas activas

3.4.1.1. Pozos de bombeo

Los pozos de bombeo pueden ir localizados dentro y fuera del perímetro de la cava de la mina. Cuando proyectados circundando las paredes de la cava (Figura 3.2), estos trabajan como barreras externas para evitar la entrada de flujo de agua al interior de la cava o para aprovechar situaciones de evidentes gradientes hidráulicos. Esta configuración es considerada de abatimiento avanzado primario. Así, es favorable localizar estos pozos en los gradientes hidráulicos superiores (a partir de la base de la cava en desenvolvimiento), pues eso funciona tanto para rebajar la superficie piezométrica así como para cortar la continua fuente de recarga para la cava. (Cividini & Gioda, 2007; Rowe & Beale, 2007).

Figura 3.2 – Representación esquemática de los pozos de bombeo (externo e interior) en la cava con su respectivo sistema de drenaje superficial.



Fuente: Preene, 2014

El agua de los pozos de bombeo es usualmente extraída directamente de la zona de descarga sin oportunidad de contaminación. Si no ocurrir contaminación, un proceso de tratamiento es necesario para el reúso adecuado (Brown, 1981).

En general los pozos son equipados con bombas sumergibles y características seleccionadas de forma adecuada. Dependiendo de los requerimientos, los pozos pueden ser perforados desde la superficie (base de la cava) o desde las bermas de los taludes, hasta profundidades entre 20 a 400m. Los diámetros perforados dependen de la profundidad y de la capacidad prevista, pudiendo variar entre 350 a 1200 mm. El rendimiento de los pozos varia (dependiendo de la transmisibilidad) entre 12 m³/h y 90 m³/h.

Un caso de aplicación de pozos de bombeo es la mina de carbón Belchatów en Polonia, considerada la segunda más grande mina a cielo abierto en el mundo. En este caso, un sistema era constituido de 400 pozos perforados equipados con bombas sumergibles con una capacidad total de 400 m³/min. Los pozos, con profundidades entre 120 y 350 m, y diámetros entre 500 a 1200 mm permitieron el abatimiento de la línea freática de 200 m en un área de 8 Km² en un período de 11 años. Esta mina envolvía 3 acuíferos no conectados que también fueron drenados para conseguir estabilidad de los taludes en la mina donde 110 millones de m³ de *overburden*¹ y 38 millones de toneladas de carbón fueron explorados por año.

3.4.1.2. Galerías subterráneas

Las galerías subterráneas son implementadas en conjunto con filtros de gravedad en los *overburden* complementados con pozos de bombeo en la base de la cava para el drenaje de acuíferos subyacentes. Los sistemas de galerías son efectivos en el caso de acuíferos discontinuos y perturbados, o en el caso de pozos de bajo rendimiento.

Este método fue muy usado en la década de los 50 o 60, sin embargo su uso fue decayendo debido a la amenaza en la mineración, seguridad laboral y altos costos. Entretanto, su uso puede ser todavía considerado en el caso

¹ Material estéril (que no contiene mineral) a ser excavado.

específico en que exista una mina subterránea activa (o también en una mina abandonada que pueda ser colocada en operación) en conjunto con un equipo técnico especialista en minas subterráneas y que sobre esta mina exista un depósito a ser drenado y operado con un método superficial. El caudal de infiltración de acuíferos por medio de las galerías subterráneas es común en torno de 2400 m³/h por cava.

3.4.1.3. Drenes horizontales

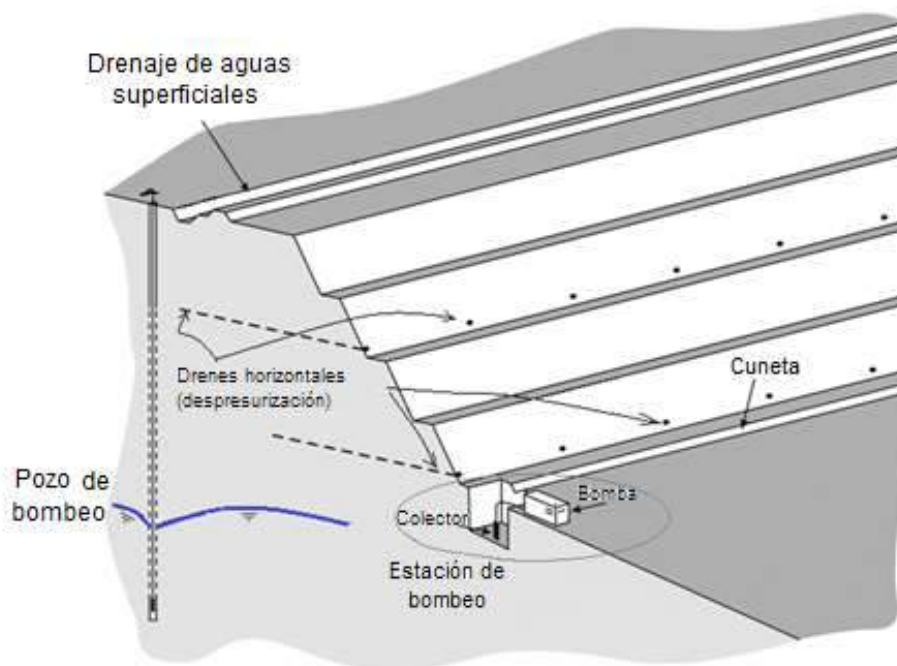
Drenes horizontales son particularmente usados para despresurizar taludes, pero su efectividad depende mucho de su conductividad hidráulica que está siendo adicionada. Los drenes son especialmente efectivos por reducir las cargas de flujo acumulados en períodos de fuertes precipitaciones que causa grandes infiltraciones de flujo en los taludes (Cornforth, 2005). En rocas una cantidad significativa de flujo ocurre como un resultado de la permeabilidad secundaria a través de juntas abiertas, fallas u otras discontinuidades. Por lo tanto, estos drenes horizontales son perforados en bermas en dirección de los taludes de la cava donde haya o ya hubo ocurrencia de flujo de aguas, sea debido a las precipitaciones o exfiltraciones de aguas.

Particularmente, esta técnica puede por sí trabajar de forma independiente y conseguir captar las aguas, principalmente las venidas de las paredes de los taludes en proceso de percolación que disminuyen la eficiencia operacional de la cava (Brown, 1981). Sin embargo, es importante que estas aguas exfiltradas, que son liberadas incontrolablemente para la base de la cava por medio de un dren colector, sean direccionadas para el pozo colector y consecuentemente bombeadas para afuera de la cava. Debe tenerse cuidado en que estas aguas no sean perdidas y que el proceso de abatimiento no sea damnificado durante las operaciones de detonación de la mina.

En general este sistema de drenes horizontales va acompañando el sistema principal de abatimiento (pozos de bombeo o paredes *cut-off*), que rebaje el nivel freático, y en taludes específicos los despresurice para una mejor estabilidad (Figura 3.3).

Los drenes horizontales pueden alcanzar longitudes de 150 m y diámetros pequeños (150 a 300 mm) perforados dentro de los taludes a una orientación de aproximadamente 5 grados a partir de la horizontal. Esa inclinación permite que los orificios tengan libre drenaje y estén predominantemente en gravedad. Complementariamente, estos pueden ser filtrados por un tubo de PVC perforado, recomendado en estratos arenosos.

Figura 3.3 – Representación esquemática del sistema pozos de bombeo y drenes horizontales, con su respectivo sistema de drenaje y de bombeo para afuera de la cava.



Fuente: Preene, 2014

El espaciamiento entre drenes es comúnmente entre 25 y 100m horizontalmente, con espaciamientos verticales dependientes de los avances de la base de la cava (Brown, 1981). La instalación de tales drenes debe ser el más adecuado para alcanzar dos objetivos primarios: disminuir los niveles de agua (superficie freática) generalmente dentro de un talud; y, alcanzar y liberar acuíferos que están alimentando el talud por atrás.

Estudios paramétricos y de campo conducidos por Rahardjo *et al.*, 2003 sugieren que para garantizar la máxima eficiencia del dren estos necesitan ir instalados en el punto más bajo posible del talud para poder conseguir el máximo abatimiento, cuyo agrupamiento puede resultar más efectivo que una

disposición más amplia de drenes instalados con espaciamiento uniforme en un talud.

3.4.1.4. Puntas filtrantes

Abatimiento con puntas filtrantes son ampliamente usados para excavaciones superficiales. Este sistema consiste de una serie de pozos de pequeño diámetro, generalmente de 3 a 4 pulgadas, conectadas a un tubo colector hasta la cámara de vacío, donde es hecha la separación del agua y aire, de forma a impedir la entrada de aire y reducir la eficiencia del sistema. La ventaja del empleo del sistema de puntas es su simplicidad, bajo costo y rapidez de instalación, siendo eficaces cuando instalados en suelos de baja permeabilidad. Su desventaja está en la limitación de la altura de abatimiento (Figura 3.4), por causa de la corta profundidad de estos pozos (aprox., 10-12 metros).

El sistema de puntas puede consistir, por ejemplo, en un número de 20 a 30 piezas espaciados de 3 a 5m, conectados a una bomba centrífuga que hace posible rebajar el nivel freático hasta 6m. Agrupamiento de ese tipo son usados donde un abatimiento adicional especial es requerido.

3.4.1.5. Cunetas

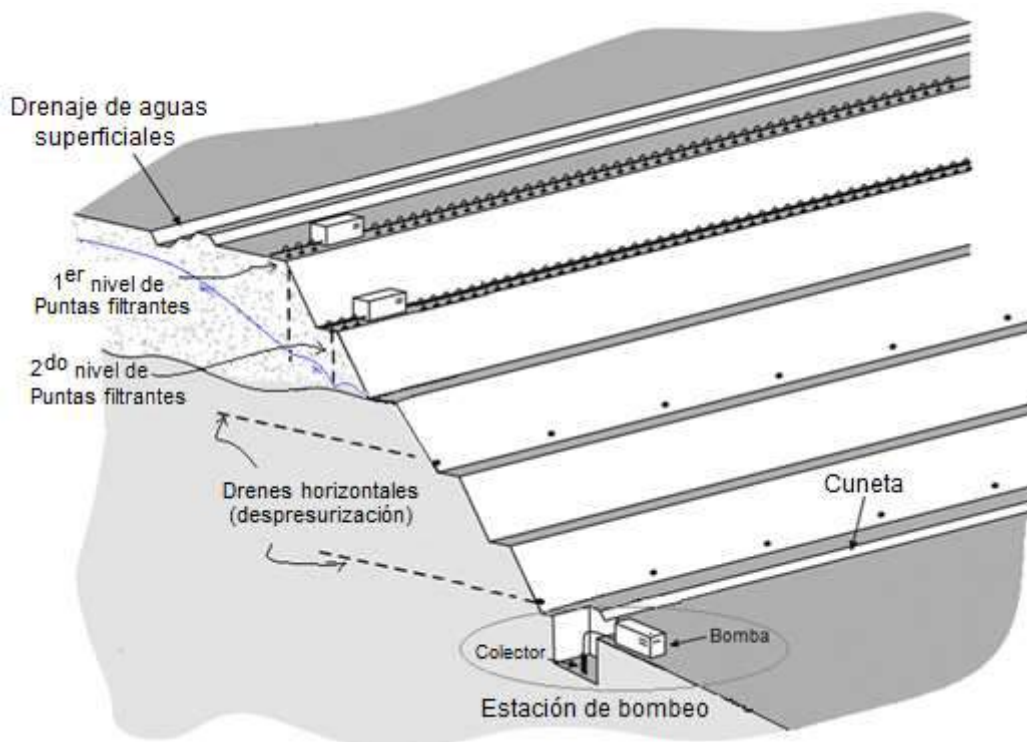
Las cunetas son proyectadas en la cava para captar el agua pluvial y residual fluyendo de los taludes (Figura 3.4). Este sistema adecuadamente proyectado puede ser ventajoso en el abatimiento del nivel freático generando estabilidad a los taludes circunyacentes a la cava, principalmente cuando el material consistir de arenas uniformemente graduadas.

Estas cunetas pueden ser estructuras permanentes cuando construidas entre taludes y bermas a largo plazo y como estructuras provisionales (menos elaboradas) sobre las bermas. Con la ayuda de las bermas, el agua es alimentada para la sección de bombeo. Este método es usado con efectos satisfactorios preferentemente en cavas de material arenoso donde el nivel freático puede ser rebajado hasta 30m.

3.4.1.6. Estaciones de bombeo

Esta técnica es equipada para remover el agua de las lluvias y el flujo de las aguas subterráneas que penetran la cava. Estas estaciones están equipadas con pozos colectores y bombas centrífugas localizadas en los puntos más bajos de la cava (Figura 3.3, Figura 3.4). Estas estaciones de bombeo tienen la capacidad de soportar lluvias de 10% de probabilidad (una vez cada 10 años) y un pozo colector capaz de soportar 4 horas de lluvia si todas las bombas no estuvieran operando.

Figura 3.4 – Representación esquemática de las técnicas activas que incluyen puntas filtrantes, drenes horizontales, sistema de drenaje y estación de bombeo.



Fuente: Preene, 2014

3.4.2. Técnicas pasivas

3.4.2.1. Paredes *cut-off*

Es una de las mejores técnicas de protección contra la infiltración de las aguas subterráneas, particularmente, de los *overburden*. Paredes *cut-off* de diferentes tipos pueden ser usadas.

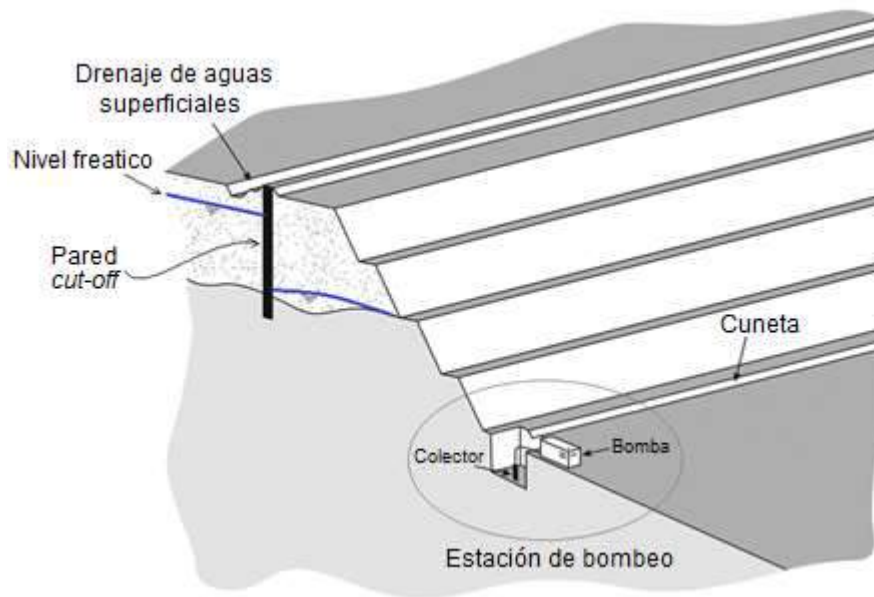
Las llamadas paredes excavadas (*dug*) son las más fáciles de construir. Estas paredes son construidas como una trinchera estrecha (0,4 a 0,7 m) por una excavadora especial. Esta trinchera va siendo inmediatamente rellena con una suspensión tixotrópica para evitar el desprendimiento de la pared. Luego, esta es rellena con una sustancia sellante para refinar la suspensión tixotrópica. Este tipo de paredes *cut-off* son las mejores y, consecuentemente, las más confiables, pero la profundidad de aplicación está limitada a la capacidad de la máquina excavadora que a lo máximo llega a 70 m de profundidad, a partir de la superficie.

Otro tipo de paredes impermeables (*cut-off*) son aquellas hechas por inyección de *grouting*, muy usada también en minas subterráneas (item 3.3.3). Una ventaja de este método es que puede ser usado hasta grandes profundidades (en promedio 300 m) mas, con la desventaja que este método es extremadamente complicado particularmente cuando se presenta condiciones hidrogeológicas variables y difíciles, acompañando de la falta de certeza para su precisa ejecución en áreas grandes.

Esta técnica de aislamiento es muy usada para acuíferos *overburden*, pero solamente cuando la pared *cut-off* es hecha enteramente desde la base hasta el tope del estrato impermeable, cerrando completamente el flujo a través del acuífero activo (Figura 3.5). Cuando la ejecución de la pared *cut-off* es hecha parcialmente, esta pierde muchas ventajas o su eficiencia, porque puede causar obstrucción de las aguas subterráneas incrementando al mismo tiempo la velocidad del flujo en las regiones selladas.

El uso de pared *cut-off* es recomendado particularmente en acuíferos de alta permeabilidad que están en contacto próximo con las aguas superficiales y siendo recargado cuando próximo a ríos o lagos. Una ventaja adicional importante del funcionamiento de esta técnica es que evita el desenvolvimiento del cono de depresión generado por los pozos de bombeo, de esta forma, se prevé que fuentes de aguas superficiales sean menos afectadas.

Figura 3.5 – Representación esquemática de la técnica pasiva Pared *cut-off* aplicada a taludes para el bloqueo del flujo de agua.



Fuente: Preene, 2014

3.4.2.2. Congelamiento del terreno

Esta técnica de congelamiento de aguas subterráneas es también aplicada para minas subterráneas, y en minas a cielo abierto siguen los mismos criterios y procedimientos. Ver ítem 3.3.2.

3.5. Criterios para la selección de la técnica de abatimiento

Para cualquier caso de métodos de exploración del mineral (a cielo abierto o subterráneo), la elección de la técnica apropiada para llevar a cabo un proceso de abatimiento de la superficie freática y del control de aguas es un paso crítico en el desenvolvimiento de un sistema económicamente viable y efectivo en la mineración.

Los criterios propuestos para la elección de la técnica o conjunto deben ser basados, principalmente, en estudios comparativos multivariantes de las condiciones hidrogeológicas, muchas veces complejas, donde un número de factores necesita ser considerado, y cuyos resultados deseados de la aplicación del proceso de abatimiento puedan ser verificados en un tiempo válido disponible.

Libicki, 1993; Halls, 2003; y Powers *et al.*, 2007 indican los principales criterios y aspectos, descritos a continuación:

- Condiciones hidrogeológicas,
- Proyecto tecnológico de operación de la mina y tipo de maquinaria usada,
- Disponibilidad de grupos (técnicas) de abatimiento y experiencias ganadas,
- Protección ambiental,
- Requerimientos de seguridad laboral,
- Costos operacionales y capitales.

a) Condiciones hidrogeológicas

Las condiciones hidrogeológicas (y geomecánicas) basadas en investigaciones geológicas previas con la mayor cantidad de registros de campo deben ser verificadas para determinar la magnitud del abatimiento requerido.

Cualquiera que fuera el método de control de aguas escogido es importante confirmar el método de drenaje / extracción de agua ideal, así como como el plan de bombeo y el sistema de reticulación de descarga para remover el agua.

Algunas recomendaciones prácticas extraídas de la aplicación de casos reales son descritas a seguir:

- 1) En casos en que depósitos y el *overburden* estén formados por rocas rígidas saturadas con agua en las fisuras, una medida de abatimiento es la combinación de pozos de bombeo en conjunto con estaciones de bombeo localizados en la parte más baja de la cava.
- 2) En acuíferos espesos y permeables, *i.e.*, permeabilidades mayores a $1,15E-05\text{m/s}$ (1m/día), y cuando hayan contactos entre acuíferos particulares, es recomendable usar pozos con bombas sumergibles, y para los taludes, drenes horizontales y cunetas en las bermas con estaciones de bombeo.

- 3) En el caso de existir flujo preferencial, como ocurre en zonas con altas permeabilidades o en zonas próximas a ríos y lagos, es preferible usar paredes *cut-off* impermeables para cortar el flujo del agua.
- 4) En el caso particular en que regiones de *overburden* saturadas contengan numerosas estructuras cerradas de contención de agua (*Water bearing structures*), o de existir perturbaciones en el comportamiento regular de los acuíferos (e.g. dobras), así como regiones de bajas y variables permeabilidades, una técnica efectiva sería usar un sistema de galerías subterráneas para que conecte filtros con pozos o cunetas de bombeo del agua. Con todo, es necesario tener características geomecánicas favorables de la roca para la construcción de las galerías y su aislamiento cuando conectada con los acuíferos, con la finalidad de proteger la mina contra la infiltración subterránea del flujo no controlado.
- 5) Sistemas de cunetas conectadas a estaciones de bombeo pueden ser usadas en roca rígida, y excepcionalmente para abatimientos del nivel freático en la región de la cava en minas superficiales. Esto porque estratos de arena son de grano uniforme y los factores de seguridad de los taludes son altos.
- 6) En el caso específico de flujo en taludes, Atkinson (2001) indicó algunas consideraciones básicas:
 - Cuando la masa de roca que compone el talud no tenga la permeabilidad adecuada para implementar el uso de pozos de bombeo puede desenvolverse una presión de poros elevada en el talud porque la roca no es capaz de drenar adecuadamente con el avance de la exploración de la mina. Una solución necesaria y muy usada es la implementación de un sistema de despresurización. Este abordaje involucra drenes horizontales y verticales instalados directamente en las secciones de los taludes que son solicitados. en grandes minas a cielo abierto, análisis costo-beneficio pueden justificar la creación de un túnel o galerías de acceso de despresurización, donde la instalación de galerías de drenaje dentro del área contribuirá al drenaje profundo dentro del talud.

➤ En casos en que sea posible la implementación de pozos de bombeo, pero que los materiales que conforman la masa rocosa (de suelo) tengan intrínsecamente baja permeabilidad, aproximadamente $\leq 1,15E-07$ m/s (0,01 m/d), el nivel de abatimiento a partir de cualquier número razonable de pozos de bombeo se desenvuelve lentamente. Por lo tanto, una cantidad significativa de tiempo de espera es requerida. De la misma manera es recomendable la instalación de drenes apenas como complementación del sistema de abatimiento debido a que un proyecto de control de aguas no sería efectivo en este tipo de material apenas con drenes horizontales o verticales, ya que estos pueden quedarse ineficaces en términos de drenaje del agua así como por bloqueo de los poros no revestidos. Este sistema es usado si las condiciones hidrogeológicas crearen amenazas de deslizamiento de los taludes.

7) El grado de anisotropía proveniente de las fracturas presentes en la mayoría de las rochas ayuda al abatimiento. En este caso es recomendable que la instalación de los drenes sea orientada a fin de atravesar ortogonalmente el mayor número de fracturas con el intuito de promover el mayor nivel de drenaje.

El análisis de la selección de medidas de control de agua lleva frecuentemente a la selección final de métodos combinados, como, por ejemplo: paredes *cut-off* impermeables y drenes horizontales; o, pozos de bombeo con galerías subterráneas; los pozos de bombeo con drenes horizontales y puntas filtrantes, etc. Una vez más, la base para la toma de decisiones es el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas resultantes de investigaciones previas.

b) Operación de la mina

Las operaciones de la mina requieren de seguridad en los taludes, consecuentemente, los efectos de los procesos de abatimiento realizados deben ser considerados en los análisis de estabilidad de los taludes. Los siguientes aspectos deben ser verificados:

1) Selección de la maquinaria básica, altura de los cortes en los taludes, largo de las bermas y tiempo disponible para la ejecución del proceso de

abatimiento (la operación del abatimiento deberá ir antes de la introducción de la maquinaria básica por un lapso de 1 a 2 años en el caso de acuíferos permeables), frente de avance de la cava, posible reconstrucción de pozos en las bermas de los taludes y la cantidad de pozos necesarios para la realización del abatimiento.

Sin embargo, si el material de la cava fuera constituido de materiales de baja resistencia en condiciones saturadas, este proceso descrito arriba no podría ser aplicado debido a que, las bermas no podrían ser construidas en las partes más altas sin generar inestabilidad, tornándose difícil la implementación de los pozos en las bermas y esto podría comprometer el inicio de los trabajos de la próxima fase programada. Este tiempo podría resultar corto para realizar todas esas operaciones y hasta comprometer la operación eficiente de los pozos. En este caso, pozos “como barreras externas” con bombas sumergibles al redor de la cava y drenes horizontales, operacionalmente, trabajan mejor.

- 2) La cava debe presentar condiciones de soportar la maquinaria específica necesaria para ejecutar el abatimiento (como carreteras, planos inclinados para transportadoras, etc.), especialmente cuando un control completo es requerido en algunas partes importantes de la cava. Así, agrupamientos adicionales, como por ejemplo, puntas filtrantes pueden ser usados.

Esos criterios operacionales deben sin llevarlos en consideración tanto para la selección del método de control de las aguas como en la determinación del número y área de distribución de agrupamientos particulares. Como fue dicho anteriormente, el sistema de operación de las minas debe ser planeado con antecendencia, *i.e.*, el tipo de maquinaria, su distribución en el área de la cava para de esta forma optimizar el avance dos trabajos de exploración.

c) Disponibilidad de agrupamiento y experiencia

Este criterio es esencial. La disponibilidad de equipamientos en el mercado local de trabajo y la experiencia en la aplicación de la técnica deben ser discutidos. Por ejemplo, para el caso en que paredes *cut-off* de *grouting* nunca hayan sido ejecutadas, donde dispositivos y sustancias necesiten ser importadas, pero por otro lado exista una base técnica y experiencia en la

perforación de pozos, la aplicación de pozos prevalecería sobre la técnica de *grouting*, aunque que esta última fuera más efectiva. De la misma forma, si aparecer una mina subterránea abandonada con un equipo técnico de mineros apenas especialistas en minas a cielo abierto, este cuerpo técnico podría perjudicar en la elección del sistema de galerías subterráneas.

d) Requerimientos de protección ambiental

Este es un criterio básico a ser tomado en consideración, y debe ser analizado a detalle. Dos aspectos juegan aquí un papel principal. El primero de ellos es la influencia de la depresión del nivel freático en la vecindad, y el segundo punto es la polución de las aguas de la mina.

Desde un primer punto de vista, el abatimiento del nivel freático que, irrespectivamente del método de control de aguas usado, afecta el ambiente de la misma manera. Solamente el uso de barreras impermeables puede evitar ese efecto o reducirlo considerablemente. Desde otro punto de vista, el agua más limpia es aquella obtenida a partir de pozos de bombeo con bombas sumergibles, y las más contaminadas son aquellas que fluyen sobre la superficie, así, estas aguas de las minas tienen que ser purificadas antes de su aprovechamiento.

e) Seguridad laboral

Los sistemas de galerías subterráneas son considerados los más desventajosos y producen dificultad de ejecución y frecuentemente condiciones de trabajo peligrosas. Mientras que todos los otros sistemas no son forzados a llevar gente a la región subterránea, por consiguiente son menos peligrosas.

f) Costos operacionales y capitales

Además de los criterios técnicos y ambientales, costos operacionales y de capitales de las alternativas sugeridas deben ser comparados. Este último criterio es decisivo, principalmente, cuando los otros criterios considerados no dan una respuesta compatible. Desde el punto de vista de costos de capitales, las paredes impermeables *cut-off* y las galerías subterráneas son las técnicas de control de agua más caras. Desde el punto de vista de operación, los pozos de bombeo con bombas sumergibles son las más caras, alcanzando altas tasas de consumo de energía para el bombeo del agua. Finalmente, el costo

total del proyecto e implicaciones ambientales indispensables necesitan ser planeadas para la concepción de estrategias de control y operaciones mineras.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1. Mina Subterránea de Vazante

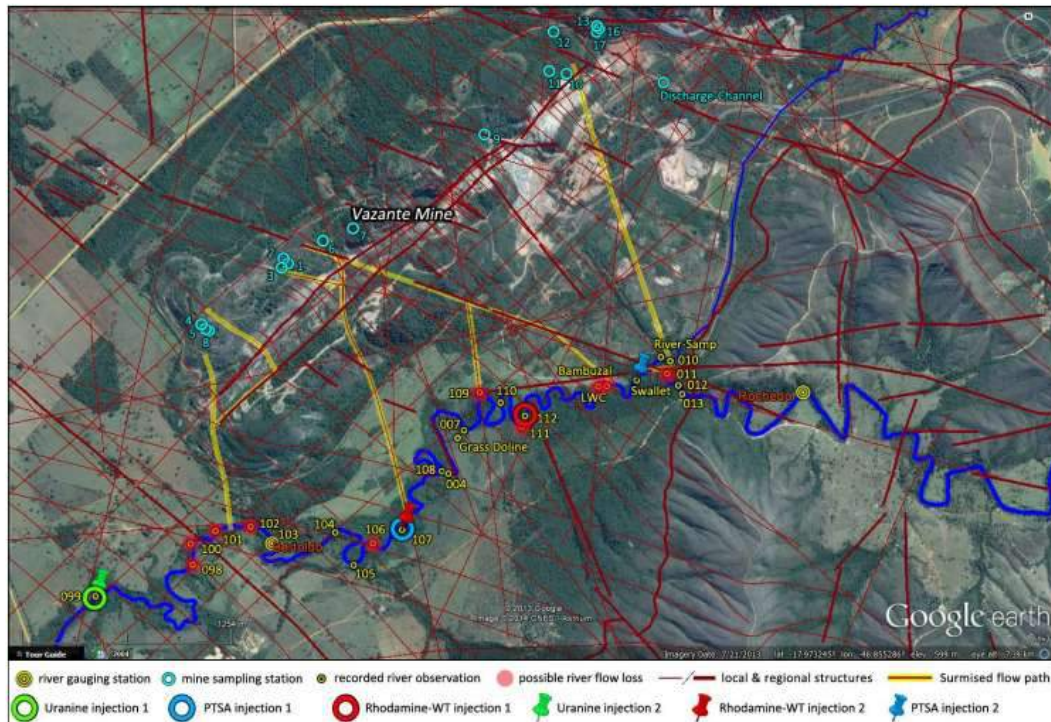
La unidad presente en el municipio de Vazante-MG está localizada en la porción noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. La exploración de mineral de zinc ocurre desde 1969, donde se procesaba apenas a cielo abierto con predominio de calamina. En el inicio de los años 1980 fueron ejecutados estudios que viabilizaron el avance da mineración en la porción subterránea, iniciando la operación da labra en diciembre de 1982, donde se registra la presencia solamente de willemita como mineral oxidado. Son empleados, básicamente, dos métodos principales de labra en las operaciones realizadas en la Mina de Vazante: *Vertical Retreat Mining* (VRM), Corte y Aterro (C&A), ambos utilizados debido a la necesidad de recuperación de los pilares de minerales dejados para sustentación del macizo rocoso. Los productos de exploración, beneficio y comercialización son el zinc oxidado y cadmio (asociado a los minerales de calamina y willemita que pasan por el proceso de trituración, molienda y flotación). El plan de producción prevé una reducción de la producción de la Mina de Vazante hasta su agotamiento en 2025.

La mina de Vazante está inserida en el contexto de terrenos cársticos, que, asociados a los procesos tectónicos que actuaron en el área, comandan la dinámica de circulación hídrica y sus relaciones con la morfología de relieve y la ocurrencia de estructuras típicas de este ambiente, tal como surgimiento de agua, sumideros y cavernas. Aliándose a estos factores naturales, ha de considerarse todavía que el área de interés está sufriendo intervención de abatimiento del nivel de agua subterránea, procedimiento necesario al avance de la labra de mineral en profundidad.

Como resultado de la combinación de esos factores naturales y antrópicos, pueden ser distinguidas algunas características percibidas en el ambiente estudiado, las cuales son de preocupación para las operaciones mineras, tales como: altos caudales (registradas con o avance da labra) en los conductos cársticos asociados a estructuras geológicas preferenciales en las

galerías de mina y la potencialización o inducción al surgimiento de dolinas e/o *sinkholes* (sumideros) además de aquellas naturalmente registradas. Estos caudales medidos no corresponden a valores esperados de acuerdo con el actual modelo hidrogeológico, por no considerar estructuras cársticas que generan flujo preferencial de aguas subterráneas.

Figura 4.1- Caminos de flujos presumidos entre el río y la mina con base en las formaciones locales y regionales mapeadas



Fuente: Guiguer *et al.*, 2013

La empresa DHI do Brasil fue contratada por la Votorantim Metais (VM) para realizar ensayos isotópicos en el agua subterránea entre el río Santa Catarina y la mina subterránea de Vazante. De acuerdo con Guiguer *et al.*, 2013, la ejecución de ese trabajo tuvo como propósito el reconocimiento de las rutas de flujo subterráneo entre puntos entre las márgenes del río Santa Catarina y el interior de la mina subterránea (Figura 4.1). Los resultados de ese estudio indicaron la presencia de tres caminos discretos de flujo de agua basados en la distribución de trazadores detectados. Sin embargo, las características cársticas del acuífero indican que el flujo del río para la mina ocurre a través de fracturas discretas pero que no tienen una conexión perfecta entre el río y la mina. En vez de eso, el flujo del río para la mina debe

primeramente atravesar un volumen de almacenamiento substancial del acuífero, más probable dentro del epicarste que está situado entre la roca dolomítica y el río. La magnitud y el tiempo del flujo a través del epicárstico y la mina son substancialmente afectados por gradientes hidráulicos creados por fluctuaciones en los niveles del río y por la presencia del filito que separa el río de la mina.

Modelajes numéricas del sistema de aguas subterráneas fueron empleados para simular de forma explícita las características del flujo en los conductos identificados por los ensayos isotópicos, y al mismo tiempo para ser utilizada como una plataforma en la evaluación de los beneficios de varias estrategias hipotéticas para reducir el flujo dentro de la mina a partir del río.

Para esto es necesario una evaluación y modificación del modelo hidrogeológico actual, rediseñándolo de acuerdo con las condiciones geológicas e hidráulicas (basados en datos instrumentales) más recientes, que acomode las componentes necesarias para una representación más apropiada, *i.e.*, recalibrándolo al año 2014. Esta recalibración deberá llevar en cuenta la disminución² de la permeabilidad del medio poroso para poder alcanzar el equilibrio en términos de flujo y cargas hidráulicas que será alterado por la inserción de estructuras más permeables (medio poroso fracturado más estructuras cársticas), pero también considera el uso adecuado de las condiciones de contorno en la representación del río, generando así, una representación más realista del nivel de la superficie freática, que anteriormente no estaba siendo realizada. Este modelo recalibrado servirá como una plataforma excelente para la evaluación del efecto de estrategias atenuantes, tales como el reposicionamiento o el revestimiento del río en los locales (Item 3.3.1 – Impermeabilización de la superficie del terreno) en que fueron registradas pérdidas o en que su existencia es presumida; o el cierre de conductos formados por disolución. Una esquematización de este proceso de impermeabilización del río es mostrada en la Figura 3.1.

Por tanto, este estudio numérico con el FEFLOW 6.2 tiene como objetivo principal brindar una mejor representación del sistema hidrogeológico, que

² La permeabilidad atribuida en el modelo antiguo era alta porque era el promedio del medio poroso más las estructuras.

permita proyectar respuestas más puntuales para los trabajos futuros. Por otro lado, también busca implementar diferentes escenarios de flujo, donde comparaciones considerando o no estructuras cársticas en conjunto con la impermeabilización del río como sistema de control de las aguas permitan verificar la influencia de estas estructuras en el sistema hidrogeológico.

4.2. Aspectos intervinientes en el escenario hidrogeológico local

Basados en datos recolectados en la red de monitoreo mantenida en el área de influencia del emprendimiento, continuos estudios por parte de la minera culminaran en una amplia ganancia del conocimiento sobre temas intervinientes (geología, geomorfología e hidrogeología), visando subsidiar el entendimiento sobre aspectos ambientales y operacionales relacionados al drenaje de la mina y su interferencia en la dinámica acuífera local y otros factores geoambientales. Estos aspectos intervinientes, como la geología y geomorfología son aquí abordados por generar un conocimiento integrado que contribuirá para la descripción del modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia del estudio, que será abordado más adelante.

4.2.1. Condicionantes geológicos

Las bases geológicas disponibles engloban informaciones de carácter regional presentadas por CPRM (2002) en cooperación con el Departamento de Geología de la Universidad Federal de Paraná (Rostirolla et al., 2000), además de los estudios presentados por IPT (2004) y aquellos resumidos e interpretados por el equipo de exploración mineral de la Votorantim Metais, presentadas en la forma de un mapa geológico integrado del área, mostrada en la Figura 1 del Anexo. De esa manera, los condicionantes geológicos (Pessoa et al., 2012) presentados aquí, de forma muy abreviada, destacan apenas lo más relevante de manera a componer una base única y consolidar la importancia de los elementos litoestratigráficos y geoestructurales en la concepción del modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas y sus interacciones con otras estructuras naturales del ambiente cárstico, tales como cavernas, dolinas, afloramiento de agua y sumideros (sinkholes).

4.2.1.1. Elementos litoestratigráficos

El área en estudio está situado en la región noroeste del Estado de Minas Gerais, próxima a la ciudad de Vazante, y engloba una secuencia de rocas carbonáticas y pelíticas de edad proterozóica superior posicionadas en la porción sureste del Cinturón Brasília, en contacto con el borde oeste de la Cuenca Bambuí, Cráton São Francisco. En esta área fueron reconocidas cinco unidades litoestratigráficas principales definidas, de abajo hacia arriba, como: Formación Serra do Garrote, Formación Serra do Pozo Verde, Formación Morro do Calcário, Formación Serra da Lapa (estas 4 unidades están inseridas en el contexto del grupo Vazante) y Formación Paracatu (inserida en el grupo Canastra). La distribución de estas unidades está desplegada en el mapa geológico (Anexo). De modo general el grupo Vazante abarca una predominancia de filitos carbonosos y cuarzosos aflorando al este del área de la mina (Formación Serra do Garrote) donde dolomitos estromatolítico constituyen el sector noroeste del área de emprendimiento (Formación Morro do Calcário). Al oeste de las minas Vazante y Extremo Norte la predominancia es de filitos intercalados con cuarzitos finos y filitos cuarzosos y metasedimentos arcillo-arenosos. Esta región (Formación Serra da Lapa) muestra un relieve accidentado, con trechos de drenajes perenes y padrones preferencialmente dendríticos. En este grupo Vazante se encuentran todavía los depósitos de zinc y plomo (Formación Serra do Pozo Verde) asociados a la Zona de Falla Vazante, comúnmente bajo intercalaciones de filitos carbonosos.

En términos hidrogeológicos, la región de la formación Serra do Garrote es caracterizada por presentar valores muy bajos de conductividad hidráulica y recarga. En función de eso, esta unidad se clasifica como zona no acuífera. La Formación Serra da Lapa y Paracatu, en función de su carácter litológico variable (intercalación de filitos, cuarzitos y dolomitos), pueden indicar algún potencial hidrogeológico. Por su vez, las formaciones Serra do Pozo Verde y Morro do Calcáreo caracterizan la bacía dolomítica del área de interés de ese estudio, constituida esencialmente por litotipos cársticos fisurados intercalados con filitos, atribuyendo un carácter, predominantemente, de zonas acuíferas asociadas.

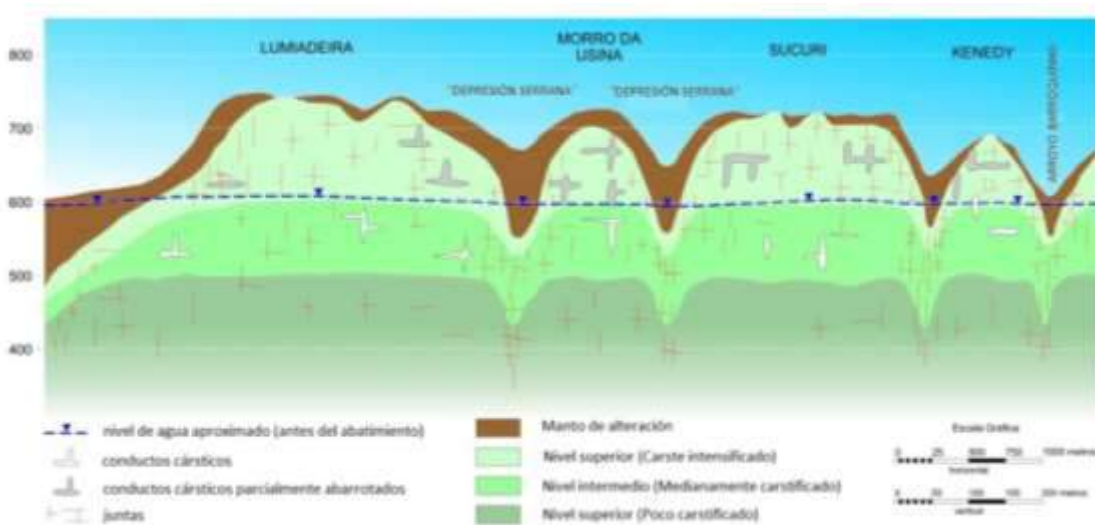
4.2.2. Génesis de las estructuras cársticas

Las principales estructuras cársticas reconocidas en el área de interés son las dolinas y sumideros (*sinkholes*) que indican zonas preferenciales de infiltración de aguas superficiales, también conductos y surgimiento de agua que indican los locales donde los sistemas cársticos son drenados, y, las cavernas que constituyen estructuras desenvueltas por la circulación de aguas en direcciones preferenciales.

De acuerdo con los análisis estructurales efectuados por IPT (2004), aliadas a las observaciones de las estructuras de disolución en diferentes niveles de la mina subterránea, permitieron individualizar tres horizontes distintos de desenvolvimiento de las estructuras cársticas locales: nivel superior o vadoso, nivel intermedio y nivel inferior, conforme ilustrado en la Figura 4.2.

El nivel superior corresponde a la porción del macizo rocoso que está encima del nivel del agua. Caracterizado como el nivel de mayor evolución del carste, distribuidas de grandes fendas de disolución, abatimientos, sumideros y etc. En este nivel la circulación del agua se da básicamente por movimientos verticales descendientes. En este contexto, cuando son verificados eventos de intensa precipitación, asociados a inundaciones de determinados drenajes, como el río Santa Catarina, por ejemplo, se percibe una intensificación natural en el surgimiento de abatimientos y sumideros provocados por la rápida infiltración de aguas superficiales y lixiviación de sedimentos inconsolidados. Este efecto puede ser más intensificado en áreas bajo la influencia del abatimiento, pues el mismo genera condiciones para el aumento del gradiente hidráulico y de velocidad de drenaje de las aguas superficiales, aumentando más todavía el potencial de surgimiento de estas estructuras cársticas.

Figura 4.2 - Niveles de desenvolvimiento de estructuras cársticas en su condición original



Fuente: Pessoa *et al.*, 2012

El nivel intermedio abarca la porción del macizo rocoso situado abajo del nivel del agua subterránea, hasta aproximadamente la cota 500 metros, donde el proceso cárstico se encuentra, actualmente, en desarrollo. Ya en el nivel inferior el macizo rocoso situado abajo de la cota 500 msnm, donde la carstificación es incipiente, el medio se comporta como fisurado, sin ocurrencia de grandes conductos cársticos como aquellos encontrados en los niveles superior e intermedio.

4.2.3. Condicionantes geomorfológicas

Conforme señalado por Bittencourt *et al.*, 2008, Rostirolla *et al.*, 2000 e IPT (2004), la cuenca dolomítica de interés a los estudios hidrogeológicos se encuentra capeada por colúvios, que dificultan la identificación y los análisis de los procesos de carstificación. Esta cobertura, cuya espesura varía desde los pocos metros hasta más de una centena de metros, es reflejo de la evolución geomorfológica del área. Estos materiales son constituidos esencialmente por filitos, de granulometría variada. Las aguas pluviales incidentes sobre los filitos filtran casi que totalmente para el interior de la cuenca dolomítica, debido a la pequeña capacidad de retención de las aguas en estas áreas.

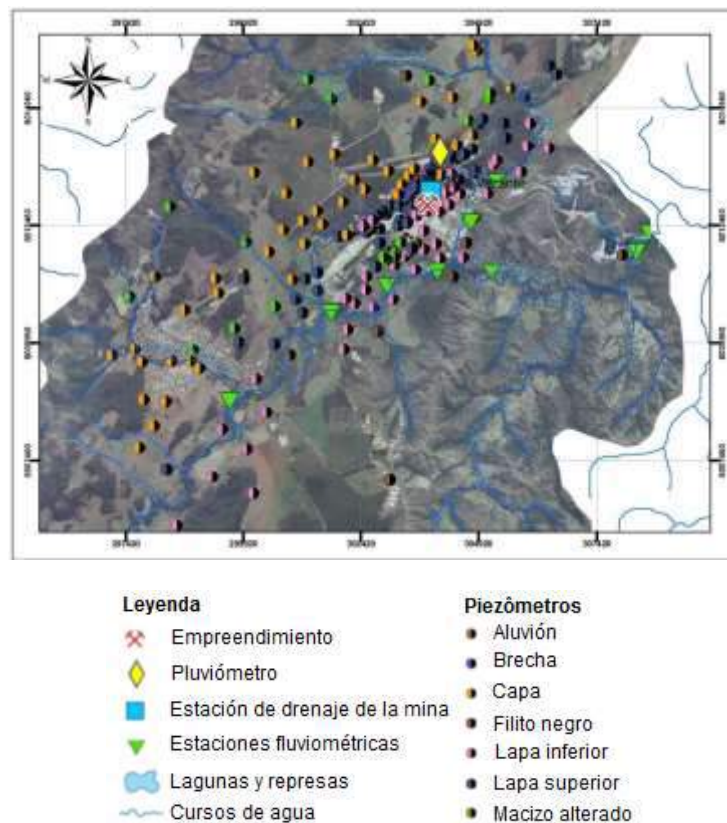
4.3. Compilación e interpretación de los datos disponibles

Datos e informaciones pertinentes al contexto de monitoreo hídrico del área de influencia del emprendimiento están siendo compilados y presentados, con el objetivo de auxiliar a la concepción del modelo hidrogeológico conceptual y refinar las discusiones necesarias. El monitoreo comprendió datos piezométricos y medidores de nivel de agua, caudales bombeados en el interior de la mina, precipitaciones pluviométricas y caudales de cursos de agua en el entorno do emprendimiento. Todos esos datos fueron colectados y puestos a disposición por la minera Votorantim Metais.

4.3.1. Piezómetros y pozos medidores de nivel de agua

El monitoreo del abatimiento del nivel de agua subterránea con el avance de la labra da mina de Vazante está siendo efectuado a través de varios piezómetros y pozos medidores de nivel de agua instalados en el área de influencia del emprendimiento.

Figura 4.3 - Mapa de distribución de puntos de monitoreo en el área de influencia definida para los estudios hidrogeológicos



Fuente: Datos disponibles por la Votorantim Metais -Pessoa *et al.*, 2012

Este sistema de monitoreo abarca datos de 130 piezómetros y 5 pozos en operación, instalados en unidades hidrogeológicas de interés, conforme presentado en la Tabla 4.1 e ilustrado en la Figura 4.3 para el año de 2013. Vale la pena resaltar que la oscilación de nivel del agua en los piezómetros, en general, responde a la estacionalidad climática de la región.

Tabla 4.1 - Piezómetros instalados en las diferentes unidades hidrogeológicas del área de influencia de la Mina Vazante a diciembre de 2013.

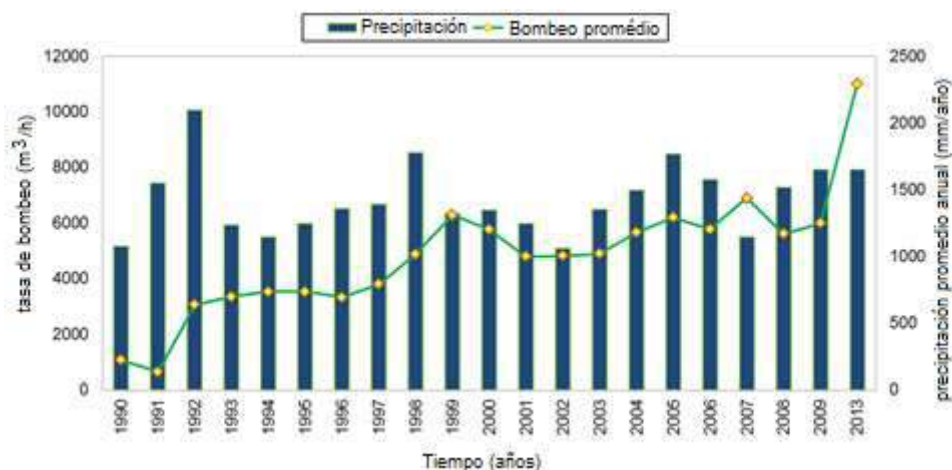
Unidad monitoreada	Número de puntos de monitoreo
Aluvión	8
Macizo alterado	18
Capa	34
Lapa superior	35
Lapa inferior	37
Filito	3
Total:	135

Fuente: Propia

4.3.2. Caudales bombeados en la mina

El procedimiento de desagüamiento de la mina envuelve un sistema de drenaje subterránea gravitacional, utilizando la propia mina como estructura de drenaje principal asociada a un conjunto de bombas instaladas en su interior. El monitoreo del caudal bombeado de la mina ocurre en un único punto. En la Figura 4.4 se encuentran valores de tasa de bombeo en m^3/h desde el inicio de las operaciones en 1990 hasta 2013. De acuerdo con a DHI (Guiguer *et al.*, 2013), esta tasa de bombeo para el año de 2013 fue de la orden de 11000 m^3/h .

Figura 4.4 - Diagrama de la historia de los promedios anuales de precipitación x bombeo



Fuente: Adaptado de Prado, 2010

Conforme indicado en la Figura 4.4, la tasa media de bombeo practicado en la mina sufre grande variación a lo largo del tiempo y del año hidrológico, en parte, debido a la necesidad de avance de la mina, en parte, debido a la estacionalidad climática.

4.3.3. Pluviometría

De acuerdo con los datos de Hidrovia (Pessoa *et al.*, 2012), la precipitación durante el año hidrológico en la región en estudio es bastante variable, que desde 1990 hasta el 2013 presentaron períodos húmedos (noviembre a marzo) con la precipitación media máxima registrada en diciembre (312,2 mm) y en el período seco (abril a octubre) la precipitación media mínima ocurre en el mes de junio (4,0 mm).

Los datos de precipitación pluviométrica del área de influencia adoptada son provenientes del registro del pluviómetro instalado en los dominios de la referida Mina de Vazante, conforme localización presentada en la Figura 4.3.

4.3.4. Monitoreo del río Santa Catarina

El monitoreo de los caudales se inició en 1989, a partir de puntos seleccionados (Tabla 4.2) en el arroyo del río Santa Catarina y en las riveras Carrancas y Carrapato, los otros puntos pasaron a ser monitoreados a partir de 1992 hasta la actualidad.

De acuerdo con el histórico de caudales, presentados en el trabajo de Pessoa *et al.*, 2012, los picos se correlacionaron fuertemente con los picos de precipitación pluviométrica, o sea, existe una influencia directa de aumento del caudal de los cursos del agua debido al aumento de precipitación.

Tabla 4.2 - Localización de los puntos de monitoreo de caudal (m³/h) en los cursos del agua del área de interés de estudio

Nº de orden	Ident. del punto
1	Bambuzal
2	Barragem
3	Bertoldo
4	Arroyo Barrocão
5	Arroyo da Mata

6	Arroyo Guariroba
7	Módulo III
8	Montante Aroeira
9	Pozo Verde
10	Prainha
11	Rio Santa Catarina/Rochedo
12	Ribeirão Carranca
13	Río Carrapato
14	Nova Captação

Fuente: Datos proporcionados por Votorantim Metais - Pessoa *et al.*, 2012

El monitoreo del río Santa Catarina es importante de analizar, sobretudo, en la relación actual entre el acuífero (aluvión) y el río, en particular en su trecho más próximo a la mina. En el contexto, 5 estaciones fluviométricas (EF) localizados en este trecho fueron analizados: Prainha, Bertoldo, Pozo Verde, Bambuzal y Rochedo (Tabla 4.3). Así, la contribución por parte del acuífero (aluvión) al río ya venía siendo observada desde 2010 en tres de los cuatro trechos considerados, observándose pérdidas considerables de agua (pérdida media en torno de 1800 m³/h) en un trecho bastante pequeño del río (420 m), correspondiente a la región entre las estaciones Pozo Verde y Bambuzal.

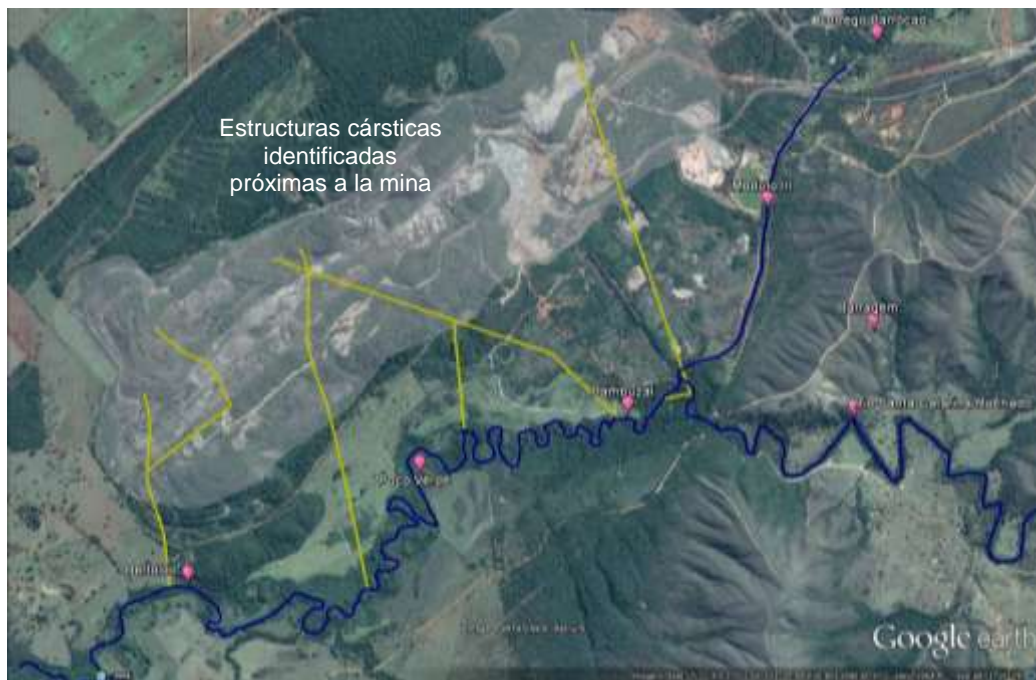
Tabla 4.3 - Relación entre el acuífero y el río Santa Catarina (ganancia/pérdida del agua del río)

Trecho del Río	Distancia Aprox. (m)	Dolinas Mapeadas	Caudal (m ³ /h)	Ganancia / Pérdida
EF-Prainha a EF-Bertoldo	4400	0	1871	Ganancia
EF-Bertoldo a EF-Poco verde	4300	3	510	Ganancia
EF-Pozo Verde a EF-Bambuzal	420	14	1732	Pérdida
EF-Bambuzal a EF-Rochedo	800	4	1643	Ganancia

Promedio de las diferencias de caudales medidos entre dos estaciones fluviométricas, considerando en el cálculo de las diferencias apenas mediciones realizadas en el mismo día.

Fuente: Prado, 2010

Figura 4.5 - Puntos de monitoreo fluviométrico analizados próximos a la mina.



Fuente: Propia

El problema de la pérdida de agua del río Santa Catarina fue estudiado por la DHI de Brasil en el 2013, donde fueron realizados ensayos isotópicos de agua subterránea entre el río Santa Catarina y la mina subterránea con el propósito de identificar las fuentes de infiltración de agua del río en la mina.

A partir de los procedimientos de rastreo que comprenden la inyección en fases de tres trazadores en el río Santa Catarina, donde cálculos de recuperación de masa fueron realizados para poder comparar la cantidad de trazador recuperada en el río con la cantidad recuperada de la mina y, de esa forma, estimar la cantidad de la pérdida del flujo del río que entra en la mina (en esta metodología fue considerado que no hay pérdidas debido a la adsorción o decaimiento en los caminos por donde fluyen los trazadores). Los resultados de la DHI (Guiguer *et al.*, 2013) reveló que las pérdidas de flujo del río entre las estaciones de Bertoldo y Rochedo ($3400 \text{ m}^3/\text{h}$) podrían representar al máximo 37% de la descarga total da mina (agua perdida para el acuífero), asumiendo que 100% del flujo del río perdido va para la mina. Este resultado de pérdida de flujo del río fue monitoreado en 4 diferentes períodos, siendo el

de 15/03/2013 – 21/11/2013, el período más largo del registro y el que presenta mayor pérdida de flujo.

4.4. Modelo hidrogeológico conceptual

Las componentes del modelo conceptual tal como el dominio, contornos, unidades hidroestratigráficas y propiedades hidráulicas, sistemas de recarga y descarga, interacción de las aguas superficiales y subterráneas así como el balance de masa fueron definidas inicialmente por la empresa Schlumberger, 2008 basados en los condicionantes geológicos y geomorfológicos y en los datos de monitoreo registrados desde 1989 por la minera Votorantim Metais.

4.4.1. Dominio del modelo

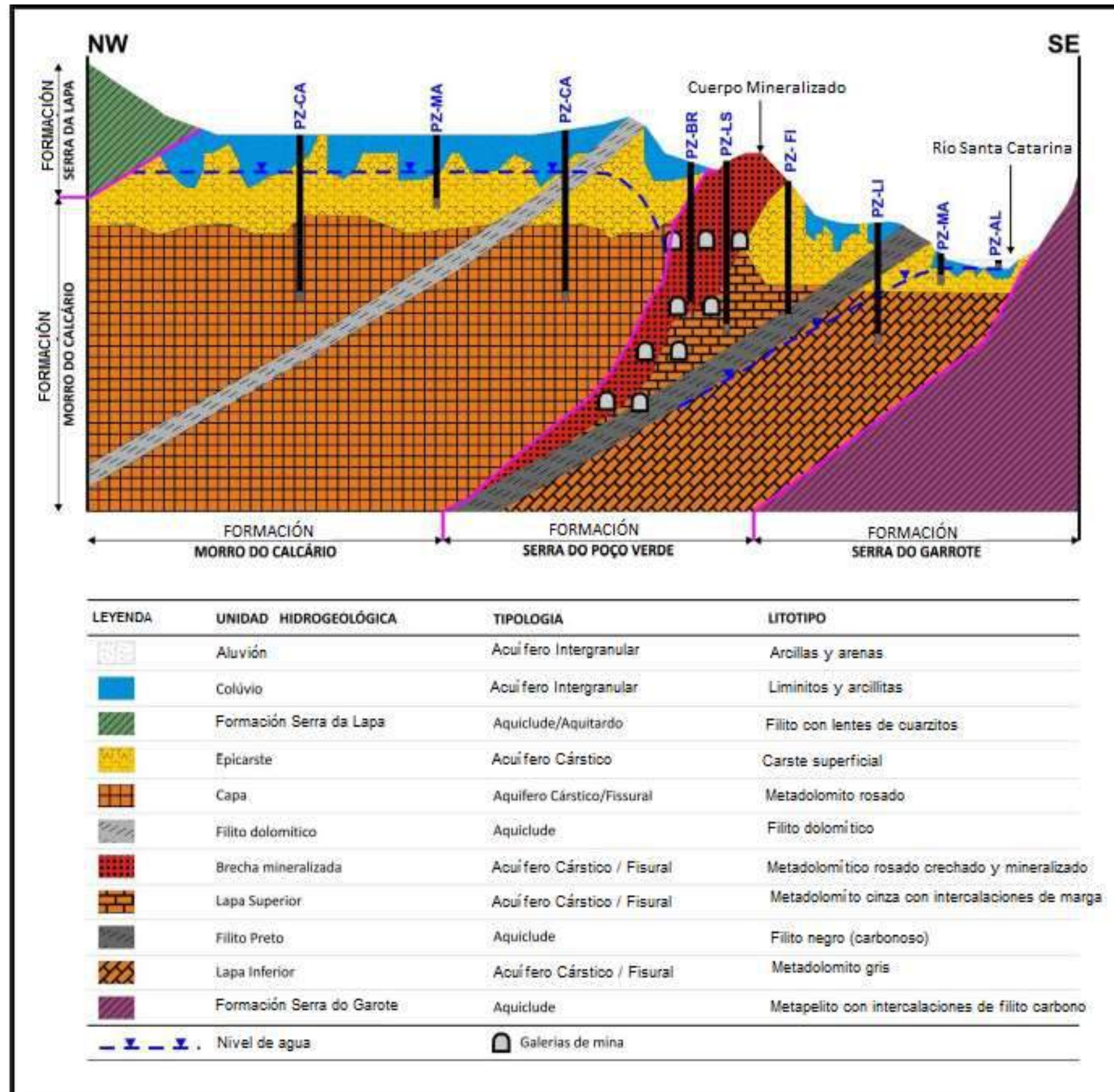
El área total del dominio del modelo conceptual es de 161,2 km², el cual contiene el 100% de la cuenca dolomítica. Esta cueca es demarcada en planta en torno de la cuenca hidrográfica del río Santa Catarina y Barroquinha, siendo limitada en el extremo norte por la Lagoa Feia. Llevando en consideración que los bordes de las cuencas generan un flujo divergente, es apenas necesario modelar hasta sus contornos, considerando que no existirá un flujo de intercambio entre cuencas. La geometría en la sección transversal y longitudinal podría ser limitada en profundidad hasta la unidad do Garrote, debido a que la conductividad hidráulica de esa unidad, en comparación con otras unidades hidrogeológicas, es mucho menor, entonces, podría considerarse que esta unidad se comportaría como un contorno impermeable inferior, siendo no necesaria su inclusión en el desarrollo del modelo conceptual.

4.4.2. Unidades hidrogeológicas y propiedades hidráulicas

Cinco unidades hidrogeológicas principales fueron definidas: (1) sedimentos recientes – coberturas aluviales y coluviales; (2) Dolomito – límite superior del epicarste y compartimientos de la Capa, Lapa Superior y Lapa Inferior; (3) Cuerpo Brechado; (4) acuitardo/Filito Negro y (5) acuitardo/Esquistos. La disposición espacial de ese conjunto, presentado por Pessoa *et al*, 2012, es también representado en la Figura 4.6.

La superficie potenciométrica original, antes da interferencia del abatimiento del nivel del agua del acuífero por bombeo, según descrito por Pessoa *et al.* 2012, debía encontrarse próxima a la cota 600 msnm, siendo ésta considerada el nivel de base regional.

Figura 4.6- Perfil hidrogeológico esquemático en la Mina Vazante.



Fuente: Pessoa *et al.*, 2012

Con relación a las características hidráulicas, en el año 1989 fueron realizados diversos ensayos de bombeo y recuperación del nivel del agua del acuífero, lo que, según Schlumberger (2007) posibilitó el cálculo de los parámetros hidrodinámicos del acuífero cárstico. Los datos fueron analizados por diversos autores, obteniéndose valores de conductividad hidráulica de $1,4 \times 10^{-5}$ m/s.

4.4.3. Recarga y descarga de aguas subterráneas

Según Pessoa *et al.*, 2012, estudios isotópicos de deuterio y oxígeno 18 mostraron que el agua de lluvia es el principal origen de las aguas subterráneas, habiendo sido determinada por este método una tasa de infiltración entre 11% y 25% de la precipitación media anual en la cuenca dolomítica.

Fue determinado a partir de los datos de monitoreo que las principales fuentes de entrada de agua en el modelo conceptual son la precipitación y la ocurrencia de pérdidas de agua al largo del arroyo del río Santa Catarina, en la parte norte (entre las estaciones Bertolo y Pozo Verde). Y como fuentes de descarga se encuentran la parte sur del río Santa Catarina y el volumen de bombeo total extraído de la mina. Basado en estas informaciones es posible obtener el balance hídrico del sistema.

4.5. Revisión y recalibración del modelo numérico existente

El modelo numérico de flujo existente en FEFLOW es aquí verificado y modificado con la intención de incluir las características cársticas y las condiciones de contornos ideales para la obtención de resultados más realistas.

Vale resaltar que el modelo conceptual original realizado por la Schlumberger en el año 2006 fue elaborado en el programa PETREL, el cual genera una malla numérica deformable donde las superficies de las capas numéricas coinciden como los límites de las unidades hidrogeológicas. Este modelo es preparado a partir de datos topográficos, fallas geológicas mapeadas, 1230 sondajes de exploración regionales y de mina, 12 secciones verticales regionales y en el mapa de geología superficial, para la elaboración

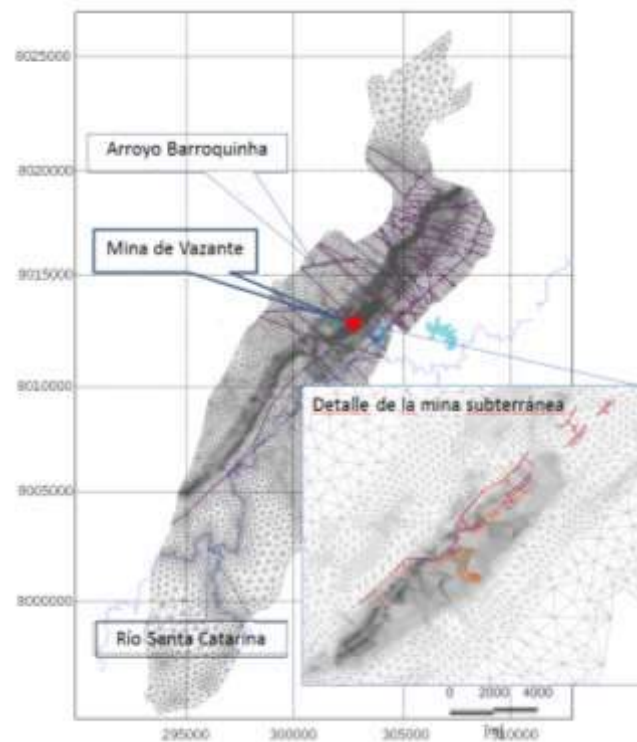
del bosquejo geológico. El modelo numérico original en el FEFLOW consideró que la infiltración es dada vía recarga (precipitación) más los ríos y la descarga por los ríos y lagos. Las estructuras geológicas como fallas fueron representadas por elementos discretos planos de 0,01m de espesura.

En esta fase de revisión y recalibración del modelo numérico el proyecto geológico original fue mantenido. La malla de elementos finitos en el programa FEFLOW sufrió una leve alteración geométrica por la adición de una superficie (*slice*) en la unidad hidroestratigráfica superficial (aluvión) disminuyendo, de esta forma, la longitud vertical de los elementos que estaban representando el río por longitudes más coherentes, para esa camada numérica.

Algunas características del modelo numérico actual son descritas a seguir.

- Área total del modelo: 161,2 km², cubriendo 100% de la cuenca dolomítica.
- Discretización: 1073592 elementos triangulares (células) y 562302 nodos (puntos de intersección de las células) (Figura 4.7).
- 26 camadas numéricas distribuidas verticalmente en 10 unidades hidroestratigráficas.
- Estructuras geológicas (elementos discretos planos 2D con Ley de flujo de Darcy), mapeadas a partir del levantamiento geofísico realizado en 2008, localizadas en el extremo superior del dominio del modelo (sector Extremo Norte).

Figura 4.7 - Modelo numérico de flujo en FEFLOW que muestra la malla de elementos finitos e incluye la localización de la mina de Vazante y de las estructuras 2D (Fallas) en la situación actual de la mina.



Fuente: Propia

Los principales ajustes realizados en el modelo numérico existente fueron:

1. La revisión de los puntos de calibración del modelo, solo llevando en consideración los instalados en el período de 2013.
2. Revisión de las condiciones de contorno utilizadas para representar el río Santa Catarina y otras estructuras de drenajes, así como de sus restricciones.
3. Recalibración de las propiedades hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas del medio poroso continuo-fracturado, complementada con el balance hídrico del sistema.
4. Implementación de las estructuras discreta para la representación de las estructuras cársticas en la región en análisis, incluyendo análisis de

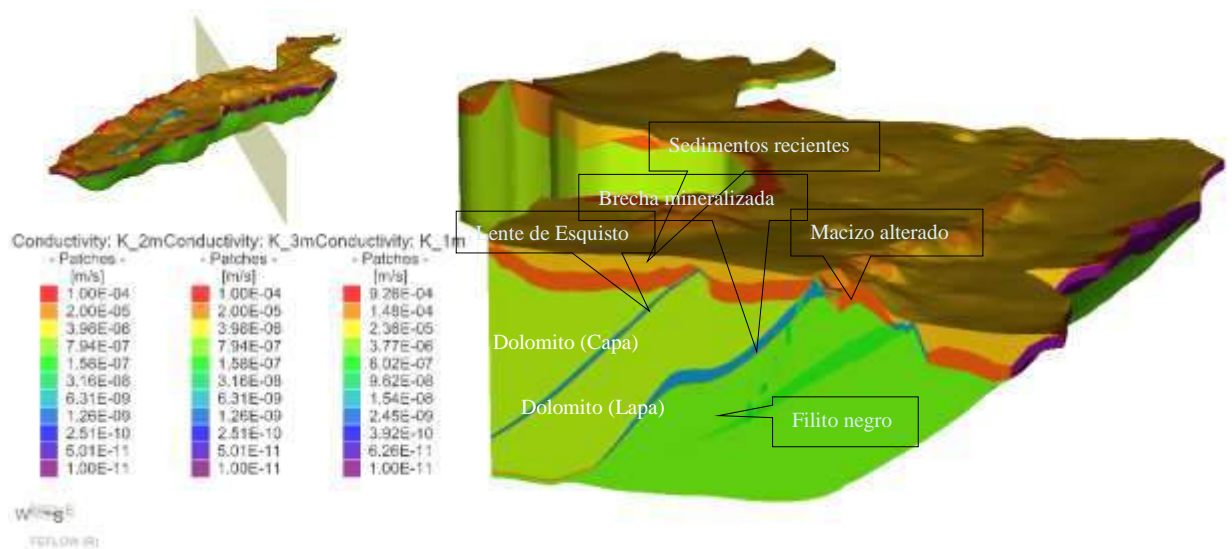
sensibilidad para la determinación de los parámetros que controlan el flujo en estas estructuras.

5. Recalibración de las propiedades hidráulicas de las unidades hidroestratigráficas del medio poroso continuo incluyendo la representación de las fracturas y de las estructuras cársticas.
6. La revisión del balance hídrico del sistema actualizada.

La Figura 4.7 presenta la malla de elementos finitos del modelo numérico en FEFLOW 6.2, y la situación actual de la mina de Vazante. También es posible verificar la localización de los elementos discretos 2D que representan las estructuras geológicas (fallas) mapeadas en la región circunyacente al área en estudio. La Figura 4.8 muestra un corte vertical del modelo indicando la distribución de las unidades hidroestratigráficas con sus respectivos valores de conductividad hidráulica.

Cada uno de esos items enumerados está siendo discutido en las siguientes secciones.

Figura 4.8 – Unidades hidrogeológicas del modelo numérico de flujo en FEFLOW 6.2.



Fuente: Propia

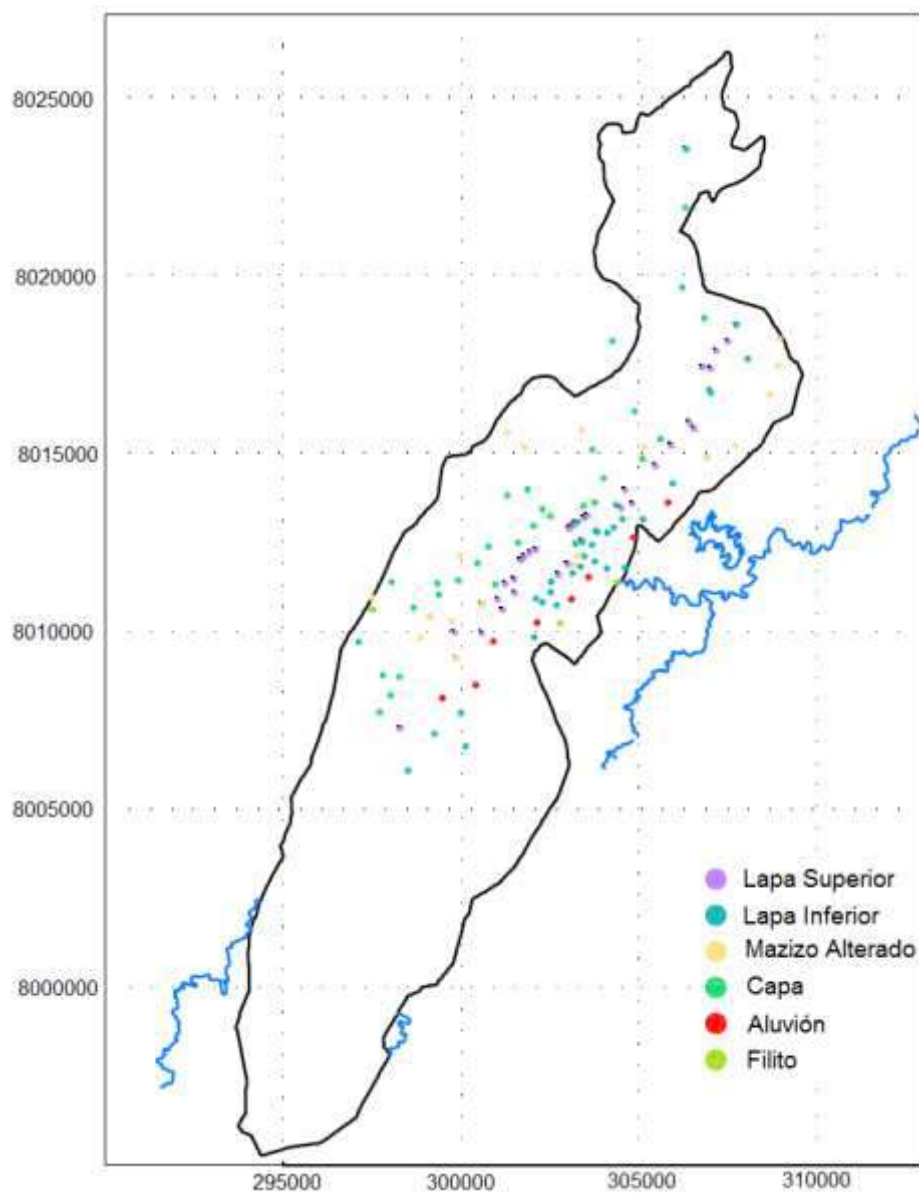
4.5.1. Revisión de los puntos de calibración

Los ajustes en las cargas hidráulicas de los puntos de calibración constituyen uno de los criterios de calibración del modelo numérico, siendo

utilizados en ese sentido pozos y piezómetros que presenten un registro histórico de mediciones de nivel del agua (convertidas en cargas hidráulicas).

En este proceso fueron utilizados en total 135 puntos de control entre piezómetros y pozos instalados en el campo (registro de 2013). La distribución de éstos (en las respectivas unidades hidrogeológicas en la cual fueron instalados) es mostrada en la Figura 4.9 y detallada en la Tabla 4.4, indicando la cantidad de puntos de control por unidades hidrogeológicas.

Figura 4.9 - Modelo numérico de flujo en FEFLOW – Puntos de Calibración 2013.



Fuente: Propia

Tabla 4.4 - Distribución de los puntos de calibración de cargas hidráulicas

Unidad Hidrogeológica	Nro. Puntos de Calibración	Estrato numérico*
Aluvión	8	2
Macizo Alterado	18	4
Capa	34	8
Lapa Superior	35	19
Filito	3	21
Lapa Inferior	37	25

*Se refiere a la camada numérica en que fueron inseridos los puntos de calibración, correspondiente a la respectiva unidad hidrogeológica en el modelo.

Fuente: Propia

Para efecto de calibración de las cargas hidráulicas en el modelo numérico (estado estacionario) se consideró el promedio de los niveles de agua correspondientes al período janeiro - diciembre de 2013 y estos resultados fueron verificados con la descarga media de la mina. Los resultados de la calibración son presentados en el ítem 4.5.3.

4.5.2. Revisión y modificación de las condiciones de contorno

En términos generales, las condiciones de contorno anteriormente aplicadas en el modelo fueron mantenidas, incluyendo el último avance de la labra de la mina. Sin embargo, una modificación esencial fue realizada referente a la condición del contorno empleada para representar el río y su restricción. Otras pequeñas modificaciones también fueron hechas para corregir la condición de la mina en lugares donde además de comportarse como un drenó estaban teniendo un comportamiento de fuente de agua, debido a que su restricción no estaba siendo impuesta. En este sentido, fueron adoptadas las siguientes condiciones:

- Recarga: mantenida conforme modelo existente, correspondiente a 3 zonas de recarga uniforme de alta precipitación, precipitación media y precipitación nula. La recarga es aplicada apenas sobre la camada superior del modelo (C.C. tipo 2). Esto representa una entrada de agua en el modelo de 13990 m³/h.

- Rio Santa Catarina: simulado en el modelo anterior como una C.C. Tipo 3 (*Fluid transfer BC*, ver ítem 2.3.3.4), con un factor limitante de flujo, que impedía que el río se comportase como una fuente infinita de agua para el acuífero. Esta condición fue corregida por representar apenas el flujo generado del río para el acuífero, pero no representando la interconexión del nivel freático entre el río y el acuífero. Por tanto, se verificó que la condición adecuada para tener una representación más realista del sistema tanto en términos de flujo cuanto en la posición del nivel freático sería a C.C. tipo 1, a cual fue aplicada.
- Arroyo Barroquinha y Lagoa Feia: Realmente si esta condición fueran cambiada para el tipo usado en el caso del río Santa Catarina, las respuestas no presentarían alteraciones en el flujo, *i.e.*, la C.C. Tipo 1 y Tipo 3 estarían comportándose de la misma forma desde que ambas tienen la restricción de flujo máximo de cero. Por tanto, para mantener una uniformidad en la representación del río fue atribuida a C.C. Tipo 1.
- La mina subterránea: fue mantenida la C.C. tipo 1 con su restricción de flujo máximo de cero, la cual representa el avance de la labra como puntos con apenas cargas de elevación, debido a que estos se encuentran en contacto con la atmósfera (presión =0). En este caso fue apenas adicionada la restricción en algunos puntos que además de estar comportándose como drenes estaba teniendo también un comportamiento como fuente de agua.

4.5.3. Recalibración del modelo numérico para el medio poroso continuo-fracturado 2014

Una vez hechos los ajustes mencionados encima, se inició el proceso de recalibración (ítem 2.4) del modelo continuo-fracturado propiamente dicho, aplicada apenas a los materiales geológicos y no a las estructuras (fallas), *i.e.*, las propiedades hidráulicas de las fracturas (elementos 2D, Ley de Darcy) no fueron modificados³ en este proceso.

³ Las características de espesura, conductividad, almacenamiento y compresibilidad de estas estructuras fueron mantenidas del modelo anterior.

Este proceso de recalibración tiene como objetivos principales dos aspectos: la reproducción del caudal actualmente bombeada por la mina (11000 m³/h, de enero a diciembre de 2013) y la correspondencia entre las cargas hidráulicas simuladas por el modelo y aquellas medidas en campo. Sin embargo, esta recalibración debe considerar la respuesta observada de la modificación de las condiciones de contorno atribuidas para representar el río Santa Catarina, arroyo Barroquinha y Lagoa Feia, que modificaron, o incrementaron numéricamente el flujo en el río.

Uno de los resultados de la calibración fue el incremento en el caudal del río para la mina, que alcanzó un valor de 3600 m³/h. Este sería un valor más próximo al registrado en el campo, siendo que antes el río aportaba aproximadamente 400 m³/h para la mina.

En este estudio de mina subterránea, la conductividad hidráulica de las unidades hidrogeológicas es el parámetro hidráulico a ser modificado, usando el método de Tentativa y Error (Item 2.4.1.1). Este proceso de ajuste es realizado bajo el continuo control del caudal actual bombeado de la mina, estimada en 11000m³/h.

La Tabla 4.5 presenta un resumen de los parámetros recalibrados en el modelo al 2014, comparando estos con los parámetros correspondientes a la calibración anterior (Votorantim, 2013).

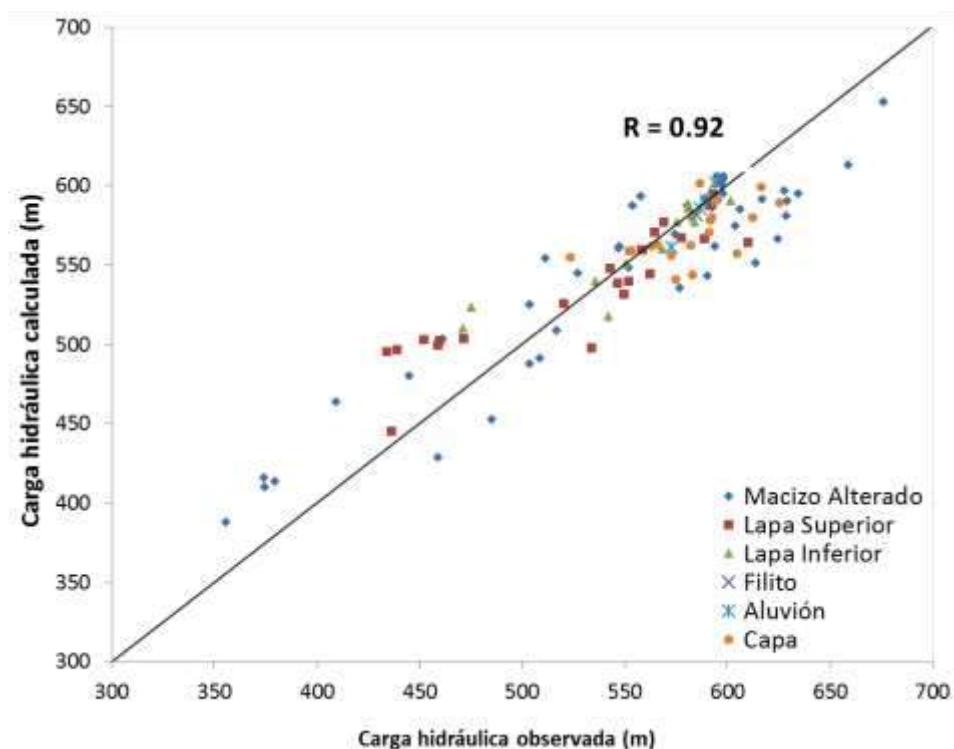
Tabla 4.5 - Parámetros hidrodinámicos considerados en el modelo de flujo.

Unidad Hidrogeológica	Modelo calibrado (Votorantim, 2013)			Modelo recalibrado al 2014		
	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)
Sedimentos recientes (Aluvión)	4,00E-05	1,00E-04	10:1	4,60E-05	1,00E-04	10:1
Dolomito carstificado	1,00E-04	1,00E-04	1:1	1,00E-04	1,00E-04	1:1
Dolomito (Capa)	4,00E-06	1,00E-04	1:1	4,00E-06	1,00E-04	1:1
Xisto	1,00E-08	1,00E-04	1:1	1,04E-08	1,00E-04	10:1
Dolomito (Lapa superior)	1,00E-06	1,00E-04	1:1	1,39E-06	1,00E-04	1:1
Zona de brecha	1,11E-07	1,00E-04	1:1	1,00E-07	1,00E-04	1:1
Filito negro	4,00E-07	1,00E-04	1:1	4,00E-07	1,00E-04	1:1
Dolomito (Lapa inferior)	1,00E-06	1,00E-04	1:1	1,39E-06	1,00E-04	1:1
Estructuras (Fallas)	9,00E-02	1,00E-04	---	9,00E-02	1,00E-04	---

Fuente: modificado de Votorantim, 2013

Conforme se observa en la tabla arriba, pocas modificaciones en las unidades hidrogeológicas fueron necesarias con relación a la calibración anterior. Las modificaciones consistieron en el: incremento de la conductividad hidráulica los sedimentos recientes (aluvión) de $4,0 \times 10^{-5}$ m/s para $4,60 \times 10^{-5}$ m/s, manteniendo su nivel de anisotropía; incremento en la conductividad hidráulica del Dolomito (Lapa superior) de $1,0 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-6}$ m/s, manteniendo la isotropía; y un leve incremento en la conductividad hidráulica del Esquisto, de $1,00 \times 10^{-8}$ m/s para $1,04 \times 10^{-8}$ m/s, cambiando también el nivel de anisotropía de 1:1 para 10:1. Esas modificaciones buscaran replicar no apenas los niveles de agua y flujos observados, como la propia naturaleza del macizo rocoso, donde la matriz presenta una baja conductividad hidráulica y el flujo de agua subterránea ocurre preferencialmente por las estructuras geológicas (en este caso, las fallas). Cabe la pena destacar que a partir de estos análisis fue observado que la unidad Dolomito (Lapa) es el material que rige el comportamiento del modelo hidrogeológico.

Figura 4.10 - Curva de calibración entre niveles medidos y calculados por el modelo.



Fuente: Propia

La curva de calibración del modelo para la mina actual (2014) es presentada en la Figura 4.10, donde es notada una correspondencia razonable

entre cargas hidráulicas medidas y simuladas. Los mayores desvíos son observados en el área de la mina, donde las excavaciones aumentan considerablemente la heterogeneidad del macizo debido al grande alivio de tensiones el cual están constantemente sometido.

Los errores correspondientes, de acuerdo con la evaluación estadística fueron los siguientes: RMS =26,34 (Raíz media cuadrática) MAE =20,24 (Error medio absoluto). Estos métodos de cálculo están descritos en el ítem 2.4.3.2. Los residuales obtenidos (diferencia entre nivel observado y nivel simulado) varían entre 0,29 m y 62,39 m. Estos resultados presentan una mejora en relación al modelo inicial.

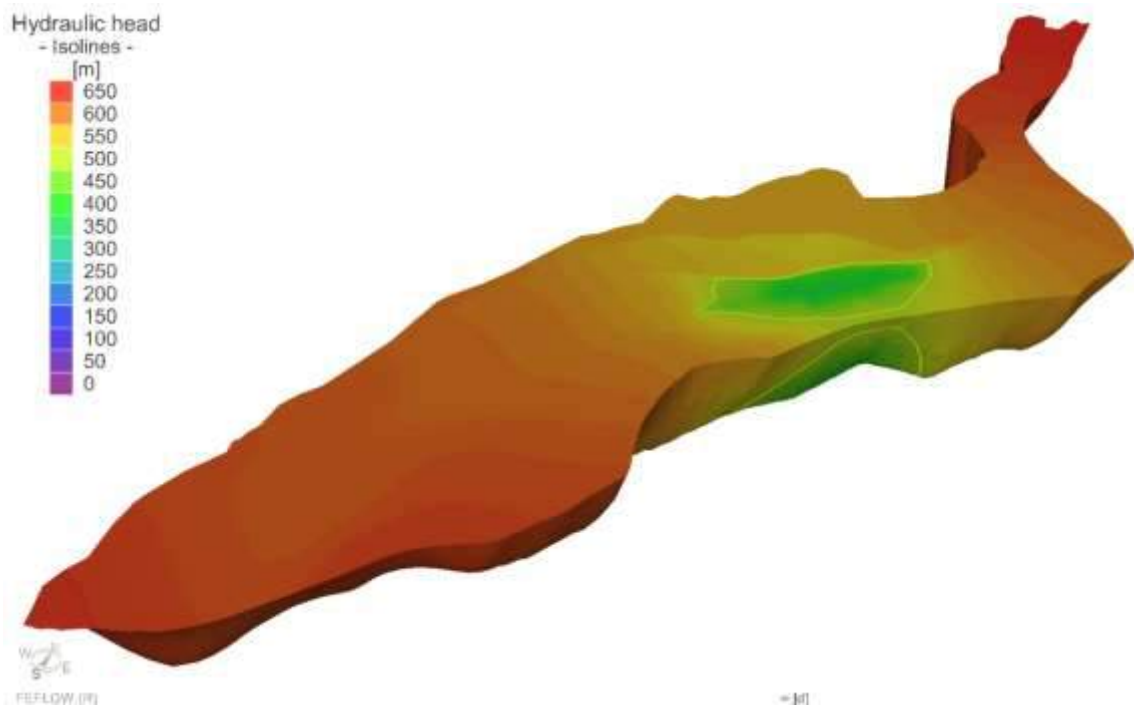
La Tabla 4.6 muestra el balance de masa obtenido para la mina actual, posterior al proceso de recalibración y la Figura 4.11 presenta la superficie potenciométrica simulada.

Tabla 4.6 - Balance de masa para la simulación de la mina actual

Entrada	m ³ /h	Salida	m ³ /h
Recarga	12377,42	Rio Santa Catarina y Arroyo Barroquinha	5016,08
Rio Santa Catarina	3639,17	Mina	11000,50
Total	16016,58	Total	16016,58

Fuente: Propia

Figura 4.11 - Superficie potenciométrica simulada para la mina actual (Cota 326).



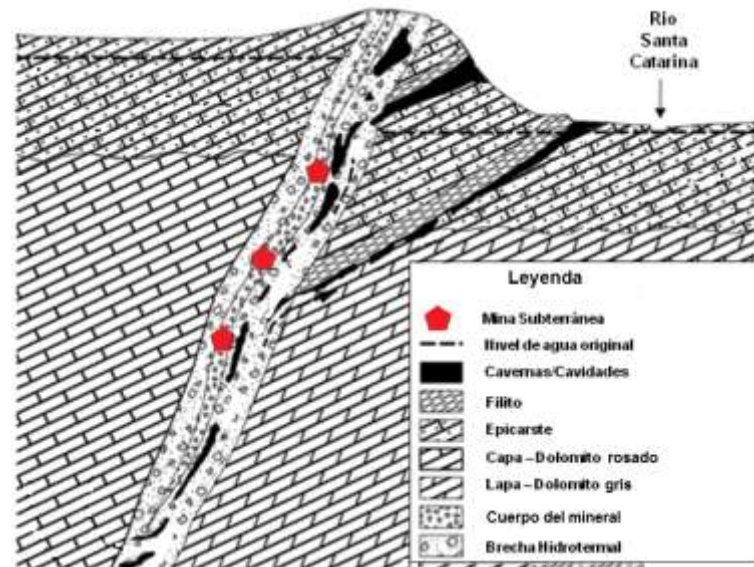
Fuente: Propia

4.5.4. Implementación de elementos discretos 1D como estructuras cársticas

El incremento de dolinas en la región da mina de Vazante puede estar relacionado con o abatimiento de la superficie freática, que se encuentra en expansión, debido al avance de la mina, bajo el río Santa Catarina (Figura 4.12, Figura 4.5). El surgimiento de estas formaciones representa un riesgo a las operaciones en curso, dadas las consecuencias potencialmente severas de una conexión directa en grande escala entre el río y las excavaciones subterráneas.

De acuerdo con la DHI Brasil (Guiguer *et al.*, 2013), tres caminos preferenciales de flujo fueron identificados a través de los ensayos con trazadores realizados a lo largo del río Santa Catarina, realizados con el objetivo de encontrar posibles pérdidas de flujo del río para la mina a través de estos conductos. Según esos resultados, el caudal aproximado de flujo del río que pierde para la mina es en torno de 3650 m³/h.

Figura 4.12 – Representación esquemática de las estructuras cársticas en la región de la mina de Vazante



Fuente: Bittencourt & Reis, 2012

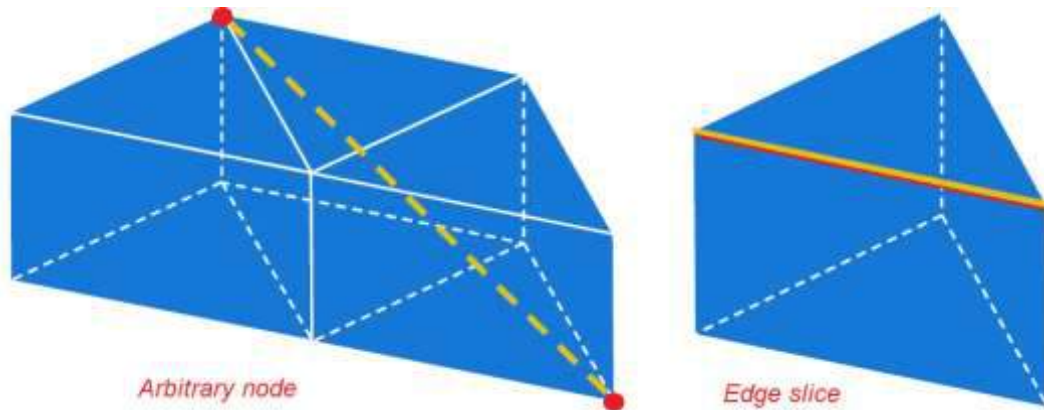
Estas formaciones geológicas están siendo inseridas en este modelo numérico como elementos discretos 1D del tipo *Arbitrary node* (Figura 4.13) y posteriormente resueltas en conjunto con el medio poroso continuo, siendo los cálculos de flujo en estos elementos basados en la Ley de *Manning* y en el principio de las ecuaciones de flujo básicas. Llevando en consideración que las características discretas apenas incrementan la conductividad hidráulica en los nodos conectados a estos elementos. La Figura 4.1 muestra las nuevas estructuras mapeadas (líneas amarillas) a considerar en el modelo de recalibración 2014.

Caracterización de los elementos discretos 1D (*Arbitrary Node*)

De acuerdo con lo descrito en las condicionantes geológicas (item 4.2.2), las dolinas observadas en el campo presentan diámetros de hasta 1 metro en la región superficial (Carste desenvuelto, representado en la Figura 4.2) y tienden a disminuir con la profundidad. Estas características son referencia importante en el momento de considerar la inclusión de las características cársticas en el modelo numérico.

Un análisis de sensibilidad fue realizado para evaluar el comportamiento del flujo del sistema cuando estas estructuras son consideradas en el modelo. Este análisis indicará el incremento de flujo que sería infiltrado al acuífero a través de estos elementos, al mismo tiempo el río debe mantener una pérdida de flujo de 3600 m³/h para el acuífero.

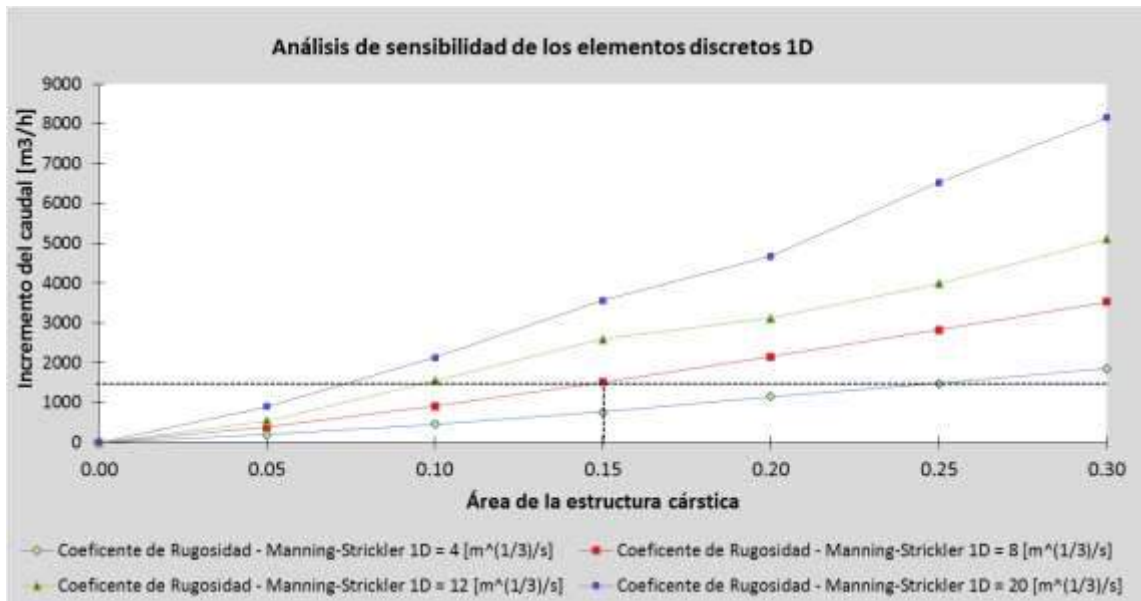
Figura 4.13 - Representación numérica de los elementos discretos 1D en el FEFLOW: *Arbitrary node* y *Edge slice*



Fuente: DHI-Wasy, 2014

Desde que en el modelo numérico estos elementos son gobernados por la ecuación de *Manning* el incremento del flujo en estas estructuras es verificado para diferentes diámetros (áreas) y coeficiente de rugosidad *Manning-Strickler*, con el objetivo de verificar el aumento en el caudal y de atribuirles características geométricas-hidráulicas, en concordancia con lo observado y registrado en el campo.

Figura 4.14 - Análisis de sensibilidad para la determinación de las variables que rigen el comportamiento de flujo en el interior de los elementos 1D (Estructuras cársticas).



Fuente: Propia

Como mostrado en la Figura 4.14, la variación del diámetro y del coeficiente de rugosidad *Manning-Strickler* de estas estructuras se refleja en el incremento del caudal de manera proporcional. Inicialmente, la banda de diámetro analizada fue de 0 - 0,8m, con coeficientes de rugosidad variando entre 4 y 20. El objetivo inicial fue verificar el aporte total de estas estructuras en la generación de un flujo adicional que estas provocan en el sistema, teniendo como valor fijo el caudal que el río descarga en el acuífero de 3650 m³/h. Se verificó entonces que un valor de 0,8m de diámetro para diferentes coeficientes de rugosidad aumenta enormemente el valor del caudal, siendo el coeficiente de rugosidad la variable más influyente en los resultados del sistema. Estos análisis iniciales sirvieron para corregir los límites de análisis de estas variables, donde la banda fue limitada para diámetros de hasta 0,6m (área de 0,3m²) y coeficiente de rugosidad de hasta 8 (Figura 4.14), calculando, de esta forma, un incremento de flujo (en las estructuras cársticas) de 3490 m³/h.

A partir de estos resultados, los elementos discretos están siendo caracterizados con diámetros de 0,44 m (área de 0,15 m²) y coeficiente de rugosidad *Manning Strickler* de 8, resultando en un incremento total de flujo de entrada de 1528 m³/h para el sistema, el cual indicaría un valor razonable, que podría ser justificado, primero, porque la sección transversal en estas estructuras disminuye con la profundidad, llevando en cuenta que los diámetros

observados en el campo fueron de hasta 1m; y segundo, porque un coeficiente de rugosidad *Manning-Strickler* de 8 podría ser equivalente a tuberías rellenas corroídas sin mantenimiento, generando así una alta resistencia al movimiento del flujo.

4.5.5. Recalibración del modelo numérico continuo-fracturado considerando las estructuras cársticas

Una vez inseridas estas características cársticas no modelo numérico, este resultará en un flujo descompensado, debido a la presencia de estos elementos discretos, *i.e.*, con un exceso de 1528 m³/h, como indicado en el ítem anterior. Este exceso de flujo debe ser corregido debido a que la región del río (que a partir de ahora abarca el río más las estructuras cársticas) deberá transmitir un flujo de apenas 3650 m³/h para el acuífero. Este proceso de ajuste requiere una recalibración de las unidades hidrogeológicas para poder equilibrar nuevamente el flujo esperado del río para el acuífero, donde el medio poroso en general deberá tener una disminución de su conductividad debido a la inserción de estos elementos.

Para este segundo paso de recalibración tanto las estructuras discretas (fallas) cuanto las condiciones de contorno del modelo ya vienen corregidas (del paso de recalibración anterior) y las estructuras cársticas están siendo inseridas⁴. Así siendo, este proceso contempla el ajuste del flujo de la región del río para el acuífero en un total de 3650 m³/h, distribuidos en 2 parcelas, una parcela correspondiente al conjunto de estructuras cársticas de 1528 m³/h y la otra parcela correspondiente al aporte sólo del río de 2122 m³/h. Nuevamente, para obtener el balance hídrico del sistema las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas serán ajustadas, siempre controlando que el caudal actual bombeado de la mina, estimada en 11000m³/h, no se modifique.

La Tabla 4.7 presenta un resumen de los parámetros finales recalibrados en el modelo, comparándolos con los parámetros aplicados en la recalibración anterior.

⁴ En el paso anterior fueron separadas las influencias de las fracturas y del medio poroso más estructuras cársticas. Luego, las propiedades del medio poroso eran una media entre el medio poroso real y las estructuras cársticas (como se fuera un medio equivalente).

Tabla 4.7 - Parámetros hidrodinámicos considerados en el modelo de flujo con estructuras cársticas.

Unidad Hidrogeológica	Modelo recalibrado al 2014 (sin estructuras cársticas)			Modelo recalibrado al 2014 (con estructuras cársticas)		
	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)
Sedimentos recientes (Aluvión)	4,60E-05	1,00E-04	10:1	2,90E-05	1,00E-04	10:1
Dolomito carstificado	1,00E-04	1,00E-04	1:1	8,1E-05	1,00E-04	1:1
Dolomito (Capa)	4,00E-06	1,00E-04	1:1	1,16E-06	1,00E-04	1:1
Esquisto	1,04E-08	1,00E-04	10:1	5,78E-09	1,00E-04	10:1
Dolomito (Lapa superior)	1,39E-06	1,00E-04	1:1	8,10E-07	1,00E-04	1:1
Zona de brecha	1,00E-07	1,00E-04	1:1	1,11E-07	1,00E-04	1:1
Filito negro	4,00E-07	1,00E-04	1:1	4,00E-07	1,00E-04	1:1
Dolomito (Lapa inferior)	1,39E-06	1,00E-04	1:1	8,10E-07	1,00E-04	1:1
Estructuras (Fallas)	9,00E-02	1,00E-04	---	9,00E-02	1,00E-04	---

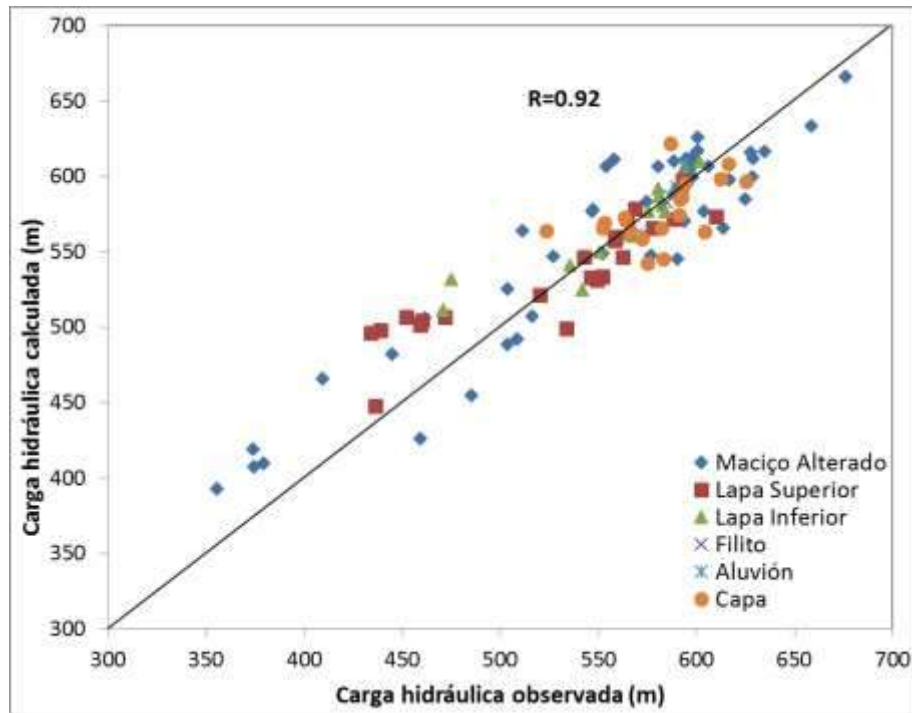
Fuente: Propia

Conforme mostrado en la tabla encima, sutiles modificaciones en las unidades hidrogeológicas fueron realizadas (con relación a la recalibración anterior que no llevaba en cuenta las estructuras cársticas).

La curva de calibración final del modelo para la mina actual que considera las estructuras cársticas (2014) es presentada en la

Figura 4.15, donde es nuevamente notada una correspondencia razonable entre las cargas hidráulicas medidas y simuladas. Valores de errores RMS = 25,90, así, como MAE = 20,13, quedaron dentro de la banda aceptable para modelajes numéricas. Los residuales obtenidos (diferencia entre nivel observado y nivel simulado) varían entre 0,47 m y 62,07 m.

Figura 4.15 - Curva de calibración entre niveles medidos y calculados por el modelo con estructuras cársticas.



Fuente: Propia

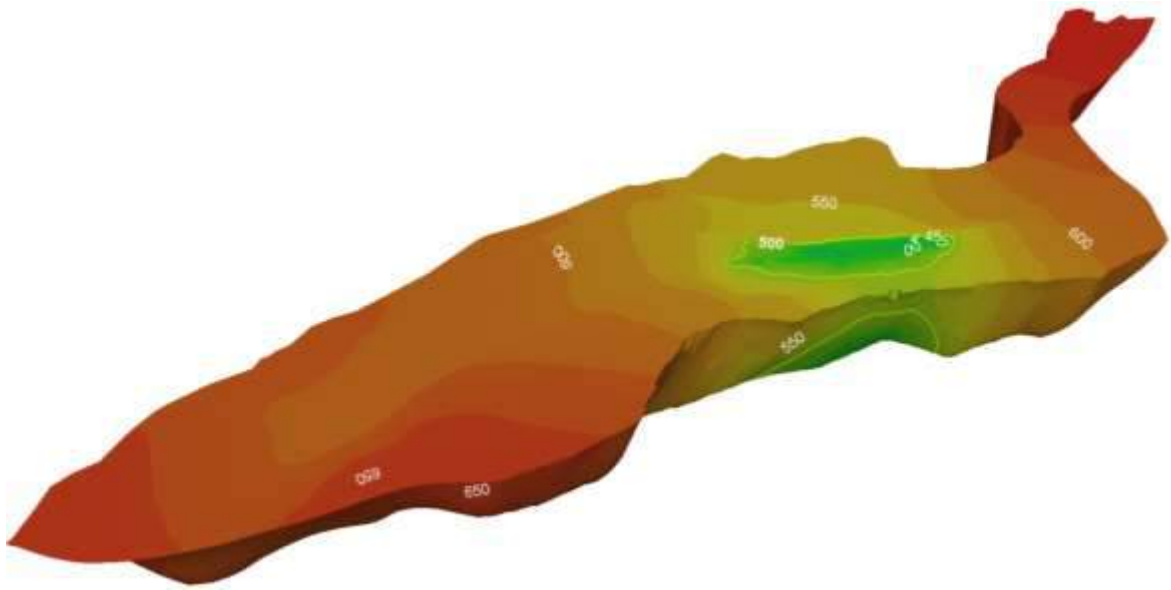
La Tabla 4.8 muestra el balance de masa obtenido para a mina actual. La Figura 4.16 muestra la superficie potenciométrica simulada final.

Tabla 4.8 - Balance de masa para la simulación de la mina actual, considerando caminos cársticos.

Entrada	m ³ /h	Salida	m ³ /h
Recarga	13031,67	Rio Santa Catarina y Arroyo Barroquinha	5682,00
Rio Santa Catarina	3650,29	Mina	11000,50
Total	16681,96	Total	16682,50

Fuente: Propia

Figura 4.16 - Superficie potenciométrica simulada para la mina actual (Cota 326) considerando las estructuras cársticas en el modelo.



Fuente: Propia

4.6. Escenarios de comportamiento de flujo subterráneo

Una vez que el modelo numérico fue calibrado con y sin la implementación de las estructuras cársticas (item 4.5.4), evaluaciones del comportamiento de flujo son realizadas para ambos casos para destacar la influencia de estas estructuras en el padrón de flujo de aguas subterráneas, ya que éstas generan flujos preferenciales cuyo flujo descarga en la mina.

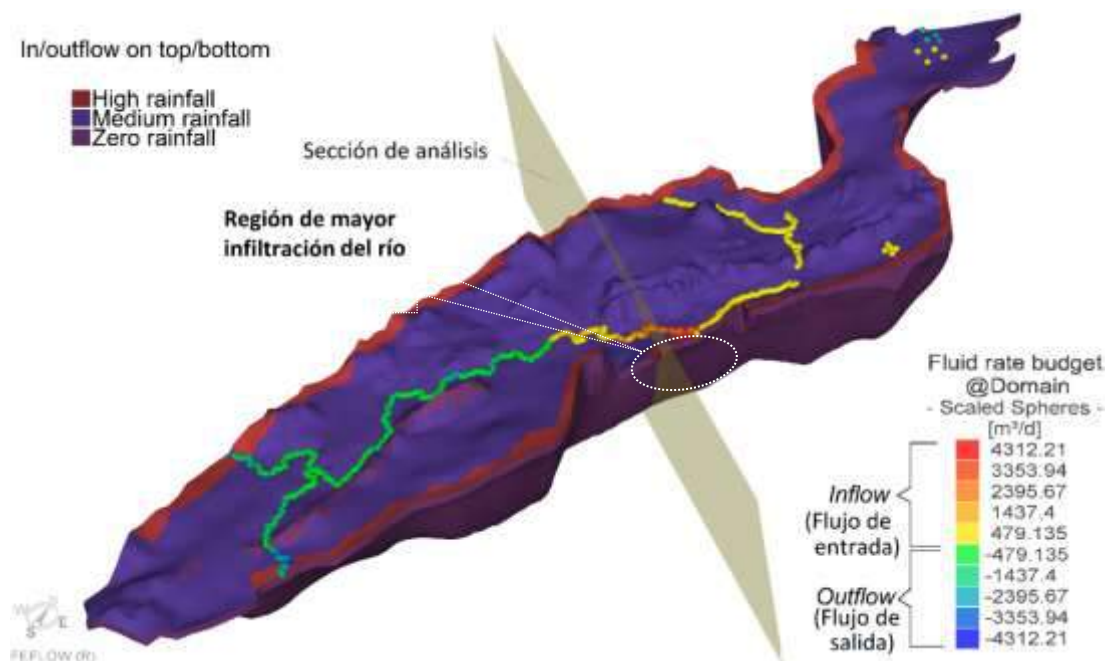
Como analizado en este estudio de caso, el problema central está en la infiltración de agua que descarga en la mina, que puede tener un porcentaje de aporte de agua del río. Es importante también verificar el volumen o caudal de agua que el río Santa Catarina pierde para el acuífero, y la parcela de contribución de las estructuras cársticas en este aspecto, principalmente en la región de mayor infiltración del río. En este contexto, cuatro escenarios de comportamiento de flujo son a seguir verificados: (1) sin considerar estructuras cársticas; (2) sin considerar estos caminos cársticos pero impermeabilizando el trecho del río que está perdiendo agua para el acuífero; (3) considerando la presencia de estos caminos cársticos y; (4) considerando estos caminos cársticos e impermeabilizando el río.

4.6.1. Escenario 1: Flujo subterráneo sin considerar estructuras cársticas

Los resultados de este análisis de flujo, sin la implementación de estos caminos cársticos, pueden ser mejor examinados en una sección del modelo⁵ (Figura 4.17) que pase por el río⁶ en la región de mayor infiltración de agua para el sistema. En este sentido, se verifica la posición del nivel freático de la mina actual (Figura 4.18), la región del río que aporta flujo para la mina (

Figura 4.19) y las trayectorias de flujo, en especial, aquellas del río para la mina (Figura 4.20).

Figura 4.17 - Localización de la sección transversal a ser analizada para los escenarios 1 y 2 de análisis de flujo.



La Figura 4.18 es una sección de análisis que indica la posición actual de la mina y del nivel freático. Se observa que la línea freática se conecta con el río (puntos llenos amarillos), el cual indica una representación más realista de su posición, producto de la modificación de la condición de contorno (de Tipo 3 para Tipo 1) impuesta en el río (item 4.5.2).

⁵ La principal recarga del dominio es debido a la precipitación (*rainfall*) y es delimitada en 3 regiones principales: de alta, baja y prácticamente sin precipitación.

⁶ La trayectoria del río es delimitada por puntos continuos, cuyos colores indican las intensidades del flujo que entran y salen del dominio.

Figura 4.18 - Escenario 1: Superficie del nivel freático generado por las condiciones de contorno impuestas en el río y en la mina.

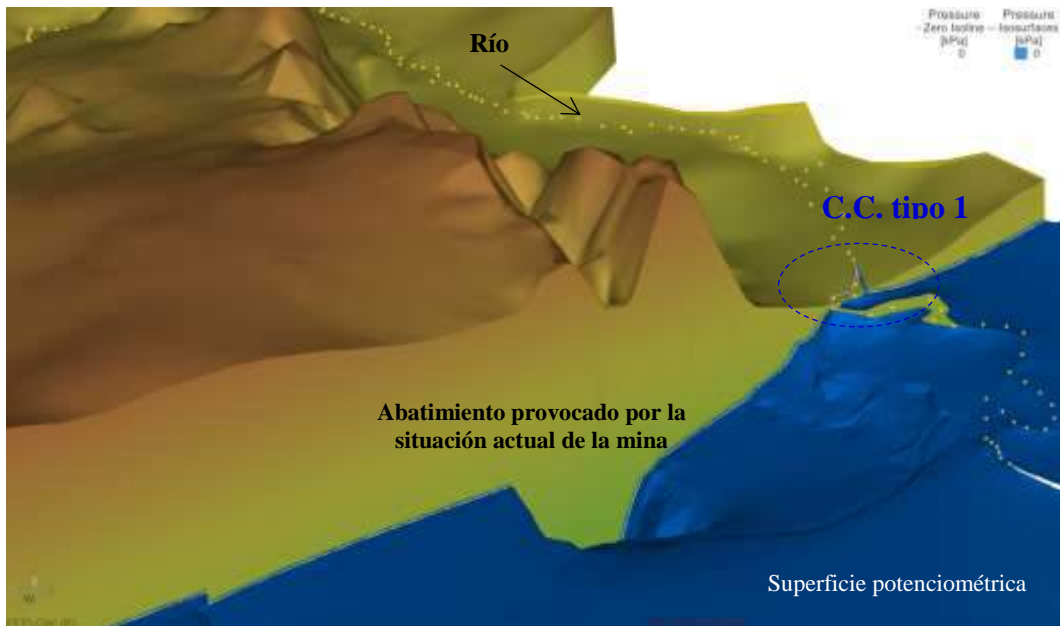
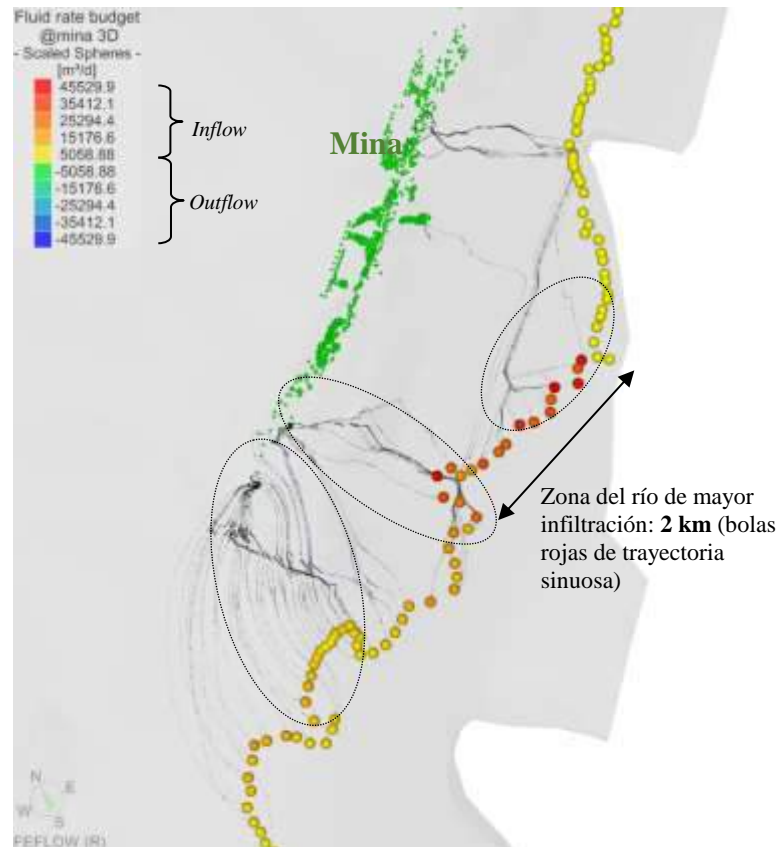


Figura 4.19 - Escenario 1: Intensidades de flujo de recarga por río y descarga en la mina, para su posterior bombeo.



La Figura 4.19 es un *close-up* de la región de mayor infiltración del río para el dominio, de longitud aproximada de 2 km, como ilustrado en la Figura 4.17. En esta figura se indican también las intensidades de flujo de entrada - *inflow*- (en los nodos) del río para el modelo y la intensidad del flujo de salida - *outflow*- a través de los nodos que están representando a la mina subterránea.

Figura 4.20 - Escenario 1: Trayectorias de flujo (líneas de color negro) del río para la mina.



La Figura 4.20 ilustra las trayectorias das partículas que siguen desde el río para la mina, verificando, de esa forma, que el río está aportando agua para el acuífero (y mina) a partir de regiones particulares. A partir de esta figura también pueden identificarse con más claridad los 2 km de longitud del río (desde E 304340 N 8011562 a E 303080 N 8010928) que presenta la mayor tasa de infiltración para el acuífero. Esto es importante porque una de las alternativas propuestas a partir de estos análisis sería la impermeabilización parcial del río, que abarcaba apenas la longitud de mayor infiltración.

4.6.2. Escenario 2: Flujo subterráneo sin estructuras cársticas e impermeabilizando el río

Una alternativa como sistema de control de aguas sería la impermeabilización de la superficie (item 3.3.1), de tal forma que el aporte de esta fuente (río) sea disminuido al máximo posible. A partir de la longitud total de infiltración (Figura 4.21), que es en torno de 6,3 km, la primera opción sería la impermeabilización del río en esa longitud, y como segunda opción sería

impermeabilizar apenas los 2 km (Figura 4.23) correspondientes a la región de infiltración máxima. Estas dos alternativas de impermeabilización están siendo evaluadas y comparadas a seguir, para verificar la solución más viable.

Opción (A) Impermeabilización do río para la longitud total de infiltración

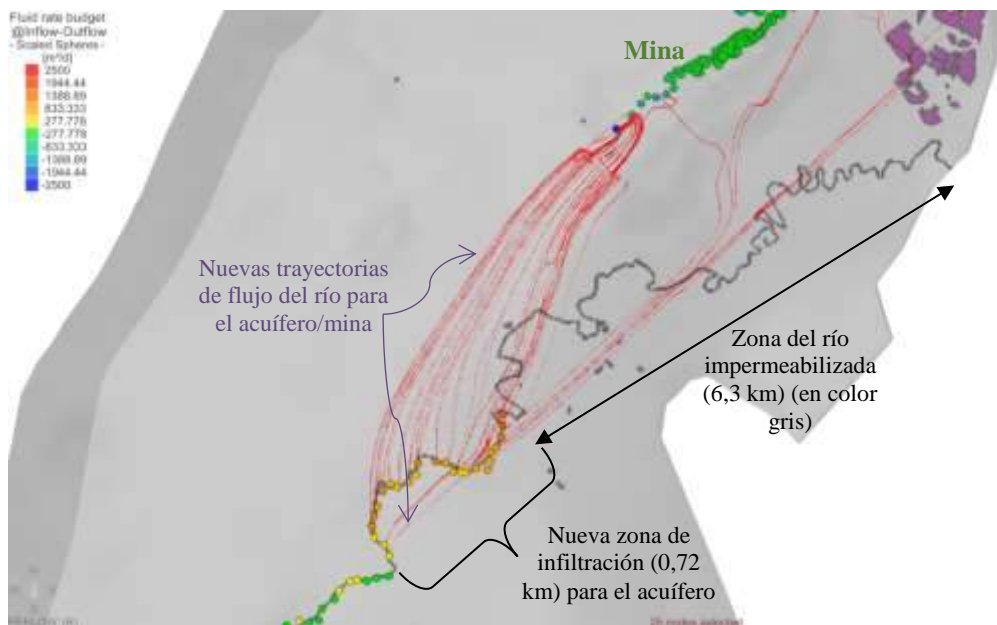
A partir de los resultados numéricos, la impermeabilización del río elimina la infiltración en esos 6,3 km (trazo identificado en el Escenario 1), pero, crea una nueva región de infiltración no río (aguas abajo), de menor longitud (0,72 km) que inicialmente era de exfiltración, tal como se muestra en la Figura 4.22. Los valores de flujo de entrada que el río pierde para el acuífero se redujeron de 3650 m³/h para 747 m³/h (80%) posterior al proceso de impermeabilización.

Pero también se destaca la importancia que hay en cuantificar cual es el caudal que el conjunto -río y acuífero- descarga en la mina subterránea. En una primera instancia se pensaría que la reducción sería en la misma proporción que la reducción del caudal que tiene el río para el acuífero. Sin embargo, la reducción conseguida del flujo de descarga en la mina es diferente, reflejada sólo en la reducción de 11000 para 9020 m³/h (18%), esto debido a que si bien el sistema está teniendo una reducción del flujo de entrada por parte del río, el mismo está teniendo un incremento de recarga por parte de las aguas subterráneas para la mina.

Figura 4.21 – Escenario 2: Representación esquemática del tramo del río impermeabilizado (impermeabilización total)



Figura 4.22 - Escenario 2: Zona de impermeabilización total del río (6,3 km)



Opción (B) Impermeabilización del río para una longitud parcial de infiltración

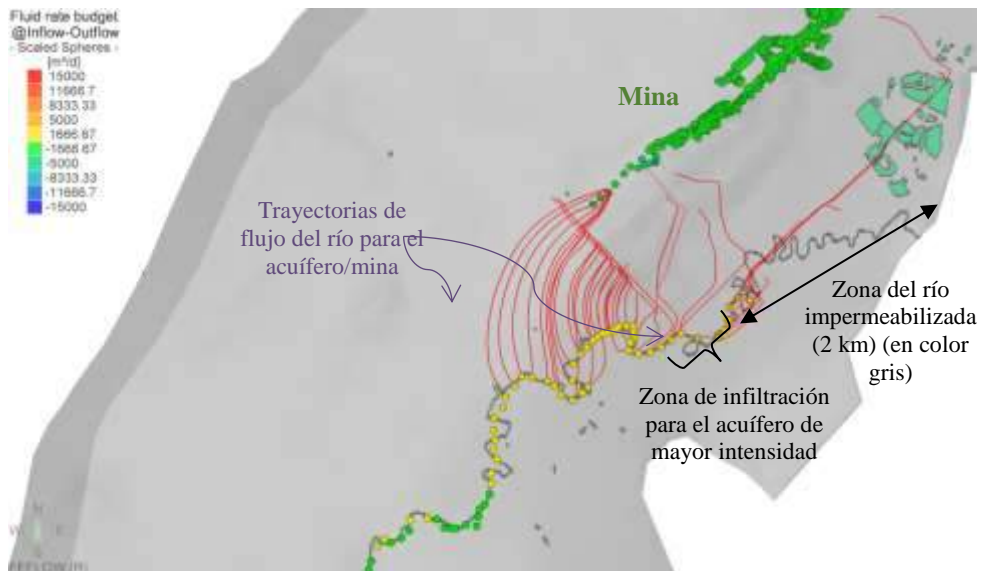
Como en el caso de la Opción (A), en este caso también se verificaron los resultados cuando la impermeabilización del río fue realizada parcialmente, abarcando apenas 2 km correspondientes al trecho de mayor infiltración, como mostrado en la Figura 4.20. Los resultados de estos análisis que impermeabiliza un trecho de infiltración del río también crea una nueva región (aguas abajo del tramo impermeabilizado) con tasas de infiltración de intensidades mayores de las que tenía antes (pues la infiltración ya existía), de aproximadamente 1km de longitud, como mostrado en la Figura 4.24. El flujo

que el río pierde para el acuífero se redujo de 3650 para 2550 m³/h (30%). Sin embargo, el flujo que ambos, río y acuífero, aportan para la mina se redujo de 11000 para 10022 m³/h (8%).

Figura 4.23 - Escenario 2: Representación esquemática del tramo del río impermeabilizado (impermeabilización parcial)



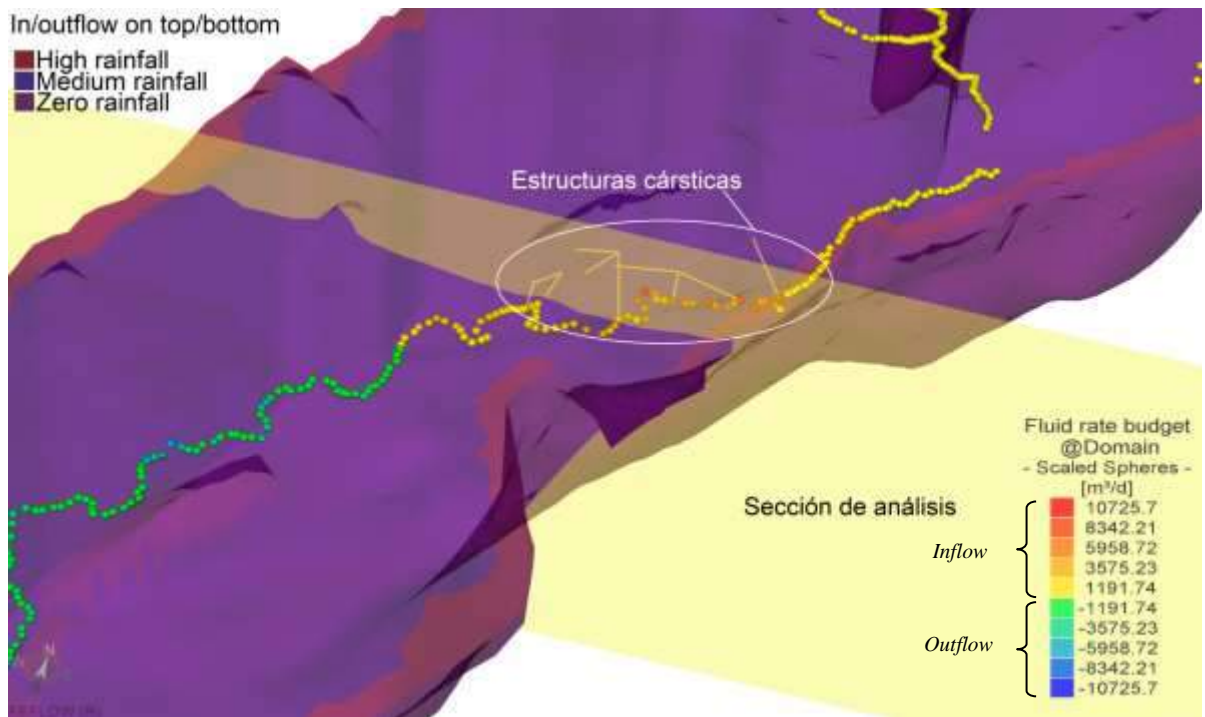
Figura 4.24 - Escenario 2: Zona de impermeabilización parcial del río (2 km)



4.6.3. Escenario 3: Flujo subterráneo considerando estructuras cársticas

Una vez que las estructuras cársticas fueron adicionadas explícitamente y el modelo numérico fue recalibrado (ítem 4.5.5), es posible evaluar la dinámica del flujo de este sistema. El primer albo de este análisis es comparar la diferencia de estos resultados como aquellos que no consideraron estos caminos preferenciales, y seguidamente, verificar el tramo del río a ser impermeabilizado, como una solución atenuante al volumen de agua que se descarga en la mina. En este sentido, la evaluación de los resultados es realizada para la misma sección transversal del escenario 1 (Figura 4.25).

Figura 4.25 – Localización de las estructuras cársticas en el dominio y de la sección de análisis para los escenarios 3 y 4.



De acuerdo con los análisis de sensibilidad realizados en el ítem 4.5.4, las estructuras cársticas estarían aportando 42% do flujo que el río pierde para el acuífero. Si bien el efecto del aporte del río para el acuífero (considerando o no estructuras cársticas) es el mismo, el análisis que contempla las estructuras cársticas es más realista porque permite identificar no solo os caminos preferenciales como fuentes discretizadas (flechas negras en la Figura 4.26)

así como también el trecho el río de mayor infiltración de una forma más legítima.

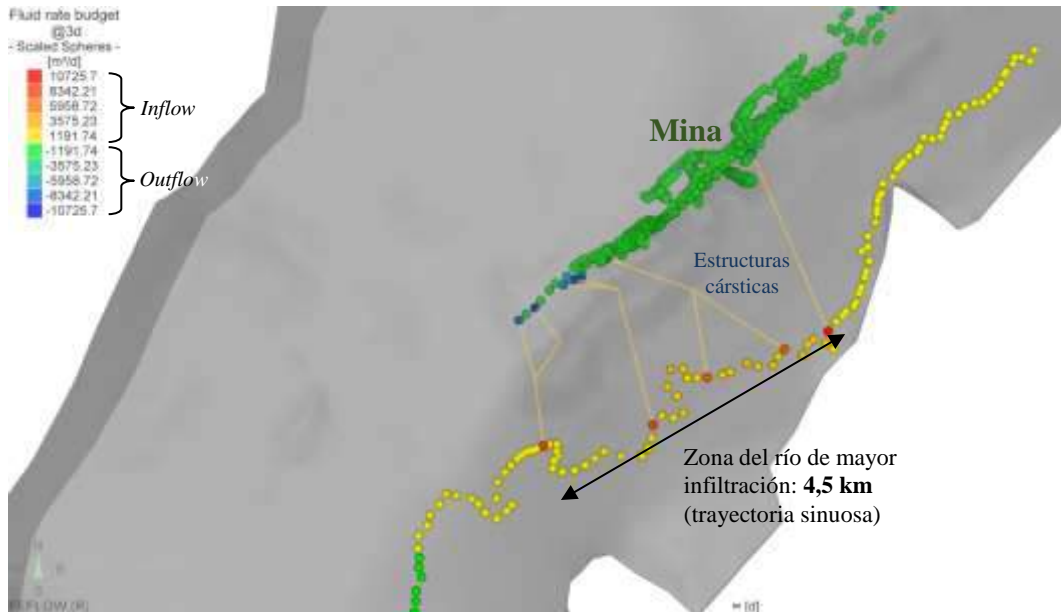
A partir de estos análisis se verificó que el tramo crítico de infiltración del río es mayor, producto de la posición de estas estructuras cársticas en esa región. Este trecho, que en el Escenario 1 (item 4.6.1) era de 2km, en estos análisis se incrementó para 4,5 km, debido a que estas estructuras están moderadamente esparcidos a lo largo del río y actúan como puntos discretos de grandes infiltraciones (Figura 4.27). La implementación de estas estructuras cársticas, más una vez, mejoran el modelo por brindar resultados más confiables, principalmente, se algún proceso de atenuación (de alto costo) tiene que ser ejecutado.

Las posiciones de las estructuras cársticas, en las coordenadas UTM, implementadas en el modelo numérico están listadas en la Tabla 4.9 basados en el trabajo de Guiguer *et al.*, 2013.

Figura 4.26 – Escenario 3: Características del flujo influenciado a través de las estructuras cársticas.



Figura 4.27 – Escenario 3: Tramo del río de mayor infiltración para el acuífero que incluye los caminos preferenciales de flujo.



Como verificado del análisis de sensibilidad, el aporte que el sistema río más estructuras cársticas descargan en el acuífero es dividido en dos partes, una de 1528 m³/h (42%) de las estructuras cársticas y 2072 m³/h (58%) del río, dando un total de 3650 m³/h.

Tabla 4.9 - Localización UTM de las estructuras cársticas en el modelo numérico.

Coordenadas UTM	Flujo de infiltración (m ³ /h)
E304395 8011662N	358
E304010 8011494N	240
E303311 8011249N	236
E302821 8010823N	290
E301834 8010646N	404

Fuente: Propia

4.7. Escenario 4: Flujo subterráneo considerando estructuras cársticas e impermeabilizando el río

De la misma forma como fue abordado en el Escenario 2, en este caso la impermeabilización del río en su longitud total y parcial del trecho de infiltración es también verificada, con el objetivo de disminuir esa fuente de agua (río) al máximo posible. En el caso de la longitud parcial, equivalente a 4,5 km de

longitud (identificado en el Escenario 3), mayor que en el caso del Escenario 2 (2 km). En este escenario la longitud es mayor debido a que las estructuras cársticas están moderadamente distanciadas a lo largo del tramo de infiltración.

Opción (A) Impermeabilización del río en su longitud total de infiltración

La impermeabilización del río a lo largo de todo el trecho de infiltración (6,3 km) generó una nueva región de infiltración de 1 km (aguas abajo del río) de longitud que anteriormente era región de exfiltración, como se muestra en la Figura 4.28. Los valores de caudal que el río aporta para el acuífero disminuyeron de 3650 para 325 m³/h (91% de reducción) y en el caso del flujo que es descargado en la mina (aguas del río más del acuífero) este cambió de 11000 para 8472 m³/h (23% de reducción).

Opción (B) Impermeabilización del río en la longitud parcial de infiltración

En el caso de la impermeabilización parcial del río en el trecho de mayor infiltración, correspondiente a 4,5 km, los valores de caudal que el río aporta para el acuífero (Figura 4.29) disminuyeron de 3650 para 1043 m³/h (71%) y en el caso del flujo que es descargado en la mina (aguas del río más del acuífero) este pasó de 11000 para 8835 m³/h (20%).

Figura 4.28 - Escenario 4: Zona de impermeabilización total del río (3.6 km)

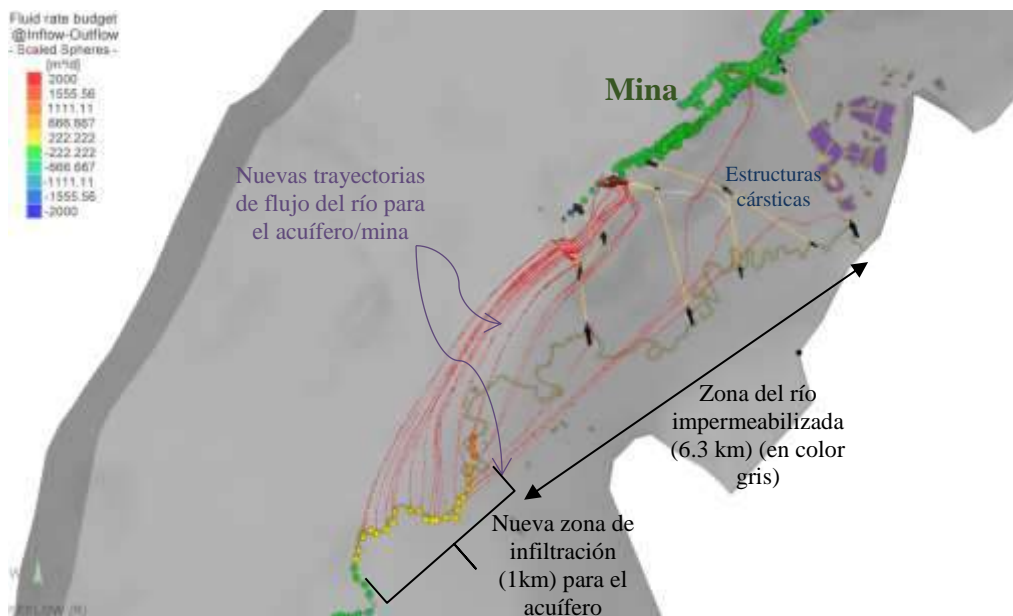
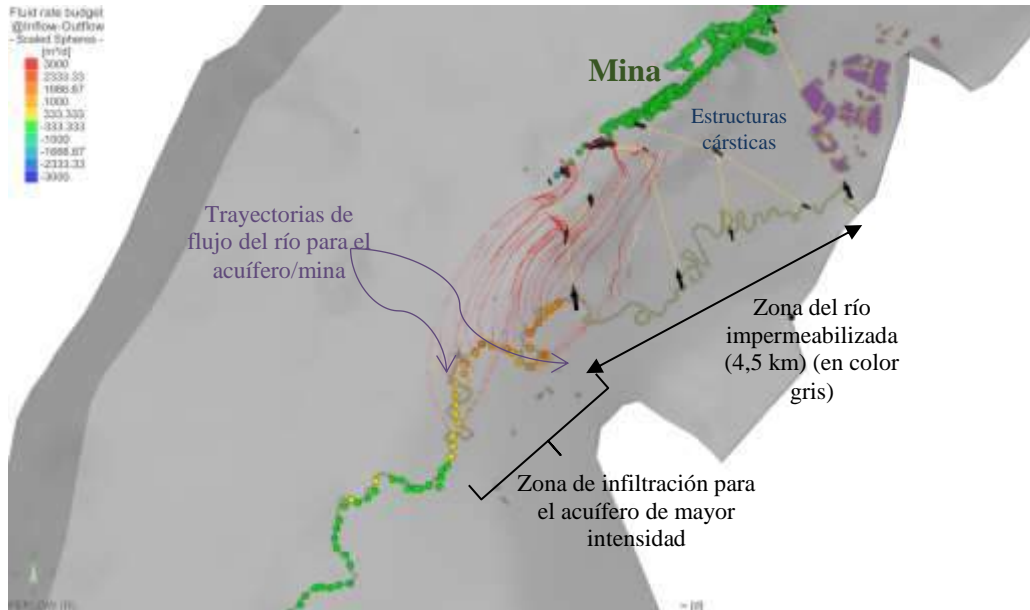


Figura 4.29 - Escenario 4: Zona de impermeabilización parcial del río (4,5 km)



A partir de los análisis realizados en el Escenario 4 cabe observar que la eficiencia del proceso de impermeabilización en el río debe ser estudiada tanto técnica como económicamente. Los resultados mostraron una reducción de hasta 91% en el caudal que el río pierde para el acuífero y de 23% como flujo de descarga en la mina (río más aguas del acuífero), esto cuando la impermeabilización de los 6,3 km es aplicada (tramo de infiltración total), pero, impermeabilizando apenas el tramo más crítico (de mayores tasas de infiltración) de hasta 4,5 km, la reducción es hasta 71% en el caudal que el río pierde para el acuífero y de 20% de reducción como flujo que descarga en la mina (río más aguas del acuífero). Esta diferencia de 3% de flujo que descarga en la mina, que es de principal interés, cuando el tramo de infiltración del río es impermeabilizado parcialmente, es de baja repercusión. Pero, en términos económicos, esa diferencia de longitud a ser impermeabilizada que puede economizar hasta 2 km de este procedimiento es muy atractiva. Un análisis comparativo económico debería ser hecho para evaluar la reducción de esos 3% de flujo en la impermeabilización del río o si sería mejor bombearlos.

4.7.1. Resumen de los resultados de los escenarios

A seguir se presenta un resumen de los resultados referentes a los escenarios en estudio.

Figura 4.30 – Comparación de los resultados de los caudales de descarga de los escenarios con y sin estructuras para el caso da Mina subterránea.

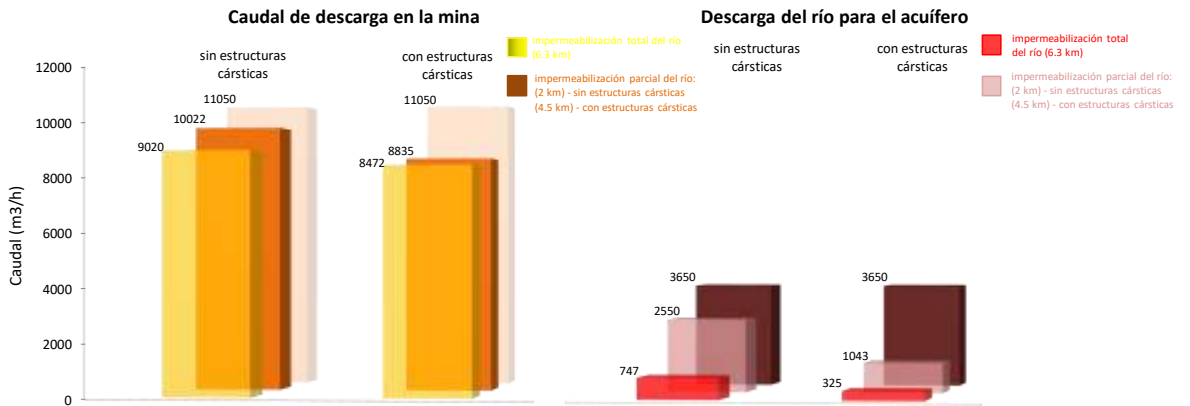
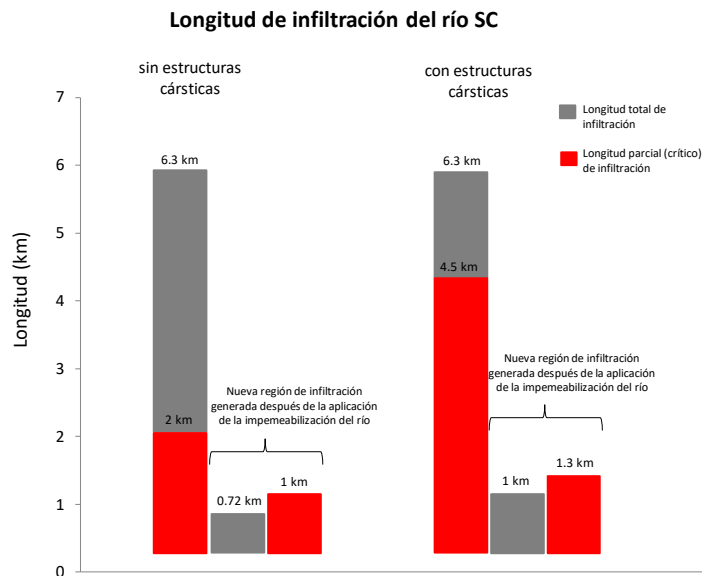


Figura 4.31 - Comparación de los resultados de las longitudes de infiltración de los escenarios con y sin estructuras para el caso de la Mina subterránea.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En esta tesis se concluye que el código FEFLOW es una herramienta robusta para representar sistemas hidrogeológicos no confinados con geometrías tridimensionales profundas y complejas, como normalmente comprenden proyectos de mineración, además de permitir a inclusión de elementos discretos 1D y 2D para la representación de estructuras geológicas en el modelo, tornando, de ese modo, el modelo numérico más representativo de la realidad.

1. Como resultado de la modificación de la condición tipo 3 para tipo 1 en el caso de la mina subterránea de Vazante, se observó que la condición tipo 1 ofrece una representación más realista del nivel freático y de los flujos generados para el acuífero. Esto debido a que la imposición de la carga hidráulica conocida es fijada en el contorno correspondiente al río, que para el caso de la condición de contorno tipo 3 sólo usa la carga hidráulica conocida como carga hidráulica de referencia, para que posteriormente el programa la compare con la carga hidráulica calculada, generando así apenas representaciones de flujos.
2. Si bien el programa FEFLOW tiene la capacidad de incorporar en el modelo numérico elementos discretos 1D los cuales pueden atravesar los elementos finitos (*Arbitrary node*), fue observado en los resultados que éstos funcionan como tubos impermeables a lo largo de la longitud de estos elementos, desde que estos elementos apenas están conectados en los nodos extremos. Sin embargo, estos elementos discretos consiguieron representar características cársticas explícitamente, como en el caso de la mina de Vazante, pero, su uso podría ser mejorado si estos elementos atravesaran la mayor cantidad de nodos entre la mina y el acuífero.
3. Con relación a los escenarios hechos en la evaluación del sistema de impermeabilización superficial del río Santa Catarina subyacente a la mina de Vazante, se concluye que tanto para los escenarios que

consideran o no estructuras cársticas, la impermeabilización total del río es más efectiva, debido a que el efecto de impermeabilización genera un nuevo tramo de infiltración del río para el acuífero aguas abajo del tramo impermeabilizado; que para el caso de la impermeabilización total éste sería menos desfavorable, consiguiendo así, una reducción de flujo de entrada para la mina de 18% (sin estructuras cársticas) a 23% (considerando estructuras cársticas). Otro efecto observado en este sistema de control de las aguas fue el aumento de recarga de las aguas subterráneas para la mina, el cual se vio reflejada en la discordancia del flujo reducido río en comparación con el flujo reducido en la mina.

4. Además de ofrecer al modelador opciones especiales para cuantificar flujos de salida (superficies de afloramiento como por ejemplo: ríos) en comparación a otros códigos más básicos que trabajan apenas con condiciones de contorno tipo *Seepage*.
5. En proyectos de mineración la base para una toma de decisiones técnica debe ser el conocimiento de las condiciones hidrogeológicas basadas en investigaciones previas, siempre llevando en cuenta aspectos ambientales, y al lado de un análisis técnico, los costos de instalación y operacionales deben ser estudiados.
6. A medida que el avance de la mina subterránea es efectuada, el cono de abatimiento se hace más pronunciado, lo cual puede llevar a respuestas erradas en la solución numérica, ya que este abatimiento alcanzará un BC tipo 1 (fuente infinita de agua).
7. Un contraste alto de permeabilidades (propiedades en general) en un modelo numérico tiende a generar un número de pre-condicionamiento alto, lo cual se ve reflejado en el aumento de iteraciones para resolver el sistema lineal generado por el método de los elementos finitos.
8. Una distorsión exagerada de los elementos finitos a la hora de generar la malla, podrían llevar a problemas numéricos (no convergencia de la solución) debido a que el jacobiano de la transformación en ese elemento tendería a ser negativo.

5.2.RECOMENDACIONES

1. Evaluar la ventaja y desventaja de trabajar con una malla estructurada (sin capas deformadas) comparando los tiempos de cálculo.
2. Considerar la dinámica del flujo de aguas superficiales y como éstas interactúan con las aguas subterráneas, para una representación más realista de los fenómenos que suceden en un sistema hidrogeológico.
3. Para los análisis en estado transitorio, calibrar los parámetros correspondientes con testes de bombeo, de tal forma que las predicciones puedan ser más confiables.
4. Considerar una re-calibración en estado estacionario de las propiedades hidráulicas para representar el modelo conceptual como un acuífero no confinado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, L.A., Noriega, R.D., Álvarez, J.P.F. **Simulación numérica del flujo subterráneo en una explotación minera a cielo abierto sobre una formación carbonatada utilizando MODFLOW y FEFLOW.** 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia – San Sebastian. 2012.

Anderson, M.P., Woessner, W.W. Applied Groundwater Modelling. Academic Press, San Diego: 381 pp. 1992.

Anderson, M.P. & Woessner W.W. Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego, CA. 2002.

Aryafar, A., Ardejani, F., Singh, R., Shokri, B. **Prediction of Groundwater Inflow and Height of the Seepage Face in a Deep Open Pit Mine using Numerical Finite Element Model and Analytical Solutions.** IMWA Symposium 2007; Water in Mining Environments. Cagliari, Italy, 2007.

Atkinson, L.C. **The Role and Mitigation of Groundwater in Slope Stability.** In Hustrulid, W., McCarter, M. e Van Zyl, D.(Ed.) Rock Slope Design Considerations. SME. 2001.

Bear, J. Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier, Environmental Science Series, New York, NY, 764 pp. 1972.

Bear, J. Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill, New York, NY, 569 pp. 1979.

Bear, J., Cheng, A.H.D. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer, XXII, 834p. 2010.

Best, M. **Introduction to groundwater aquifers.** Publicações digitais para a Municipality of Central Saanich Resource Atlas. 1998. <http://www.centrialsaanich.ca/Assets/Central+Saanich/Publications/CS+Resource+Atlas/Groundwater+Aquifers.pdf?method=1>

Bittencourt C., Reis Neto, J.M. **O sistema cárstico de Vazante - carste em profundidade em metadolomitos do Grupo Vazante – MG.** Revista Brasileira de Geociências. 42(1): 01-10, março de 2012.

Bittencourt C., De Bessa V., Araújo E.E. **The Vazante underground mine, Brazil - An example of controlled water table drawdown in karstic áreas.** In: ASCE, Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Integrating Science and Engineering to Solve Karst Problems, 11, Anais, p. 732-741. doi: 10.1061/41003(327)71. 2008.

Brown, D.M. **Reducing Modelling Uncertainty Using ASTM Ground-Water Modelling Standards in Subsurface Fluid-Flow (Ground-Water and Vadose**

Zone) Modelling. ASTM STP 1288, J.D. Ritchey and J.O. Rumbaugh, Eds, ASTM. 1996.

Brown, A. **The Influence and Control of Groundwater in Large Slopes.** Third Annual Conference on Stability in Open Pit Mining. Vancouver, BC., SME. 1981.

Carvalho, P., D.G. Richards, R., Fernandez-Rubio, Norton O.J. **Prevention of Acid Mine Drainage at Neves-Corvo Mine, Portugal.** International Journal of Mine Water, Vol.9, Nros. 1,2,3 e 4. 1990.

Cividini, A. & Gioda, G. **Back-Analysis Approach for the Design of Drainage Systems.** International Journal of Geomechanics, 7, 325 – 332. 2007.

Cornforth, D.H. **Landslides in Practice; Investigation, Analysis and Remedial/Preventative Options in Soils.** New Jersey, John Wiley and Sons Inc. 2005.

Custódio, E.& Llamas, M. R. **Hidrología Subterránea.** Barcelona: Ediciones Omega. 1157p. 1976.

CPRM. **Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais ao Milionésimo (1:1.000.000).** 2000.

DHI-Wasy. **Modeling Subsurface Flow and Transport using FEFLOW 6.2.** Curso de treinamento DHI Brasil, Belo Horizonte 2014. <http://gallery.mailchimp.com/9dbb48a019c8165551c4553b1/files/f97dda15-785f-427e-9778-54bfcf394ebe.pdf>

Díaz, R.N. **Aplicación de los modelos numéricos de simulación de flujo en problemas mineros. Caso de estudio: Explotación a cielo abierto en acuífero no confinado.** Estudio técnico para obtención de título de grado. Escuela Politécnica de Mieres. Universidad de Oviedo. 169p. 2012.

Díaz, R.N, Fernández, J.P. y Álvarez, L. **Estudio comparativo de los simuladores de flujo subterráneo Visual MODFLOW y FEFLOW 6.0.** 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Donostia – San Sebastian. 2012.

Diersch, H-J G. **FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014 .

Doulati Ardejani F., Singh R.N., Baafi E.Y., Porter I. **A finite element model to: Simulate groundwater rebound problems in backfilled open cut mines.** Mine Water and the Environment 22 (1), 39-44. 2003.

Fetter, C.W. **Applied Hydrogeology.** Macmillan: New York, 3rd ed., 691 pp.1994.

Fráguas, R., Alves, S., Chiapetta, R., Borges, C., Maciel; R., Mendes, J., Borges, T. **Relatório interno da Superintendência Regional de**

Regularização Ambiental Noroeste de Minas; 2013. Parecer único Nº 304295/2013, Minas Gerais, 2013.

Freeman, G.M. **Policy Regarding Slimes Disposal, Caving Ground and Water Infiltration.** ZCCM Internal Memorandum, 1970.

Guiguer, N., Todd, K., Brent, M., Medeiros, R. **Estudo de caracterização da dinâmica de fluxos subterrâneos a partir da injeção de técnicas baseadas na utilização de traçadores corantes.** Relatório interno da DHI & GeoHydros LLC elaborado para a Votorantim Metais Mina de Zinco de Vazante, Vazante, MG. Novembro/ Dezembro de 2013.

Hall, J. **The Practical Implementation of Dewatering and Depressurisation in Large Open Pits.** Fifth Large Open Pit Mining Conference. Kalgoorlie, WA. 2003.

Healy, R.W., & Scanlon, B.R. **Estimating Groundwater Recharge.** Cambridge University Press. 2010.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. **Levantamento Geológico- Estrutural nos Entornos da Mina de Zinco da Votorantim Metais – Unidade Vazante, no Município de Vazante, MG,** como Subsídio aos Estudos Hidrogeológicos. Vazante, Votorantim, Metais, Relatório Interno, 56 p. 2004.

Libicki, J. **Proposal od criteria for selection of dewatering methods in surface mining.** International Mine Water Association Symposium Zambia, 1993. IMWA 2009.

Marquínez, J. *et al.* **Riesgos naturales en Asturias.** Principado de Asturias. INDUROT. Universidad de Oviedo. 2003.

Llopis, N. **Fundamentos de Hidrología cárstica.** Ed. Blume. 1970.

Martinez, A. **Submodeling technique for static analysis.** Stress & Thermal Analysis Department, MSc. Software First South European Technology Conference, 7-9 June, 2000.

Medenci, E. & Guven, I. **The Finite Element Method and Application in Engineering Using ANSYS.** Springer, 2006.

Pessoa, P.F.P., Fernandes, R.A., Kimura, G. **Caracterização Hidrogeológica Integrada da Área de Influência da Mina de Zinco da Votorantim Metais, Unidade Vazante/MG.** Reporte desenvolvido pela Hidrovia Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda. para Votorantim Metais Unidade Vazante, 2012.

Preene, M. **Mine dewatering.** 2014. www.preene.com

Powers, P. J., Corwin, A. B., Schmall, P. C. & Kaeck, W. E. **Construction Dewatering and Groundwater Control,** John Wiley and Sons, Inc. 2007.

Prado, M. **Avaliação hidrogeológica e Revisão do modelo de fluxo (FEFLOW)**. Relatório preparado pela Schlumberger Water Services para a Votorantim Metais Zinco – Unidade Vazante. Rio de Janeiro, 2010.

Rahardjo, H., Hritzuk, K.J., Leong, E.C., Rezaur, R.B. **Effectiveness of horizontal drains for slope stability**. Engineering Geology, 69, 295-308. 2003.

San Román, J.S. **Evapotranspiración**. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Solo disponible en: <http://web.usual.es/javisan/hidro>. F. (2008).

Rostirolla, S.P.; Mancini, F.; Reis Neto, J.M.; Figueira, E.G. **Análise Estrutural e Mapeamento da Área da Mina de Vazante – MG**. Vazante, Votorantim Metais, Relatório Interno, 33 p. 2000.

Rowe, J. & Beale, G. **Relieving the pressure; Core concepts and solutions in open pit water control**. Mining Magazine. 2007.

Schlumberger Water Services. **Estabelecimento de Estratégia de Lavra para a Mina Subterrânea de Zinco de Vazante**. Relatório Técnico. 2007

Schlumberger Water Services. **Avaliação Hidrogeológica, Quantificação de Fluxos e Medidas Mitigadoras**. Relatório Técnico. 2008.

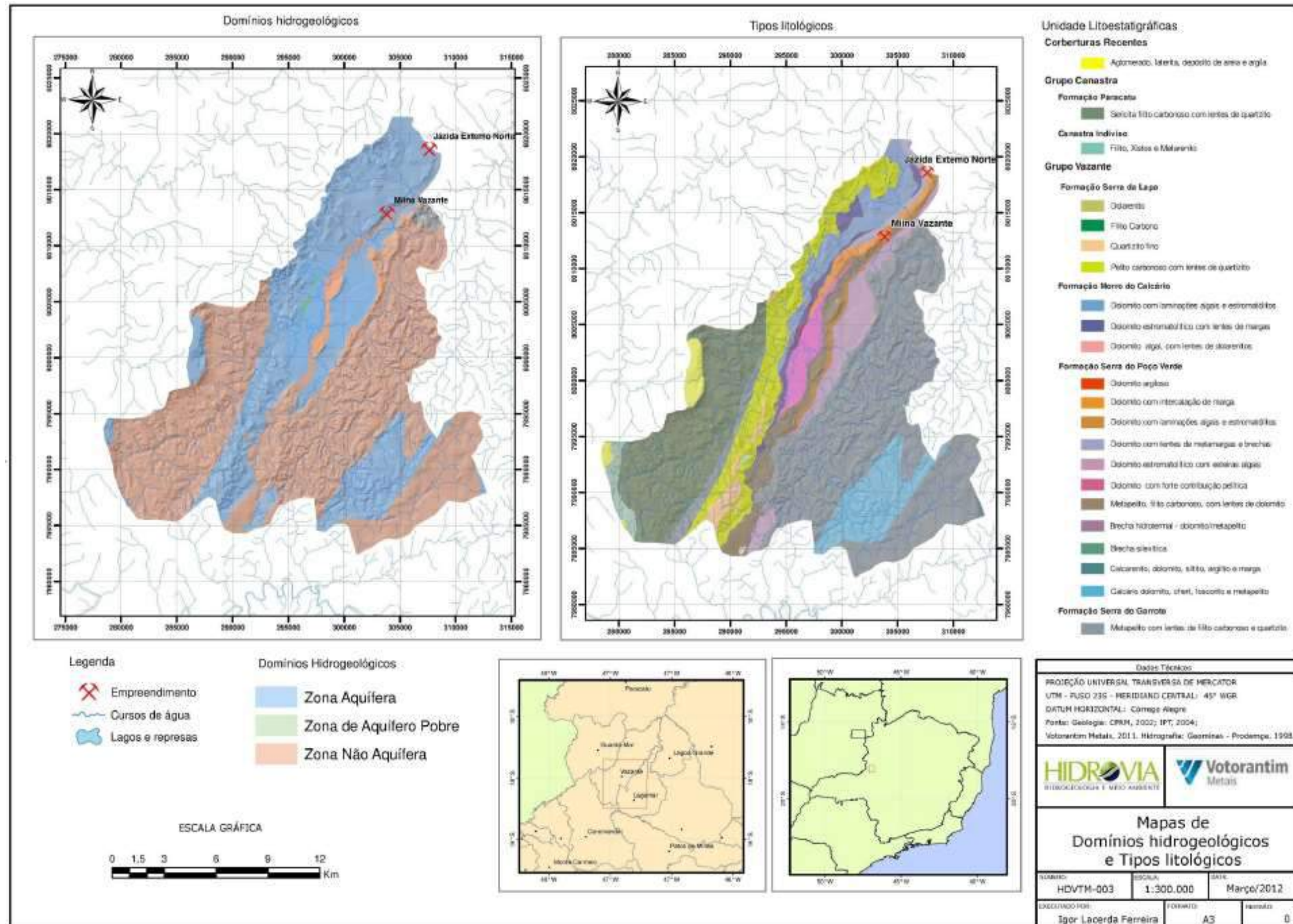
Tsao, T. M., Wang, M. K., Chen, M. C., Takeuchi, Y., Matsuura, S., Ochiai, H. **A case study of the pore water pressure fluctuation on the slip surface using horizontal borehole works on drainage well**. Engineering Geology, 78, 105-118. 2005.

Wels, C., Mackie, D., Scibek, J. **Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities**. Reporte Nro. 194001 preparado para o Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch da British Columbia, 2012.

Winter, TC, Judson, WH, Franke, OL, Alley WM. **Groundwater and surface water a single resource**. Circular 1139. U.S. Geological Survey, Denver. <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/>. 1998.

ANEXO: MAPA GEOLÓGICO

Anexo - Figura 1- Mapa geológico del área de influencia definida para los estudios hidrogeológicos – Mina subterránea de Vazante



Fuente: Pessoa et al., 2012